



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

## MÓDULO DE RIGIDEZ Y RELACIÓN DE POISSON DINÁMICOS OBTENIDOS DE MEDICIONES EN LA FRANJA DEL TERCIO MEDIO EN PROBETAS DE SUELO GRANULAR

### T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

### DOCTOR EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – MECÁNICA DE SUELOS  
P R E S E N T A :

**OSVALDO FLORES CASTRELLÓN**

TUTOR:

**DR. MIGUEL P. ROMO ORGANISTA**



Fecha: SEPTIEMBRE 2008

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente:	Dr. Daniel Reséndiz Núñez
Secretario:	Dr. Efraín Ovando Shelley
Vocal:	Dr. Miguel P. Romo Organista
Vocal:	Dr. Raúl Flores Berrones
Vocal:	Dr. Rigoberto Rivera Constantino
1 <sup>er</sup> . Suplente:	Dr. Manuel J. Mendoza López
2 <sup>do</sup> . Suplente:	Dr. Juan Manuel Mayoral Villa

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

---

DR. MIGUEL P. ROMO ORGANISTA

*A Cristina, por acompañarme con amor en la aventura de la vida.*

*A Rodrigo y Santiago, parte esencial de mi existencia.*

*A mis padres y hermanos, por ser como son.*

*A mis suegros y cuñados, por convertirse en mi familia.*

Este trabajo se desarrolló en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por cual expreso mi sincero agradecimiento a esta institución.

La paciencia y dedicación que el Dr. Miguel P. Romo O. tuvo para que este trabajo se culminara son loables. Dr. Romo, muchísimas gracias por sus opiniones tan acertadas durante el desarrollo del trabajo y sobretodo por el amistoso trato con que siempre se ha dirigido a mí.

Este documento se enriqueció de manera importante con las concretas y acertadas opiniones que hicieron los miembros del jurado durante la revisión de este trabajo, los doctores Daniel Reséndiz Núñez, Efraín Ovando Shelley, Raúl Flores Berrones, Manuel J. Mendoza López, Rigoberto Rivera Constantino y Juan M. Mayoral Villa. A todos ustedes mi sincero agradecimiento.

Parte del trabajo realizado en la etapa de automatización del equipo fue gracias al apoyo del ingeniero Enrique Gómez Rosas. Por tu amistad y colaboración, muchas gracias Enrique.

# MÓDULO DE RIGIDEZ Y RELACIÓN DE POISSON DINÁMICOS DETERMINADOS DE MEDICIONES EN LA FRANJA DEL TERCIO MEDIO EN PROBETAS DE SUELO GRANULAR

## ÍNDICE

	<u>Página</u>
<b>Resumen</b> .....	i
<b>Objetivos</b> .....	ii
<b>Nomenclatura</b> .....	iii
<b>Lista de figuras y tablas</b> .....	vi
<b>1 INTRODUCCIÓN Y ESTUDIOS PREVIOS</b>	
1.1 Introducción.....	1
1.1.1 Determinación de parámetros dinámicos en laboratorio .....	2
1.1.1.1 Método de transmisión de ondas .....	2
1.1.1.2 Columna resonante .....	3
1.1.1.3 Triaxial cíclica .....	4
1.2 Estudios previos .....	4
<b>2 INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO</b> .....	27
2.1 Características generales del equipo triaxial cíclico MTS .....	28
2.1.1 Sistema hidráulico de aplicación de carga .....	28
2.1.2 Panel de control .....	29
2.1.3 Sistema automatizado, control y procesamiento de datos .....	30
2.2 Instrumentación del equipo .....	31
2.3 Automatización del equipo .....	32
2.3.1 Módulo de operación .....	32
2.3.2 Configuración .....	32
2.3.3 Transductores .....	37
2.3.4 Ensaye .....	37
2.3.5 Módulo de reporte .....	39
2.3.6 Módulo de reporte múltiple .....	44
2.3.7 Módulo de calibración .....	45

<b>3 DESCRIPCIÓN DEL LOS MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE .....</b>	<b>49</b>
3.1 Descripción de los materiales .....	49
3.2 Formación de la probeta .....	50
3.2.1 Resultados de compactación .....	51
3.2.2 Relaciones de vacíos máxima y mínima de otras arenas .....	52
3.3 Procedimientos de ensaye e interpretación .....	52
3.4 Cálculo de parámetros .....	53
3.4.1 Módulo de rigidez y distorsión angular .....	54
3.4.2 Relación de Poisson .....	54
<b>4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
4.1 Variación de la compacidad relativa en la etapa de formación de la probeta.....	58
4.2 Corrección de cambio volumétrico .....	61
4.3 Relación de Poisson .....	69
4.3.1 Material SP-Arena mal graduada (La Parota) .....	70
4.3.1.1 Efecto de la compacidad relativa .....	71
4.3.1.2 Efecto del contenido de agua .....	73
4.3.1.3 Efecto del esfuerzo de confinamiento .....	74
4.3.2 Relación de Poisson en material La Parota, regresión lineal .....	76
4.3.3 Material SP-Arena limosa (Jales SLP) .....	76
4.3.3.1 Efecto de la compacidad relativa .....	77
4.3.3.2 Efecto del contenido de agua .....	77
4.3.3.3 Efecto del esfuerzo de confinamiento .....	78
4.3.4 Relación de Poisson en los Jales, regresión lineal .....	80
4.4 Módulo de rigidez .....	82
4.4.1 Material SP-Arena mal graduada (La Parota) .....	83
4.4.1.1 Efecto de la compacidad relativa .....	83
4.4.1.2 Efecto del esfuerzo de confinamiento .....	85
4.4.2 Módulo de rigidez en material La Parota, regresión lineal .....	87
4.4.3 Material SP-Arena limosa (Jales SLP) .....	87
4.4.3.1 Efecto de la compacidad relativa .....	87
4.4.3.2 Efecto del esfuerzo de confinamiento .....	89
4.4.4 Módulo de rigidez en los Jales, regresión lineal .....	90

<b>5 CONCLUSIONES</b> .....	93
<b>REFERENCIAS</b> .....	96
<b>ANEXO A</b> Resultados experimentales, relación de Poisson .....	100
<b>ANEXO B</b> Resultados experimentales, módulo de rigidez .....	113

## **1 Objetivos generales**

En este trabajo se plantea la hipótesis de que la magnitud del módulo de rigidez dinámico de suelos depende de la zona de la probeta en que se monitorean los desplazamientos, debido a la influencia que tienen el cabezal y la base de apoyo de la cámara triaxial. El hecho que la carga se aplique con el cabezal y la base permanezca fija durante el ensaye implica que las deformaciones unitarias en la parte superior del espécimen sean superiores que a cualquier otra altura, las cuales tienden a cero en la vecindad de la base. También se prevé que la tasa de la variación de la deformación de la probeta a lo largo de su altura no sea constante y puesto que el módulo de rigidez secante es función de la deformación axial se deduce que la magnitud de éste dependerá del tramo del espécimen que se considere para su cálculo. Consecuentemente, en esta tesis se monitorearán los desplazamientos axiales a diferentes alturas para obtener la variación del módulo de rigidez secante con la altura de la probeta.

Considerando que se tendrá valiosa información sobre los desplazamientos axiales cíclicos a diferentes alturas de las muestras ensayadas y dado el poco conocimiento que se tiene sobre la relación de Poisson dinámica, se juzgó pertinente medir los desplazamientos radiales cíclicos de sus tercios medios con la intención de evaluar dicha relación directamente con mediciones locales.

Con base en lo anterior, los objetivos generales que se plantean en esta tesis son los siguientes:

- Determinar la relación de Poisson dinámica en el tercio medio de probetas de suelo granular compactado, midiendo los desplazamientos axiales y radiales en esta franja.
- Obtener los módulos de rigidez al cortante dinámico considerando los desplazamientos de la probeta medidos en el cabezal superior de la misma y los registrados en el tercio medio y compararlos entre sí.

## **2 Objetivos particulares**

Para alcanzar los objetivos generales planteados en el inciso anterior se requiere cumplir los objetivos particulares siguientes:

- Ya que el equipo en que se realizarán los ensayes no está automatizado, es necesario desarrollar los programas para el control automático del mismo y para el cálculo de parámetros.
- Seleccionar la instrumentación adecuada para medir, como mínimo, las siguientes variables en la probeta: Desplazamiento axial en el cabezal superior, desplazamiento axial en las fronteras superior e inferior del tercio medio, el desplazamiento radial en el tercio medio y la carga axial aplicada.
- Definir un método de compactación que permita obtener las relaciones de vacíos máxima y mínima y con el cual se pueda reproducir con buena aproximación una probeta con la compacidad relativa deseada.
- Hacer una revisión bibliográfica sobre el tema a desarrollar en esta investigación.

Es importante señalar que aunque se tiene algo de la información requerida, en este trabajo no se aborda el problema de la variación del amortiguamiento de la probeta ya que debido a la extensión del tema será objeto de otra investigación.



## 1 Resumen

Con el objetivo de determinar el módulo de rigidez al corte dinámico y la relación de Poisson dinámica en el tercio central de probetas reconstituidas de suelo granular, se instrumentó y automatizó un equipo triaxial cíclico que opera con presión hidráulica, en el que es posible montar probetas de 10.14 cm de diámetro por 26 cm de altura. Dicha instrumentación consistió de catorce sensores entre los que se encuentran de carga, aceleración, presión y desplazamiento, estos últimos colocados en el extremo superior del espécimen, en las fronteras (superior e inferior) de la franja que define el tercio central. Se diseñó el programa de computadora en ambiente Windows que incluye los módulos para ejecutar ensayos triaxiales estáticos y dinámicos a carga y desplazamiento controlado, calcular los parámetros mecánicos y calibrar los sensores.

Se ensayaron dos materiales granulares clasificados según el SUCS como *SM-Arena limosa* (Jales) y *SP-Arena mal graduada* (La Parota). La muestra de suelo se formó utilizando un método de compactación que consiste en formar la probeta en diez capas, con doce apisonadas aplicadas por peso propio por capa, utilizando un pisón de diámetro un poco mayor al radio de la muestra, con pesos de pisón que van de 0.50 a 6 kg fuerza y contenidos de agua en el suelo en un intervalo que cubre el correspondiente al óptimo.

Los ensayos se realizaron a desplazamiento controlado y se aplicaron veinte ciclos a una frecuencia de excitación de 1Hz. La semi amplitud de desplazamiento axial se incrementó entre cada serie de ciclos aplicados, hasta llevar a la probeta a la falla. Durante el ensayo se registró el desplazamiento axial en el cabezal superior y en las fronteras superior e inferior del tercio central, la deformación radial en la franja central, así como la carga axial en la base de la muestra.

De las señales de desplazamiento registradas se graficaron las deformaciones unitarias radiales y axiales, desde deformaciones muy pequeñas hasta cerca de la falla, y a partir de éstas se obtuvo un valor de relación de Poisson para cada uno de los ensayos realizados. Se trató de identificar la influencia de que tienen el contenido de agua, la compacidad relativa y el esfuerzo de confinamiento en la variación de este parámetro.

Se calculó el módulo de rigidez al corte dinámico considerando las deformaciones axiales primero en todo el espécimen y luego las del tercio central y se obtuvo la relación de los módulos de rigidez, cuya variación indica que, al menos para los materiales granulares estudiados en esta tesis, las rigideces de las probetas se subestiman cuando se considera el desplazamiento del cabezal superior, como es usual en la práctica. Además, se hace un análisis de la influencia del contenido de agua, la compacidad relativa y el esfuerzo de confinamiento en la variación de la relación de módulos.

## Nomenclatura

a	Aceleración de respuesta del suelo, registrada en una prueba de columna resonante
$A_C$	Área del ciclo de histéresis
$A_{corr}$	Área corregida de la probeta
$a_{m\acute{a}x}$	Aceleración máxima en una curva de respuesta bajo vibración forzada
$A_0$	Área inicial de la probeta de suelo
$A_T$	Área del triángulo en el ciclo de histéresis
B	B de Skempton
CD	Prueba triaxial consolidada drenada
CS	Cabezal superior
CU	Prueba triaxial consolidada no drenada
$D_{r_{cv}}$	Compacidad relativa, aplicando vacío a la probeta
$D_{r_{sv}}$	Compacidad relativa, sin aplicar vacío a la probeta
$D_m$	Diámetro de la probeta de suelo
Dr	Compacidad o densidad relativa
$D_{50}$	Diámetro de partícula correspondiente al 50% que pasa en peso
E	Módulo de elasticidad
$E'$	Módulo de elasticidad, en condiciones de esfuerzos efectivos
$E_h$	Módulo de elasticidad horizontal
$e_{max}$	Relación de vacíos máxima
$e_{min}$	Relación de vacíos mínima
$E_v$	Módulo de elasticidad vertical
f	Frecuencia de excitación en una prueba triaxial cíclica
F	Momento de torsión en una prueba de columna resonante
$f_i, f_f$	Frecuencias inicial y final con que se indica el intervalo en el que se hará el barrido de frecuencias en una prueba de columna resonante
$f_0$	Frecuencia de resonancia, obtenida de una curva de respuesta bajo vibración forzada
$f_1, f_2$	Frecuencias correspondientes a la aceleración $a_{m\acute{a}x}/\sqrt{2}$ en una curva de respuesta bajo vibración forzada
g	Aceleración de la gravedad
Gs	Densidad de sólidos
G, $G_{sec}$	Módulo de rigidez al cortante dinámico
$G_{CS}$	Módulo de rigidez calculado con toda la probeta de suelo
$G_{m\acute{a}x}$	Módulo de rigidez al cortante dinámico máximo
$G_{min}$	Módulo de rigidez al cortante dinámico mínimo
$G_{TM}$	Módulo de rigidez calculado en el tercio central de la probeta
$h_1, h_2, \dots, h_{10}$	Alturas de la base del molde al término de las capa 1, 2, ..., 10, respectivamente

$I_m$	Momento polar de inercia de la probeta
$I_s$	Momento polar de inercia del sistema móvil en el equipo de columna resonante
$k$	Relación de velocidades de onda $k=V_p/V_s$
$K$	Relación de esfuerzos $K=\sigma_v/\sigma_h$ , para definir las condiciones de ensaye en una prueba anisotrópica
$L, L_0, H_0$	Longitud o altura de la probeta de suelo
$m$	Masa de la probeta de suelo
$N$	Número de ciclos en una prueba triaxial cíclica
$n$	Porosidad
$P$	Ondas de compresión
$P_a$	Carga axial registrada en una prueba triaxial
$P_n$	Presión de confinamiento normalizada respecto a la atmosférica
$PI$	Índice de plasticidad
$q$	Esfuerzo desviador $q = \sigma_1 - \sigma_3$
$r$	Radio que existe entre el centro de masa del acelerómetro y el centro de giro del sistema móvil en el equipo de columna resonante
$r_0$	Radio inicial de la probeta
$S$	Ondas de cortante
$SA$	Semi amplitud de la señal de desplazamiento que se aplica como excitación en una prueba triaxial cíclica
$Sh_h$	Velocidad de ondas de cortante generada en sentido horizontal del espécimen con un elemento laminar colocado horizontalmente
$Sh_v$	Velocidad de ondas de cortante generada en sentido horizontal del espécimen con un elemento laminar colocado verticalmente
$S_s$	Densidad relativa de sólidos
$S_v_h$	Velocidad de ondas de cortante generada con un elemento laminar en sentido vertical del espécimen
$TMS$	Tercio medio superior
$TMI$	Tercio medio inferior
$TM, TMC$	Tercio medio o tercio medio central
$t_p$	Tiempo de arribo de las ondas de compresión
$t_s$	Tiempo de arribo de las ondas de cortante
$u_b$	Presión de poro en la base de la probeta
$u_c$	Presión de poro a la altura central de la probeta
$UC$	Prueba triaxial de compresión no confinada
$UU$	Prueba triaxial no consolidada no drenada
$V_f$	Valor final de frecuencia, para realizar un barrido en la prueba de columna resonante
$V_i$	Valor inicial de frecuencia, para realizar un barrido en la prueba de columna resonante
$V_m$	Volumen de la muestra
$V_p$	Velocidad de onda de compresión

$V_s$	Velocidad de onda de cortante
$w$	Contenido de agua
$W_m$	Peso de la muestra de suelo
$\beta$	Relación de momentos polares de inercia en una prueba de columna resonante $\beta=I_m/I_s$
$\beta_1$	Relación de densidades relativas, $\beta_1=Dr_{cv}/Dr_{sv}$
$\beta_2$	Relación de densidades relativas, $\beta_2=Dr/Dr_{cv}$
$\delta$	Desplazamiento axial registrado en una prueba triaxial
$\Delta f$	Incremento de frecuencia durante un barrido de frecuencias en una prueba de columna resonante
$\Delta F$	Incremento de fuerza de torsión en una prueba de columna resonante
$\delta_{r1}$	Deformación radial 1
$\delta_{r2}$	Deformación radial 2
$\varepsilon, \varepsilon_a$	Deformación unitaria axial
$\varepsilon_r$	Deformación unitaria radial
$\gamma$	Deformación angular
$\gamma_m$	Peso volumétrico del suelo
$\lambda$	Amortiguamiento
$\lambda_{\min}$	Amortiguamiento mínimo
$\lambda_{\max}$	Amortiguamiento máximo
$\nu$	Relación de Poisson
$\nu_{\text{sec}}$	Relación de Poisson obtenida de la curva $\varepsilon_r$ vs $\varepsilon_a$ de una prueba triaxial estática
$\nu_{\text{eq}}$	Relación de Poisson obtenida de la curva $\varepsilon_r$ vs $\varepsilon_a$ de una prueba triaxial cíclica
$\nu$	Relación de Poisson
$\nu_{vh}, \nu_{hh}, \nu_{hv}$	Relaciones de Poisson generadas con elementos laminares en sentido vertical y horizontal del espécimen, en probetas sólidas
$\nu_{z\phi}, \nu_{\phi z}, \nu_{zr}$	Relaciones de Poisson generadas con elementos laminares en sentido vertical y horizontal del espécimen, en probetas huecas
$\rho$	Densidad de masa del suelo
$\sigma'_0, \sigma'$	Esfuerzo efectivo de consolidación
$\sigma_c, \sigma_3$	Esfuerzo de confinamiento
$\sigma_h$	Esfuerzo principal horizontal
$\sigma_v$	Esfuerzo principal vertical
$\sigma'_1$	Esfuerzo efectivo principal mayor
$\sigma'_3$	Esfuerzo efectivo principal menor
$\tau$	Esfuerzo cortante
$\tau_{\max}$	Esfuerzo cortante máximo

## 1 Lista de figuras

- Figura 1.1 Distribución de elementos para obtener  $G_{m\acute{a}x}$  con el método de transmisión de ondas
- Figura 1.2 Señal experimental. Método de transmisión de ondas
- Figura 1.3 Cálculo de parámetros, método de transmisión de ondas
- Figura 1.4 Fuerza de torsión aplicada y distorsiones que presenta la probeta durante la etapa de ensaye
- Figura 1.5 Curvas de respuesta bajo vibración forzada
- Figura 1.6 Cálculo de parámetros (muestra cilíndrica sólida)
- Figura 1.7 Esfuerzo desviador cíclico aplicado a la probeta de suelo
- Figura 1.8 Condición de esfuerzos a la que se somete la probeta de suelo
- Figura 1.9 Cálculo de parámetros, prueba triaxial cíclica
- Figura 1.10 Ciclo de histéresis
- Figura 1.11 Instrumentación local de la probeta de sección cuadrada (Hoque *et al.*, 1996)
- Figura 1.12 Variación de la relación de Poisson con  $\sigma_v/\sigma_h$  (Hoque *et al.*, 1996)
- Figura 1.13 Esquema general del equipo para ensayar probetas huecas (Chaudhary *et al.*, 2003)
- Figura 1.14 Esquema general del equipo para ensayar probetas sólidas (Chaudhary *et al.*, 2003)
- Figura 1.15 Posiciones y direcciones en las que se registraron las velocidades de onda de cortante (Chaudhary *et al.*, 2003)
- Figura 1.16 Relación de Poisson para las muestras huecas y sólidas durante la consolidación y en la etapa de ensaye, en un plano  $p'$  constante (Chaudhary *et al.*, 2003)
- Figura 1.17 Cámara triaxial cíclica acondicionada para medir velocidades de ondas P y S (Tsukamoto *et al.*, 2002)
- Figura 1.18 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y la B de Skempton (Tsukamoto *et al.*, 2002)
- Figura 1.19 Variación de la relación de Poisson con el grado de saturación (Gokhan *et al.*, 2001)
- Figura 1.20 Velocidades en muestras secas y saturadas en suelo de Troll. Los símbolos llenos corresponden a las velocidades de onda P y los vacíos a las S. Los triángulos corresponden a resultados con arena de Ottawa (Dvorkin y Nur, 1996).
- Figura 1.21 Relaciones de Poisson para muestras secas y saturadas de la arena de Troll (Dvorkin y Nur, 1996)
- Figura 1.22 Variación de la relaciones de Poisson con la porosidad, obtenidas con refracción sísmica (Salem, 2000)
- Figura 1.23 Variación de la relación de Poisson con la presión de confinamiento (Fawaz *et al.*, 2002)
- Figura 1.24 Variación de la relación de Poisson con la presión de confinamiento (Talesnick *et al.*, 2000)
- Figura 1.25 Variación de la relación de Poisson y del Módulo de Elasticidad con la presión de confinamiento (Talesnick *et al.*, 2000)

- Figura 1.26 Variación de la relación de Poisson obtenida en pruebas triaxiales monotónicas –ML- y cíclicas -CL- (Dong *et al.*, 1994)
- Figura 1.27 Variación del módulo de rigidez y la relación de Poisson obtenidos en pruebas triaxiales cíclicas (Dong *et al.*, 1994)
- Figura 1.28 Variación de la relación de Poisson obtenida en pruebas triaxiales cíclicas en muestra inalteradas y reconstituidas de grava (Yasuda *et al.*, 1994)
- Figura 1.29 Variación de la relación de Poisson con la distorsión angular, para dos intervalos de relación de vacíos (Fioravante *et al.*, 1994)
- Figura 1.30 Variación de la relación de Poisson con la relación de vacíos (Fioravante *et al.*, 1994)
- Figura 1.31 Influencia de la relación de vacíos y el esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson (Rivera, 1988)
- Figura 1.32 Influencia de la saturación y del esfuerzo efectivo en la relación de Poisson (Rivera, 1988)
- Figura 1.33 Influencia del esfuerzo efectivo y la distorsión angular en la relación de Poisson (Rivera, 1988)
- 
- Figura 2.1 Variación del módulo de rigidez,  $G$ , y el amortiguamiento,  $\lambda$ , con la deformación angular,  $\gamma$  (González *et al.*, 2007)
- Figura 2.2 Equipo triaxial cíclico MTS
- Figura 2.3 Esquema del equipo triaxial cíclico MTS
- Figura 2.4 Sistema hidráulico para aplicar presión al pistón del equipo
- Figura 2.5 Tablero de control
- Figura 2.6 Distribución de algunos de los sensores instalados en el equipo triaxial cíclico MTS
- Figura 2.7 Esquema de distribución de algunos de los sensores instalados en el equipo triaxial cíclico
- Figura 2.8 Menú de operación
- Figura 2.9 Pantalla de configuración de una prueba
- Figura 2.10 Patrón de excitación dinámico senoidal
- Figura 2.11 Patrón de excitación estático
- Figura 2.12 Patrón de excitación arbitrario
- Figura 2.13 Barrido de frecuencias con señal cuadrada
- Figura 2.14 Pantalla de transductores
- Figura 2.15 Definición del porcentaje de trabajo del equipo
- Figura 2.16 Ejecución del patrón de excitación diseñado
- Figura 2.17 Menú principal del módulo de reporte
- Figura 2.18 Prueba con patrón dinámico senoidal, sin filtro
- Figura 2.19 Prueba con patrón dinámico senoidal, con filtro
- Figura 2.20 Pantalla de impresión de ciclos de histéresis, sin filtro
- Figura 2.21 Pantalla de impresión de señales de transductores
- Figura 2.22 Pantalla de impresión de señales de un transductor

- Figura 2.23 Reporte de una prueba estática
- Figura 2.24 Pantalla e impresión de una de las curvas de reporte estático
- Figura 2.25 Carga vs deformación axial en la probeta, para un ciclo determinado y varias señales de desplazamiento
- Figura 2.26 Determinación del módulo de rigidez secante,  $G_s$ , para una amplitud de desplazamiento y un ciclo determinado
- Figura 2.27 Selección de señales y número de ciclos considerados para el cálculo de parámetros
- Figura 2.28 Curva de degradación del módulo de rigidez e incremento del amortiguamiento
- Figura 2.29 Menú de calibración de transductores
- Figura 2.30 Selección del sensor a calibrar
- Figura 2.31 Calibración de un sensor de desplazamiento
- Figura 2.32 Cambiar constantes de calibración de un sensor
- 
- Figura 3.1 Granulometrías de los materiales ensayados
- Figura 3.2 Secuencia gráfica de formación de la probeta de suelo
- Figura 3.3 Curvas de compactación de los materiales ensayados
- Figura 3.4 Variación de  $e_{max}$  y  $e_{min}$  con el contenido de finos y  $D_{50}$  (Cubrinovsky e Ishihara, 2002)
- Figura 3.5 Desplazamientos axiales y radiales en la probeta de suelo
- Figura 3.6 Resultados experimentales de desplazamientos axiales y radiales
- Figura 3.7 Cálculo del módulo de rigidez al cortante dinámico
- Figura 3.8 Medición de los desplazamientos axiales, a partir de las señales registradas
- Figura 3.9 Medición de los desplazamientos radiales, a partir de las señales registradas
- 
- Figura 4.1 Fotografía de distribución de capas durante la formación de la muestra
- Figura 4.2 Distribución de lecturas durante la formación de la probeta
- Figura 4.3 Variación de la compacidad relativa a lo largo de la probeta en la etapa de formación
- Figura 4.4 Variación de la compacidad relativa inicial con la aplicación del vacío regulado a 14.7 kPa
- Figura 4.5 Relación entre las compacidades relativas antes y después de aplicar el vacío a la probeta
- Figura 4.6 Variación de la compacidad relativa inicial con el esfuerzo de confinamiento, Jales SLP
- Figura 4.7 Variación de la compacidad relativa inicial con el esfuerzo de confinamiento, La Parota
- Figura 4.8 Variación de  $\beta$  con el esfuerzo de confinamiento
- Figura 4.9 Historia de la variación de la compacidad relativa en los residuos mineros
- Figura 4.10 Historia de la variación de la compacidad relativa en el material de La Parota
- Figura 4.11 Determinación de la relación de Poisson
- Figura 4.12 Resumen de las deformaciones unitarias axiales y radiales de los suelos ensayados
- Figura 4.13 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa para diferentes valores de contenido de agua

- Figura 4.14 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y el contenido de agua. Material “La Parota”
- Figura 4.15 Influencia del contenido de agua en la relación de Poisson
- Figura 4.16 Variación de la Relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, por contenido de agua
- Figura 4.17 Variación de la Relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento y contenido de agua
- Figura 4.18 Valores de la relación de Poisson obtenidos con la ecuación de regresión lineal, material La Parota
- Figura 4.19 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento y la compacidad relativa, para 0 y 6.5 % de agua
- Figura 4.20 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento y la compacidad relativa, para 0 y 6.5 % de agua, resumen
- Figura 4.21 Influencia del esfuerzo de confinamiento en la variación de la relación de Poisson, para 0 y 6.5 % de agua
- Figura 4.22 Relación Influencia del esfuerzo de  $\sigma_c$  en la variación de la relación de Poisson, para 0 y 6.5 % de agua (resumen)
- Figura 4.23 Valores de relación de Poisson obtenidas con la ecuación de regresión lineal, para jales
- Figura 4.24 Desplazamientos axiales y pendientes en los tercios de la muestra
- Figura 4.25 Relación de módulos de rigidez para diferentes compacidades relativas
- Figura 4.26 Resumen de relación de módulos de rigidez para diferentes compacidades relativas, para el material de La Parota
- Figura 4.27 Relación de módulos para diferentes esfuerzos de confinamiento, para el material La Parota
- Figura 4.28 Resumen de relación de módulos para diferentes esfuerzos de confinamiento, para el material La Parota
- Figura 4.29 Regresión lineal para las relaciones de módulos del material La Parota
- Figura 4.30 Desplazamientos axiales a lo largo de la probeta, para diferentes semiampplitudes
- Figura 4.31 Relación de módulos de rigidez para jales
- Figura 4.32 Relación de módulos de rigidez para jales, resumen
- Figura 4.33 Relación de módulos con el esfuerzo de confinamiento para jales
- Figura 4.34 Relación de módulos con el esfuerzo de confinamiento para jales, resumen
- Figura 4.35 Relación de módulos con el esfuerzo de confinamiento, material de Jales
- 
- Figura A-1 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa, para  $w=0$  %
- Figura A-2 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa, para  $w=2.5$  %
- Figura A-3 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa, para  $w=3.5$  %
- Figura A-4 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para  $w=0$  %
- Figura A-5 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para  $w=2.5$  %
- Figura A-6 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para  $w=3.5$  %



- Figura A-7 Variación de la relación de Poisson con el contenido de agua, para  $\sigma_c = 49$  kPa ( $0.50$  kg/cm<sup>2</sup>)
- Figura A-8 Variación de la relación de Poisson con el contenido de agua, para  $\sigma_c = 98$  kPa ( $1$  kg/cm<sup>2</sup>)
- Figura A-9 Variación de la relación de Poisson con el contenido de agua, para  $\sigma_c = 196$  kPa ( $2$  kg/cm<sup>2</sup>)
- Figura A-10 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa, para  $w=0$  %
- Figura A-11 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa, para  $w=6.5$  %
- Figura A-12 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para  $w=0$  %
- Figura A-13 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para  $w=6.5$  %
- 
- Figura B-1 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0$  %,  $\sigma_c=49$  kPa ( $0.50$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-2 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0$  %,  $\sigma_c=98$  kPa ( $1$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-3 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0$  %,  $\sigma_c=196$  kPa ( $2$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-4 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.5$  %,  $\sigma_c=49$  kPa ( $0.50$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-5 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.5$  %,  $\sigma_c=98$  kPa ( $1$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-6 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.5$  %,  $\sigma_c=196$  kPa ( $2$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-7 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.5$  %,  $\sigma_c=49$  kPa ( $0.50$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-8 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.5$  %,  $\sigma_c=98$  kPa ( $1$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-9 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.5$  %,  $\sigma_c=196$  kPa ( $2$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota
- Figura B-10 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0$  %,  $Cr$  entre  $94.05-94.60$  %, La Parota
- Figura B-11 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0$  %,  $Cr$  entre  $90.38-91.99$  %, La Parota
- Figura B-12 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0$  %,  $Cr$  entre  $81.40-85.13$  %, La Parota
- Figura B-13 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.5$  %,  $Cr$  entre  $77.62-79.68$  %, La Parota
- Figura B-14 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.5$  %,  $Cr$  entre  $67.88-68.99$  %, La Parota
- Figura B-15 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.5$  %,  $Cr$  entre  $44.13-48.64$  %, La Parota.
- Figura B-16 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.5$  %,  $Cr$  entre  $70.92-75.98$  %, La Parota

Figura B-17	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=3.5\%$ , $C_r$ entre 63.30-63.82 %, La Parota
Figura B-18	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=3.5\%$ , $C_r$ entre 39.29-48.75 %, La Parota
Figura B-19	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=0\%$ y $\sigma_c=49$ kPa ( $0.50$ kg/cm <sup>2</sup> ), Jales
Figura B-20	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=0\%$ y $\sigma_c=98$ kPa ( $1$ kg/cm <sup>2</sup> ), Jales
Figura B-21	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=0\%$ y $\sigma_c=196$ kPa ( $2$ kg/cm <sup>2</sup> ), Jales
Figura B-22	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=6.5\%$ y $\sigma_c=49$ kPa ( $0.50$ kg/cm <sup>2</sup> ), Jales
Figura B-23	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=6.5\%$ y $\sigma_c=98$ kPa ( $1$ kg/cm <sup>2</sup> ), Jales
Figura B-24	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=6.5\%$ y $\sigma_c=196$ kPa ( $2$ kg/cm <sup>2</sup> ), Jales
Figura B-25	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=0\%$ y $C_r$ entre 97.69-97.97 %, Jales
Figura B-26	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=0\%$ y $C_r$ entre 88.47-93.58 %, Jales
Figura B-27	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=0\%$ y $C_r$ entre 85.41-88.24 %, Jales
Figura B-28	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=6.5\%$ y $C_r$ entre 60.38-62.42 %, Jales
Figura B-29	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=6.5\%$ y $C_r$ entre 46.35-48.39 %, Jales
Figura B-30	Módulos de rigidez y relación entre módulos, para $w=6.5\%$ y $C_r$ entre 38.96-39.25 %, Jales

## 1 Lista de Tablas

Tabla 1.1	Pruebas de laboratorio para determinar parámetros dinámicos en suelos (tomado de Ishihara, 1996)
Tabla 2.1	Sensores instalados en el equipo triaxial cíclico MTS
Tabla 3.1	Granulometrías de los materiales ensayados
Tabla 4.1	Lecturas tomadas al colocar cada una de las capas
Tabla 4.2	Espesores promedio de cada capa durante la formación de la probeta
Tabla 4.3	Espesores promedio de la franja de suelo que va de la base a la capa colocada
Tabla 4.4	Compacidad relativa por capa correspondiente a la franja de suelo que va de la base a la capa colocada y la del tercio medio
Tabla 4.5	Ensayes realizados para determinar el cambio volumétrico de las muestras al aplicar el esfuerzo de confinamiento
Tabla TA-1	Programa de ensayos realizados en el material de La Parota
Tabla TA-2	Programa de ensayos realizados en el material de Jales SLP

---

# **CAPÍTULO 1**

INTRODUCCIÓN Y ESTUDIOS PREVIOS

---

### 1 INTRODUCCIÓN

El primer estudio para obtener la respuesta dinámica de suelos, basado en pruebas de laboratorio se llevó a cabo hace más de setenta años, cuando Lida (1938) realizó un tipo de prueba de columna resonante. En la década de los sesenta se desarrollaron equipos equivalentes, pero más sensibles que hicieron posible la medición de propiedades dinámicas de diferentes tipos de suelos (Hardin y Richart (1963), Hardin y Black (1969) y Drnevich y Richart (1970), entre otros). Actualmente existen equipos dinámicos que permiten de forma totalmente automática aplicar la excitación dinámica y hacer la toma de lectura de las señales de los sensores instalados, además de hacer el procesado de la información en forma eficiente.

Las características dinámicas de suelos pueden ser evaluadas mediante pruebas de laboratorio en las que generalmente se usa carga senoidal como fuerza de excitación y las pruebas se hacen a carga o desplazamiento controlado. Los equipos que comúnmente se usan en laboratorio son la columna resonante (genera deformaciones angulares entre  $10^{-5}$  y  $10^{-2}\%$ ), la cámara triaxial cíclica y el corte simple cíclico (ambos inducen deformaciones angulares entre  $10^{-3}$  hasta  $10\%$ , tal como se indica en la tabla 1.1)

Tabla 1.1 Pruebas de laboratorio para determinar parámetros dinámicos en suelos (tomado de Ishihara, 1996)

Magnitud de deformación angular (%)		$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
<b>Fenómeno</b>		Propagación de ondas Vibración		Asentamientos diferenciales		Deslizamientos Licuación	
<b>Características mecánicas</b>		Elástico		Elasto-plástico		Falla	
<b>Pruebas de laboratorio</b>	<b>Propagación de ondas</b>	↔					
	<b>Columna resonante</b>	↔					
	<b>Prueba de carga repetida</b>	↔					

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 1.1 se deduce que si se desea estudiar el comportamiento del suelo a distorsiones muy pequeñas hasta la falla, es necesario evaluar el o los parámetros dinámicos como el módulo de rigidez,  $G$ , el amortiguamiento,  $\lambda$ , y la relación de Poisson,  $\nu$ , usando muestras gemelas en dos equipos, aunque ya existen aparatos que aplican deformaciones en todo el intervalo mencionado, como el equipo cíclico torsionante.

Los resultados de una gran variedad de investigaciones experimentales muestran que los factores de mayor influencia en el comportamiento de suelos cohesivos son el esfuerzo efectivo de consolidación,  $\sigma'$ , y el índice de plasticidad. En cuanto a los suelos granulares, el esfuerzo efectivo,  $\sigma'$ , y la compacidad relativa,  $C_r$ , son los dominantes (e.g., Seed e Idriss, 1969). A estos pueden agregarse el número de ciclos, el método para formar la muestra, la distribución granulométrica (e.g., Hardin y Richart, 1963), y el tiempo de consolidación a que se somete el suelo (Mulilis *et al.*, 1976 y Troncoso, 1995).

Los resultados de un número importante de investigaciones muestran la existencia de una clara relación entre el módulo de rigidez al corte dinámico,  $G$ , y el amortiguamiento,  $\lambda$ , del suelo con la deformación angular (e.g., Hardin, 1965; Seed e Idriss, 1969; Tatsuoka *et al.*, 1988; Hardin y Drenevich, 1972a; Ishibashi *et al.*, 1985; Takeji, 1980). Se ha observado que para niveles de deformación angular de  $10^{-4}\%$  o menores,  $G$  y  $\lambda$  permanecen prácticamente constantes, por lo que se ha adoptado que para este nivel de deformaciones se obtienen los valores máximo  $G_{m\acute{a}x}$  y mínimo  $\lambda_{m\acute{i}n}$ . Conforme aumenta este valor de deformación,  $G$  disminuye y  $\lambda$  se incrementa, hasta llegar a un valor mínimo y máximo,  $G_{m\acute{i}n}$  y  $\lambda_{m\acute{a}x}$ .

### 1.1 Determinación de parámetros dinámicos en laboratorio

#### 1.1.1 Método de transmisión de ondas

En este método se coloca el sensor emisor y el receptor en las caras opuestas de una muestra cilíndrica, tal como se ilustra en la figura 1.1. Estos sensores pueden ser cristales piezoeléctricos, que generan principalmente ondas de compresión (P) o elementos laminares, que generan principalmente ondas de cortante (S). Utilizando un generador de funciones se emite un pulso en el emisor, las ondas de compresión y cortante viajan a través de la muestra y son registradas por el receptor. Ambas señales se graban en un osciloscopio y posteriormente se digitalizan para su análisis.

Se grafican las señales de entrada y salida (emisor y receptor) y se define de forma gráfica el momento de arribo de las ondas de compresión P y de cortante S, tal como se ilustra en la figura 1.2.

En este tipo de ensayos la muestra se somete a esfuerzos y deformaciones en el intervalo elástico, por lo que no sufre daños en su estructura y se asume que el módulo de rigidez obtenido es el máximo,  $G_{m\acute{a}x}$ . Esto permite usar varias veces el mismo espécimen y determinar su módulo de rigidez a diferentes esfuerzos efectivos.

Con las dimensiones de la probeta ( $L_m$  y  $D_m$ ) y los tiempos de arribo de las ondas S y P ( $t_s$  y  $t_p$ ) se determina el módulo de rigidez máxima,  $G_{m\acute{a}x}$ , el módulo de elasticidad, E, y la relación de Poisson,  $\nu$ , de acuerdo con el esquema de cálculo mostrado en la figura 1.3.

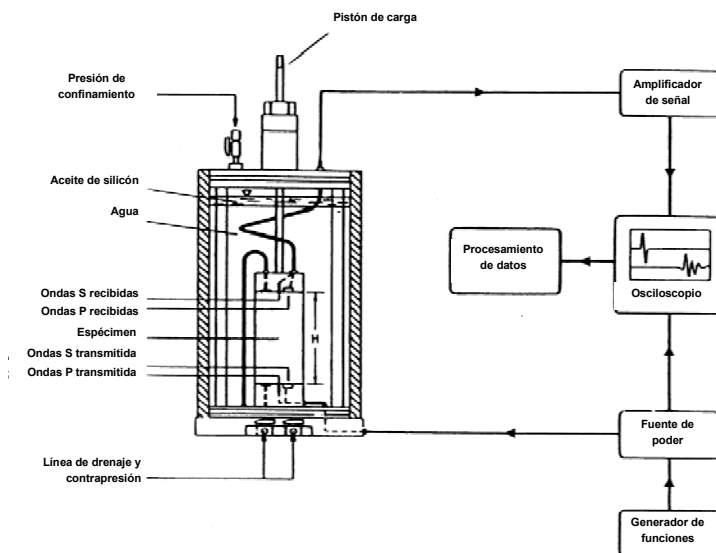


Figura 1.1 Distribución de elementos para obtener  $G_{m\acute{a}x}$  con el método de transmisión de ondas

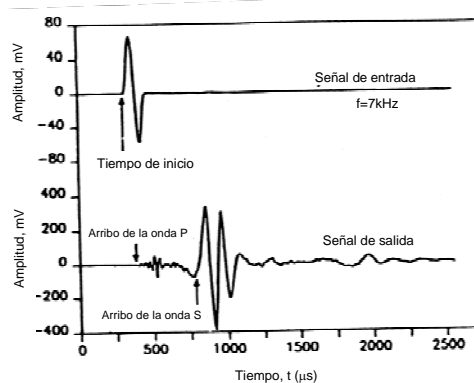


Figura 1.2 Señal experimental. Método de transmisión de ondas

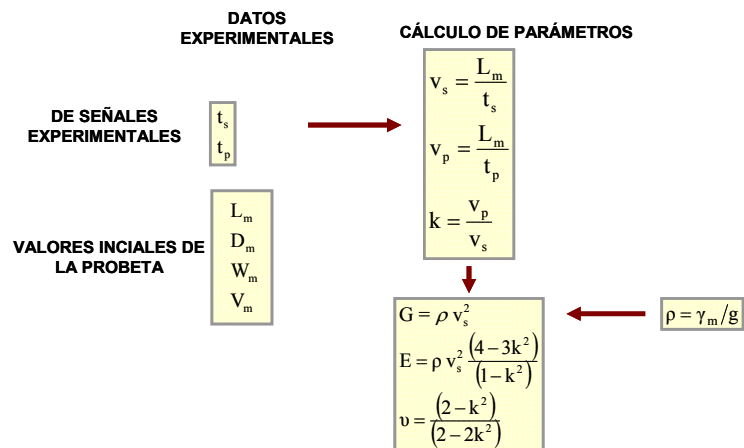


Figura 1.3 Cálculo de parámetros, método de transmisión de ondas

### 1.1.2 Columna resonante

Durante la etapa de ensaye se aplica un momento torsionante,  $F$ , en la parte superior del espécimen mientras que su base se encuentra empotrada (figura 1.4); se registra la aceleración de respuesta,  $a$ , con un acelerómetro, cuya magnitud dependerá de la rigidez del material ensayado; entre más rígido sea éste, 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  $\Delta f$  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  $f_i$  hasta  $f_f$  con incrementos  $\Delta f$ , se le llama barrido de frecuencias. Al terminar cada barrido de frecuencias se incrementa la fuerza de torsión en valores  $\Delta F$ , de manera que al final del ensaye se tendrá una serie de estos barridos, donde la fuerza de torsión va incrementándose entre cada uno de ellos.

Para los diferentes incrementos de frecuencia de excitación, se obtienen los valores de aceleración y frecuencia correspondientes, con los cuales se forma la curva de aceleraciones versus frecuencia como la mostrada en la figura 1.5. En ésta, 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,  $F$ . Es claro que al incrementarse la fuerza  $F$ , aumenta la aceleración máxima,  $a_{m\acute{a}x}$ , y se reduce la frecuencia denominada de resonancia,  $f_0$ .

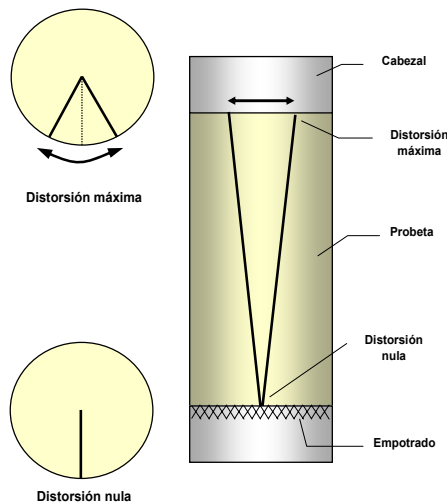


Figura 1.4 Fuerza de torsión aplicada y distorsiones que presenta la probeta durante la etapa de ensaye

De cada curva de aceleraciones totales se registran  $a_{m\acute{a}x}$ ,  $f_0$ , y las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , correspondientes a la aceleración  $a_{m\acute{a}x}/\sqrt{2}$  (figura 1.5). Con los valores de  $f_0$ , la longitud de la muestra,  $L$ , y el valor de  $\beta$  calculado a partir de los momentos polares de inercia de la muestra,  $I_m$ , y del sistema móvil,  $I_s$ , se determinan el módulo de rigidez al cortante dinámico,  $G$ , el amortiguamiento (bajo vibración forzada),  $\lambda$ , y la distorsión angular,  $\gamma$ , tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 1.6.

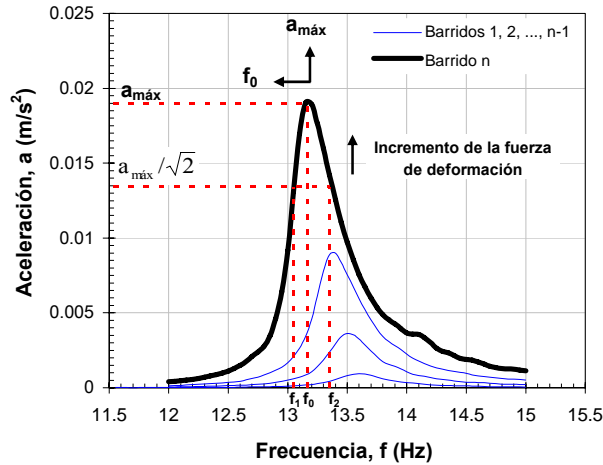


Figura 1.5 Curvas de respuesta bajo vibración forzada

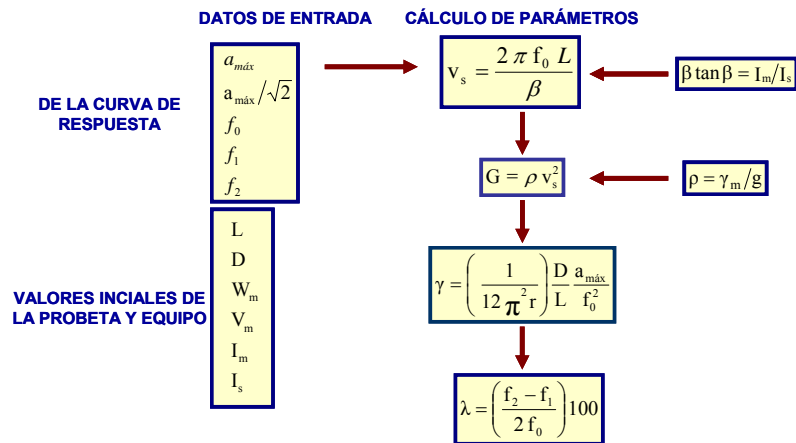


Figura 1.6 Cálculo de parámetros (muestra cilíndrica sólida)

### 1.1.3 Triaxial cíclica

Se le aplica a la probeta una señal con patrón dinámico senoidal, a desplazamiento o esfuerzo controlado, como se muestra en la figura 1.7; se define el número de ciclos,  $N$ , la frecuencia de excitación,  $f$  (que generalmente no rebasa los 4 Hz) y la semiamplitud de la señal (SA). De los resultados, se definen los vectores de carga versus tiempo y desplazamiento versus tiempo. Para los siguientes patrones de carga se mantienen constantes  $N$  y  $f$  y se incrementa la SA, hasta llegar a la falla de la probeta.

La probeta de suelo se somete a una variación de esfuerzos desviadores y cortantes como el que se muestra en la figura 1.8. Se parte del esfuerzo  $\sigma_3$ , y se aplica un esfuerzo desviador cíclico,  $q$ , por medio de la señal periódica senoidal axial actuando en la parte superior de la muestra, lo que genera una variación cíclica de esfuerzos cortantes.

Para determinar los parámetros dinámicos del suelo se selecciona el mismo número de ciclo para todas las SA aplicadas. Con los resultados experimentales correspondientes a los vectores de carga y

desplazamiento, y los datos volumétricos de la probeta se determinan los vectores de esfuerzo cortante y distorsión angular, según la secuencia de cálculo mostrado en la figura 1.9.

De ciclos de histéresis, como el mostrado en la figura 1.10, correspondiente a una SA, se determina el módulo de rigidez secante,  $G$ , el amortiguamiento,  $\lambda$ , y la distorsión angular,  $\gamma$ .

Con los resultados de cada SA se trazan las curvas  $G-\gamma$  y  $\lambda-\gamma$ , en escala semilogarítmica. Al incrementarse la SA, los valores de  $\gamma$  y  $\lambda$  se incrementan y  $G$  disminuye.



Figura 1.7 Esfuerzo desviador cíclico aplicado a la probeta de suelo

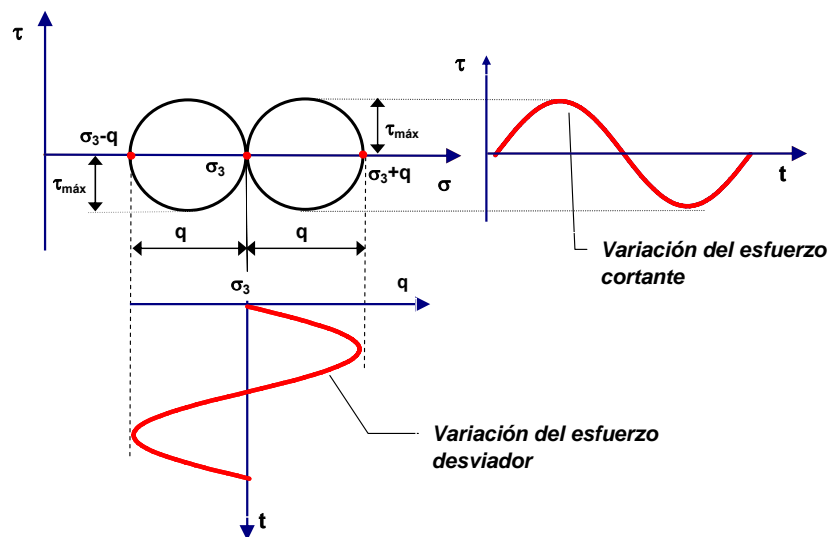


Figura 1.8 Condición de esfuerzos a la que se somete la probeta de suelo



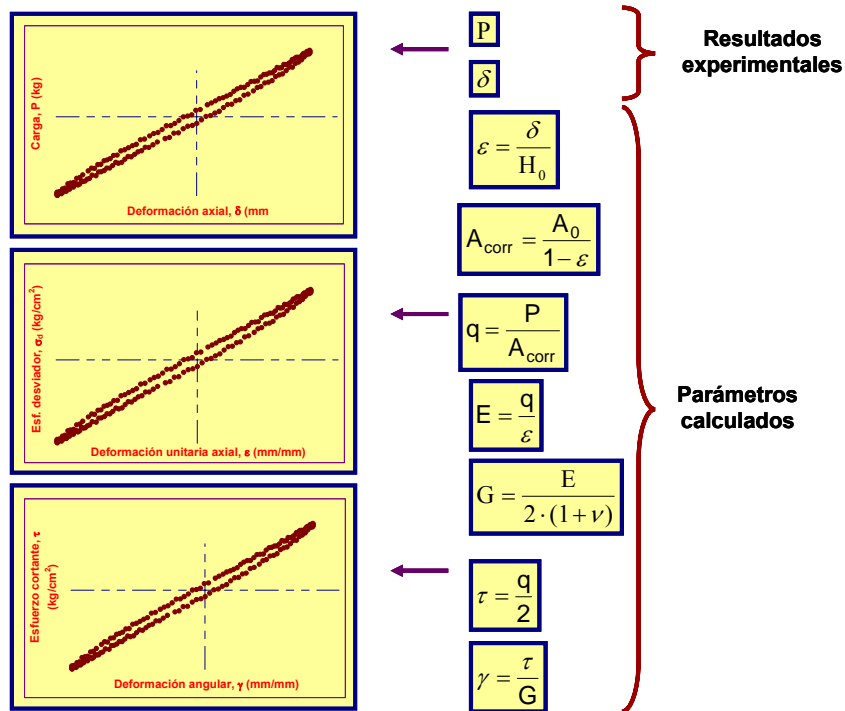


Figura 1.9 Cálculo de parámetros, prueba triaxial cíclica

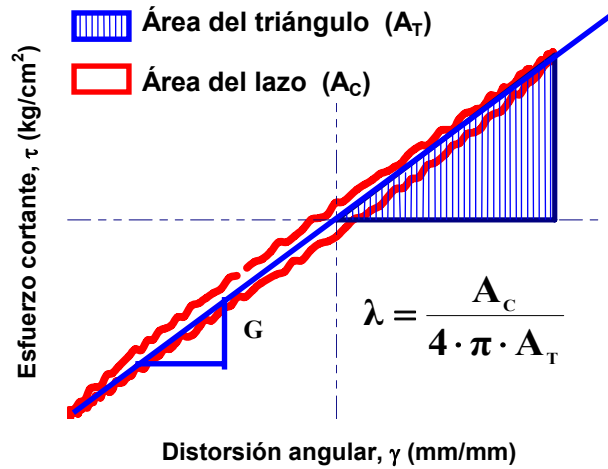


Figura 1.10 Ciclo de histéresis

## 1.2 Estudios previos

Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre estudios experimentales realizados en suelos granulares donde determinaran los módulos de rigidez al cortante dinámico,  $G$ , y la relación de amortiguamiento,  $\lambda$ , en el tercio central de probetas cilíndricas. Respecto a la determinación del módulo en el tercio central, no se encontraron trabajos publicados, lo que muestra la conveniencia de realizar un estudio en el que se ejecuten ensayos para determinar el módulo en el tercio central de la probeta utilizando mediciones del desplazamiento axial en el cabezal superior, correspondiente a la altura total de la probeta, y en las fronteras superior e inferior del tercio medio.

Para la obtención de la relación de Poisson sí se encontraron trabajos que reportan valores experimentales de este parámetro en suelos granulares, cuyos resultados se muestran en este capítulo. En la ejecución de

los ensayos la relación de Poisson se determinó a partir de mediciones de deformación axial y radial de la probeta o utilizando sensores para generar y registrar señales de ondas de cortante (sensores laminares) y de compresión (cristales piezoeléctricos).

En este capítulo se comentarán las investigaciones más relevantes enfocadas a la obtención de la relación de Poisson de suelos granulares, ya sea midiendo las deformaciones axiales o radiales; o bien, midiendo las velocidades de propagación de onda de compresión y de cortante. En experimentos de laboratorio se ha analizado la influencia de algunos parámetros como la compacidad relativa (o bien la porosidad), el esfuerzo efectivo, el grado de saturación y el nivel de deformación axial, entre otros, en la variación de la relación de Poisson (Sushil *et al.* (2004), Gokhan *et al.* (2001), Fawaz *et al.* (2002), Dvorkin y Nur (1996), Hoque *et al.* (1996), entre otros).

Hoque *et al.* (1996) ensayaron probetas de sección cuadrada de 23 cm de ancho por 57 cm de altura en una cámara triaxial cíclica, la cual permitía consolidar las probetas anisotrópicamente, aplicando presiones de confinamiento con aire comprimido y un esfuerzo desviador con un pistón controlado con una servoválvula neumática. En este trabajo se aplicaron esfuerzos cíclicos de bajas amplitudes con incremento de esfuerzo horizontal o vertical, con el objetivo de determinar los módulos de elasticidad vertical ( $E_v$ ) y horizontal ( $E_h$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ).

La cámara triaxial estaba equipada con una celda de carga sumergible, y tenía la posibilidad de controlar de manera automática los esfuerzos principales verticales y horizontales para generar diferentes trayectorias de esfuerzos. Emplearon un par de LDT's (Local Deformation Transducers) para registrar el desplazamiento axial y dos pares para el desplazamiento lateral, colocados directamente sobre la membrana que cubre la probeta (Goto *et al.*, 1991). Utilizaron, además, dos sensores de aproximación para registrar los desplazamientos axiales en el cabezal superior de la probeta y dos para los desplazamiento laterales a la altura media de la muestra, tal como se indica en la figura 1.11.

El material que se ensayó fue arena de Ticino en condición densa, la cual tenía una graduación pobre con dominio principal de arena sílica, con las siguientes propiedades índice:  $G_s = 2.68$ ,  $D_{50} = 0.502$  mm,  $e_{máx} = 0.96$  y  $e_{mín} = 0.59$ . Las probetas se formaron por pluviación en aire, posteriormente se les aplicó vacío antes de quitar el molde para sostener la estructura del material, se colocaron la membrana y los sensores, para luego sustituir el vacío por presión de confinamiento equivalente. Se ensayaron probetas de suelo granular denso, en condiciones isotrópicas y anisotrópicas con frecuencias de carga vertical y horizontal de 0.10 a 0.0067 Hz.

Los valores de deformación unitaria vertical,  $\epsilon_v$ , y horizontal,  $\epsilon_h$ , se obtuvieron promediando los valores de las dos lecturas de los LDT's verticales y los cuatro horizontales, respectivamente. En la figura 1.12 se muestra la variación de la relación de Poisson con el incremento de la relación de los esfuerzos principales vertical y horizontal,  $\sigma_v/\sigma_h$ , en la cual se puede observar que la relación de Poisson es poco sensible al incremento de la relación de esfuerzos ya que aumenta de 0.16 a 0.19, para un incremento de relación de esfuerzos de 0.50 a 2.0.

Estos resultados sugieren que si se ejecuta un ensayo donde el esfuerzo horizontal permanezca constante en la etapa de falla y sólo aumente el esfuerzo vertical, la relación de Poisson tenderá a incrementarse conforme crezca el esfuerzo desviador. Aunque a las probetas se les aplicaron esfuerzos de carga y descarga, no se pueden considerar dinámicos debido a las frecuencias tan bajas que se manejan.

En un trabajo desarrollado por Chaudhary *et al.* en 2003, se obtuvieron los parámetros de rigidez en arena densa de Toyoura, medidos para varias condiciones de esfuerzos, durante condiciones de consolidación isotrópica y posteriormente ensayadas a compresión o extensión, manteniendo el esfuerzo octaédrico,  $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ , constante (en la etapa de ensayo se mantiene  $p'$  constante, mientras aumenta o disminuye el esfuerzo cortante), en probetas huecas y sólidas, en un equipo triaxial instrumentado con sensores de medición local (para registrar desplazamientos) y sensores laminares para generar y registrar las señales de excitación de donde se calculan las velocidades de onda de compresión y cortante. Se determinaron los parámetros de rigidez en condiciones casi elásticas en ensayos estáticos, en probetas cilíndricas huecas y sólidas.

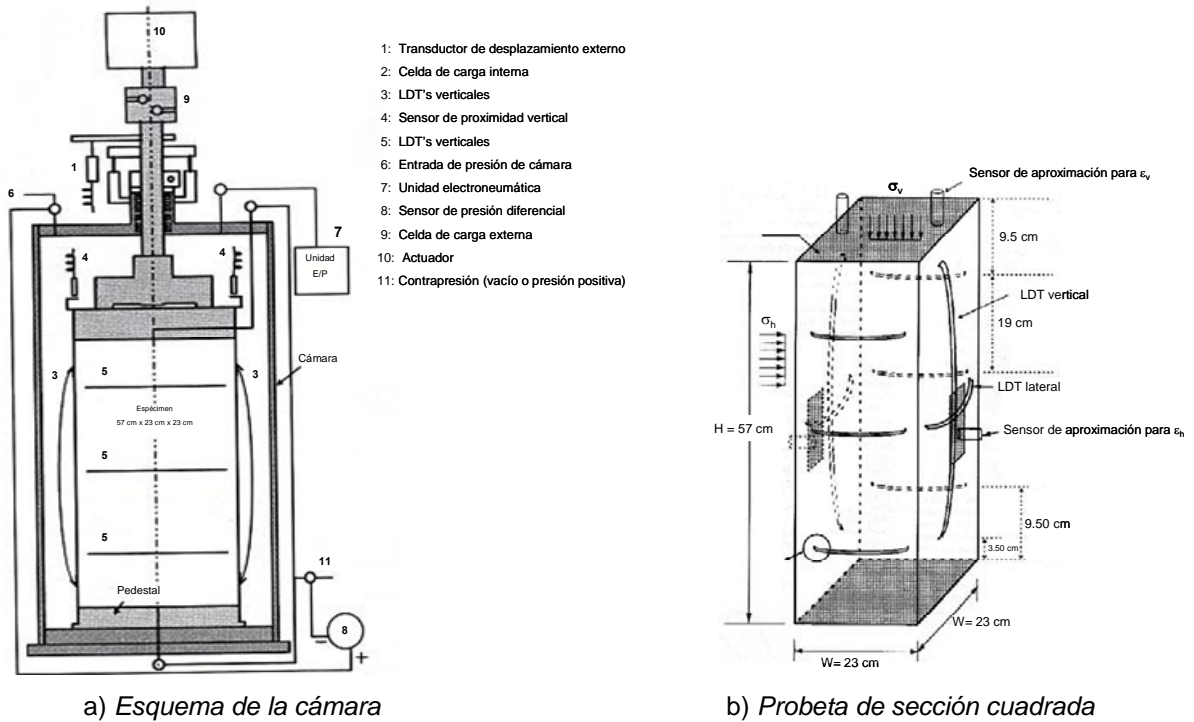


Figura 1.11 Instrumentación local de la probeta de sección cuadrada (Hoque *et al.*, 1996)

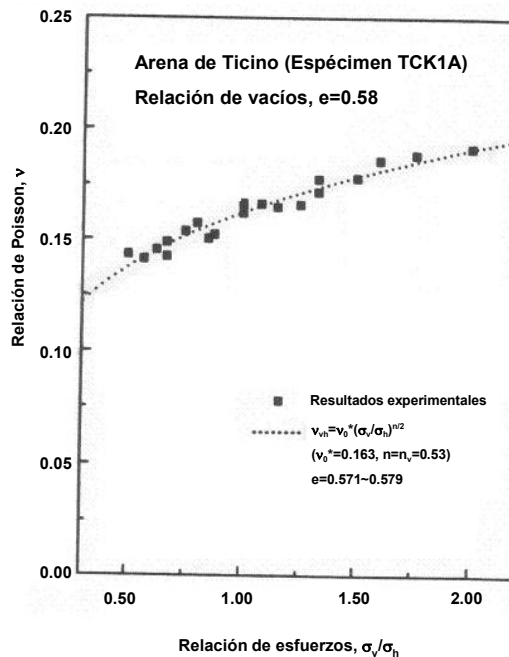


Figura 1.12 Variación de la relación de Poisson con  $\sigma_v/\sigma_h$  (Hoque *et al.*, 1996)

Un diagrama esquemático de la prueba cilíndrica hueca se muestra en la figura 1.13, la cual medía 20 cm de altura, radios interior y exterior de 3 y 5 cm, respectivamente. Los desplazamientos axiales y angulares fueron medidos por sensores de proximidad en la parte superior de la probeta, además de un transductor tipo *strain gage* colocado fuera de la cámara y otro tipo potenciométrico en el cabezal superior.

Se utilizó, además, para las probetas sólidas, un aparato triaxial estático convencional, donde se podían aplicar esfuerzos de contrapresión y confinamiento, además del esfuerzo desviador. El espécimen que se utilizó fue de 15 cm de altura por 7.5 cm de diámetro. El aparato estaba totalmente automatizado y era controlado por una computadora personal, la carga axial se medía con una celda de carga sumergible colocada en la parte superior de la probeta. El desplazamiento axial se midió localmente encima de la parte central del espécimen por un par de transductores locales de desplazamiento (LDT) y un par de LVDT's montados en lados diametralmente opuestos. El sistema correspondiente a este equipo se muestra en la figura 1.14.

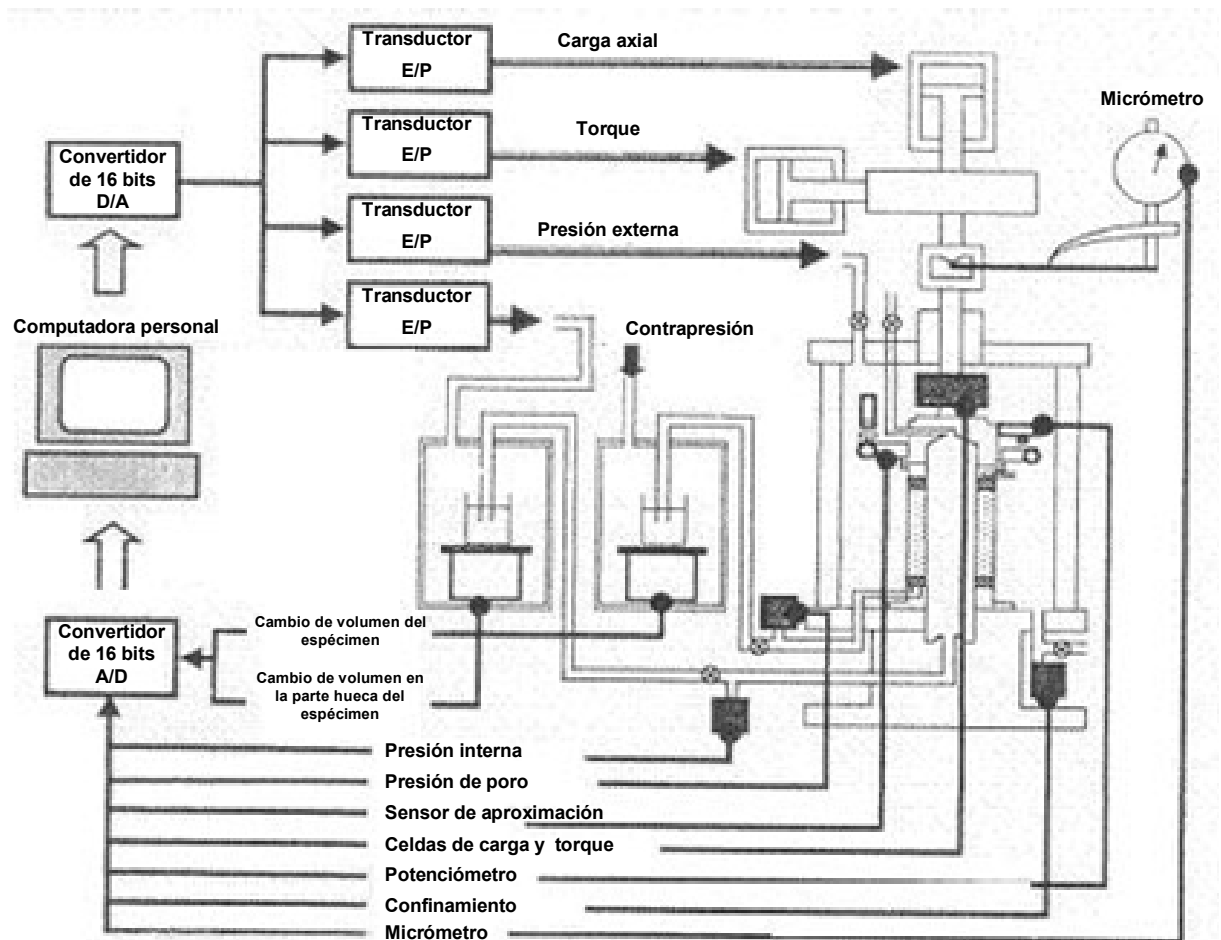


Figura 1.13 Esquema general del equipo para ensayar probetas huecas (Chaudhary *et al.*, 2003)

Para medir la velocidad de onda de cortante en el plano vertical y horizontal de la probeta se instalaron un par de elementos laminares en dirección vertical y otro par en dirección horizontal, tal como se ilustra en la figura 1.15.

Se utilizó arena de Toyoura, material uniforme con partículas subangulosas, principalmente de material de cuarzo, muy utilizadas en Japón para fines de investigación. Las propiedades físicas principales son la siguientes:  $D_{50} = 19 \text{ mm}$ ,  $G_s = 2.645$ ,  $e_{\min} = 0.609$  y  $e_{\max} = 0.973$ .

El espécimen se formó por pluviación en aire, manteniendo la altura de caída de arena constante sobre la superficie, con lo cual se obtuvieron compacidades relativas cercanas a 80 %, se aplicó vacío regulado para quitar el molde, se circuló agua y se procedió a saturar las probetas por contrapresión.

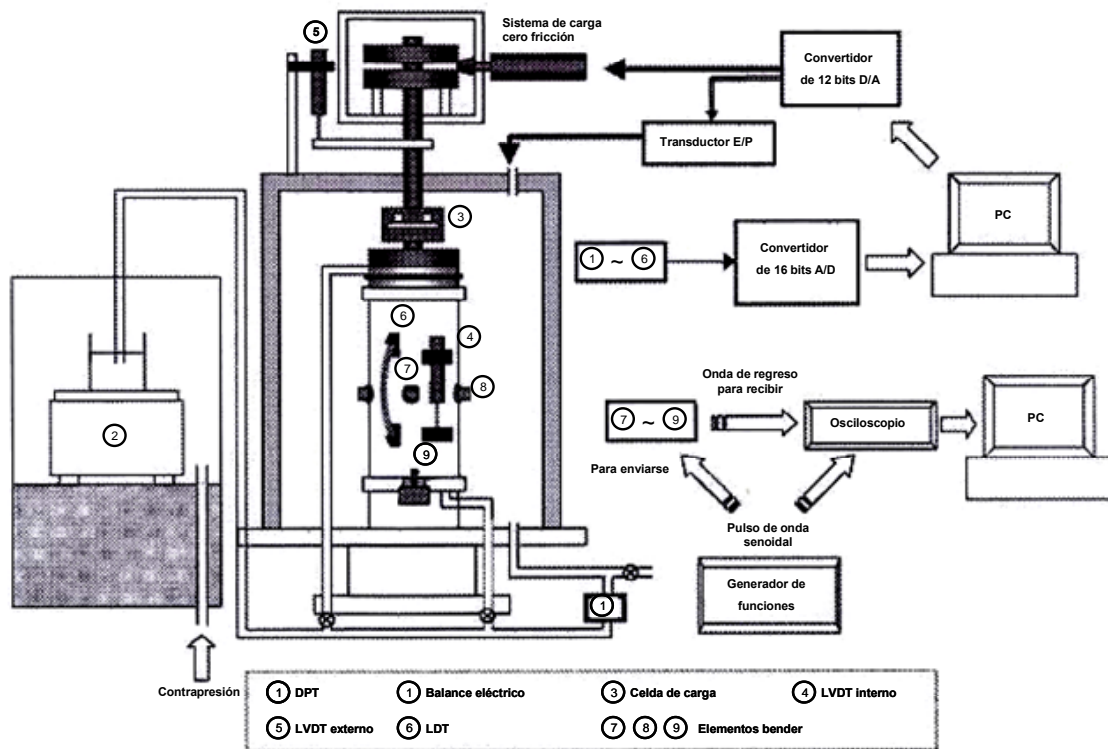


Figura 1.14 Esquema general del equipo para ensayar probetas sólidas (Chaudhary *et al.*, 2003)

En el trabajo se reportan ocho pruebas ejecutadas en cada equipo, para las mismas condiciones de esfuerzos. Las primeras dos pruebas se realizaron con consolidación isotrópica y otras dos en condiciones anisotrópicas con un valor de  $K=\sigma_h'/\sigma_v' = 0.50$  de consolidación. Las otras cuatro fueron triaxiales, dos a compresión y las otras dos a extensión, consolidadas isotrópicamente a 98.1 kPa.

Las relaciones de Poisson obtenidas durante la consolidación se muestran en la figura 1.16a. Los valores para ambos aparatos, cilindro hueco y cámara triaxial son similares y varían, en cada caso, entre 0.10 y 0.30, con una dispersión aproximadamente igual en ambos equipos. La deformación unitaria a la que se sometió a la probeta en la determinación de la relación de Poisson fue pequeña, del orden de 0.005%.

La relación de Poisson medida durante la compresión y extensión triaxial se muestra en la figura 1.16b, donde  $\tau_{m\acute{a}x}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$  representa al esfuerzo cortante máximo, mientras que  $\tau_{m\acute{a}x_f}$  es el esfuerzo cortante a la falla. Los valores de relación de Poisson oscilan entre 0.10 y 0.30, independiente de la forma de aplicar el esfuerzo cortante. Se puede apreciar que este valor no se ve afectado de manera importante por el nivel del esfuerzo cortante aplicado.

Se puede ver que tanto en muestras cilíndricas huecas como en muestras sólidas que la relación de Poisson experimental tanto en la etapa de consolidación isotrópica como en la etapa de ensaye, hasta llegar a la falla, oscila entre 0.10 y 0.30, además que este parámetro se mantiene casi constante en cualquier nivel de degradación de la muestra, para una condición de esfuerzo efectivo constante. También se observa que en la etapa de consolidación resulta indistinto si se hace en condiciones isotrópica o anisotrópica, conforme aumenta el valor de  $p'$  la relación de Poisson muestra variaciones poco importantes.

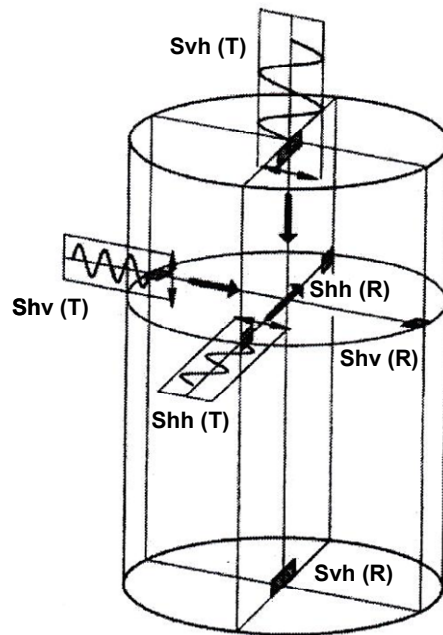


Figura 1.15 Posiciones y direcciones en las que se registraron las velocidades de onda de corte (Chaudhary *et al.*, 2003)

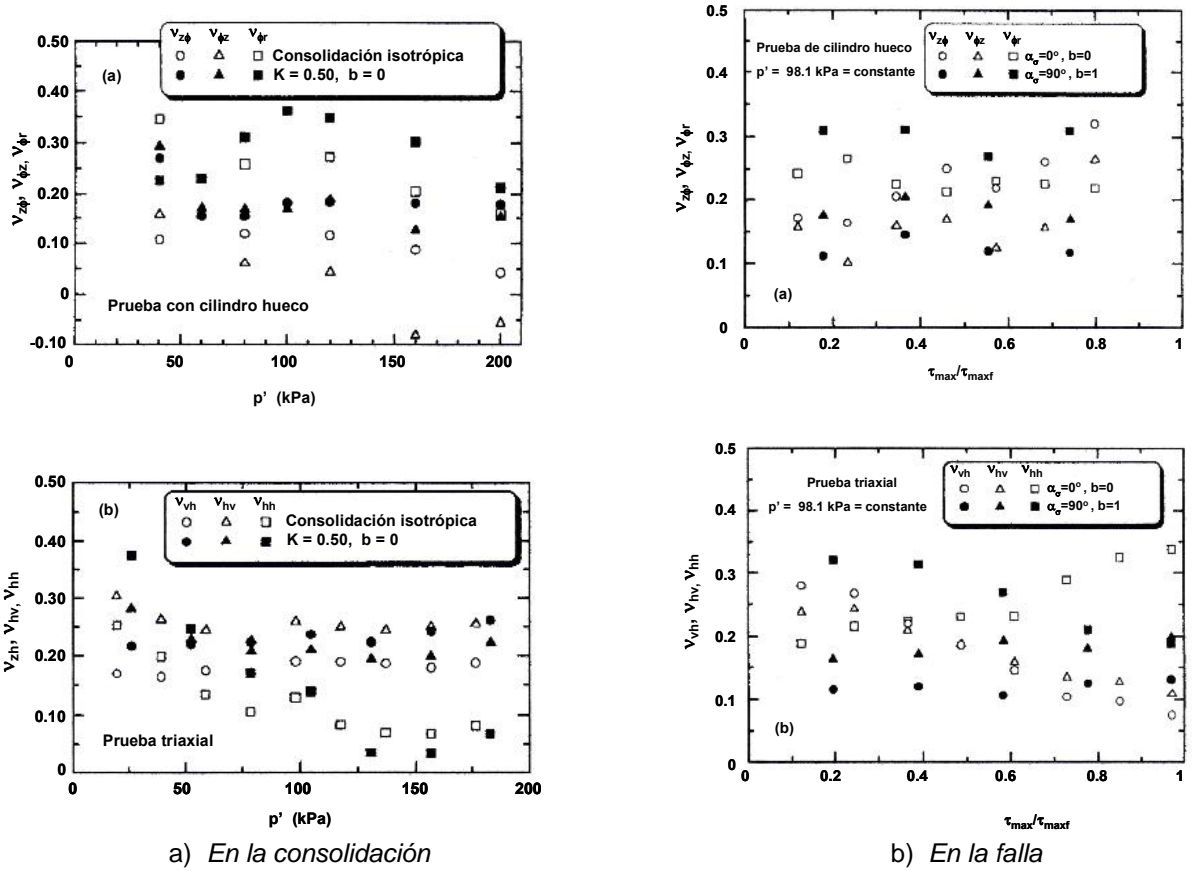


Figura 1.16 Relación de Poisson para las muestras huecas y sólidas durante la consolidación y en la etapa de ensaye, en un plano  $p'$  constante (Chaudhary *et al.*, 2003)

Con el propósito de evaluar la resistencia a la licuación de una arena parcialmente saturada, Tsukamoto, *et al.* (2002) acondicionaron una cámara triaxial cíclica en la que se pueden llevar a cabo pruebas triaxiales en condiciones de consolidación isotrópica y al mismo tiempo medir las velocidades de onda de compresión y de cortante, cuyo esquema se muestra en la figura 1.17. Estos investigadores llevaron a cabo una serie de ensayos donde se midió la variación de las velocidades de onda de compresión,  $P$ , con la variación del grado de saturación y el efecto de éste en la resistencia a la licuación, para lo cual ejecutaron ensayos triaxiales cíclicos inmediatamente después de realizar la medición de la velocidad de onda. Los resultados de las velocidades de onda  $P$  ( $V_p$ ) y de corte  $S$  ( $V_s$ ), indicaron que  $V_p$  tienden a incrementarse de 500 a 1800 m/s, aproximadamente, cuando el valor de  $B$  de Skempton se incrementa de 0 a 0.95, respectivamente, para un grado de saturación final entre 90 y 100%. Esto indica que el valor de  $V_p$  se puede expresar en función de dos variables principales, el valor de  $B$  y la relación de Poisson del esqueleto de suelo, el cual es definido por las pequeñas deformaciones registradas en la masa de suelo. De acuerdo con estos investigadores, la ventaja de usar las velocidades de onda  $P$  como vinculación para identificar el grado de saturación y por ende la resistencia a la licuación puede ser resumida como sigue:

*La velocidad de onda  $P$  puede ser medida tanto en depósitos naturales de suelo como en probetas reconstituidas en laboratorio, mientras que otros parámetros como el valor de  $B$  y el grado de saturación no pueden ser monitoreados en sitio. Entonces, las velocidades de onda de compresión  $P$  pueden ser usadas como un parámetro para identificar condiciones de muestras en laboratorio y las condiciones de depósitos de suelo en sitio, en relación con el grado de saturación.*

La velocidad de onda  $P$  medida en sitio se considera que posee un mismo nivel de credibilidad que la monitoreada en el laboratorio, y entonces ésta puede ser usada para identificar el valor de  $B$  en sitio, como el que se usa en probetas de suelo en laboratorio.

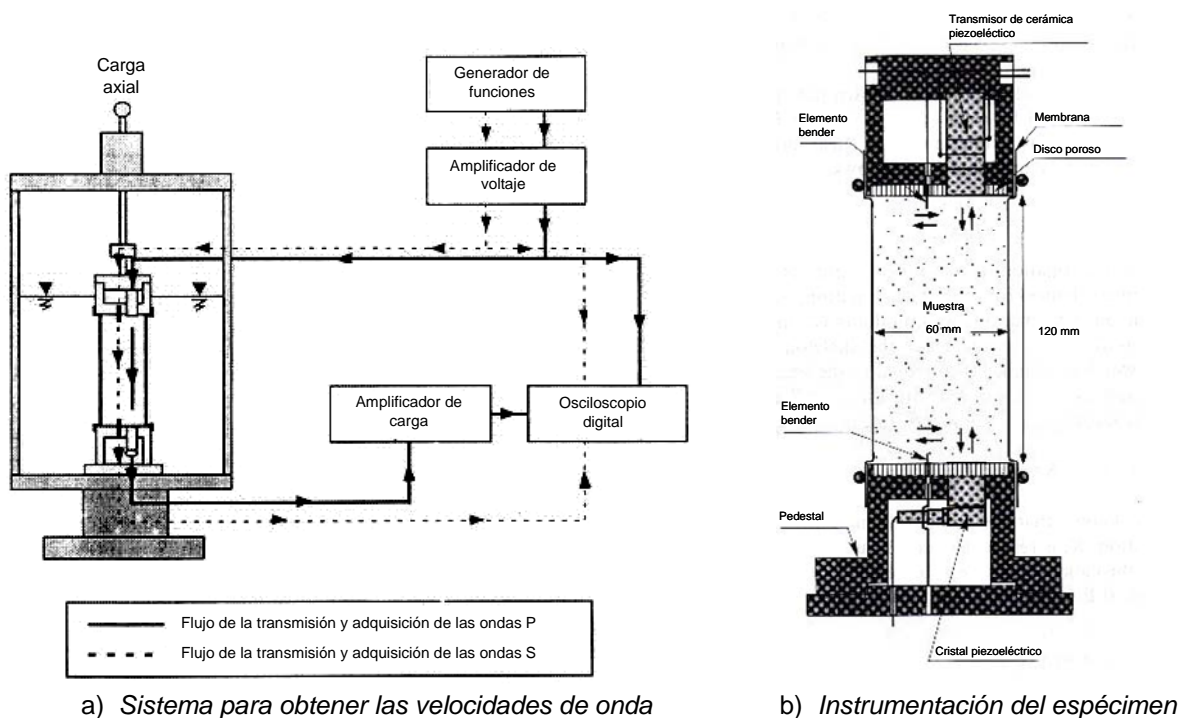


Figura 1.17 Cámara triaxial cíclica acondicionada para medir velocidades de ondas  $P$  y  $S$  (Tsukamoto *et al.*, 2002)

Con base en la concepción anterior, realizaron una serie de ensayos en laboratorio con probetas reconstituidas de arena con diferentes grados de saturación.

Se montaron probetas de 6 cm de diámetro por 12 cm de altura. Los cabezales superior e inferior se equiparon con un disco poroso y en éste se colocaron los sensores emisores y receptores de ondas de cortante y compresión, utilizando elementos laminares y cristales piezoeléctricos, respectivamente.

Los transductores que generan el pulso de las ondas P son de cerámica piezoeléctrica de 1.5 cm de diámetro por 4.2 cm de altura, mientras que los receptores son acelerómetros piezoeléctricos de 1.75 cm de diámetro por 0.98 cm de altura. Estos elementos están fijos a los cabezales y en contacto directo con la probeta. Se colocaron además un par de elementos laminares, uno como emisor y otro como receptor, para medir la velocidad de ondas de cortante del espécimen.

Para los ensayos se utilizaron muestras de arena de Toyoura, cuyas características se mencionan en párrafos anteriores. El método de formación fue por pluviación en aire, lo que permitió obtener probetas con compacidades relativas entre 30 y 70%. El suelo se consolidó isotrópicamente a un esfuerzo efectivo de 98 kPa y se midió la B de Skempton, considerando que este valor se incrementa conforme aumenta la contrapresión.

A partir de las mediciones de las velocidades de onda de compresión,  $V_p$ , y de cortante,  $V_s$ , se calculó la relación de Poisson, haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$$

De los resultados experimentales que arrojó la investigación, mostrados en la figura 1.18, se puede ver que cuando el material está seco, la relación de Poisson oscila entre 0.22 y 0.44, para todas las densidades estudiadas, pero conforme aumenta el valor de la B de Skempton la banda de variación se va cerrando, hasta llegar al valor de 0.50, cuando  $B=0.95$ .

De acuerdo con los resultados experimentales, los autores propusieron la siguiente expresión para determinar la relación de velocidades en función de la relación de Poisson y del valor de B.

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{2(1-\nu)}{3(1-2\nu)(1+B)}$$

Al ver los resultados experimentales se puede concluir que para grados de saturación bajos es difícil definir un valor único de relación de Poisson, lo que se obtiene es una banda de valores de la cual, con criterio, se puede seleccionar el valor a utilizar.

Otro estudio donde se consideró la influencia del grado de saturación en la determinación de la relación de Poisson fue el desarrollado por Gokhan Inci *et al.* (2001). Este estudio se enfocó a la determinación de las propiedades dinámicas de suelos arcillosos compactados, sujetos a vibraciones pequeñas, utilizando pulsos ultrasónicos. Se analizó el efecto del tipo de suelo, las condiciones de compactación y el grado de saturación en la variación  $V_p$  y de  $V_s$ , el módulo de rigidez máxima ( $G_{m\acute{a}x}$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ).

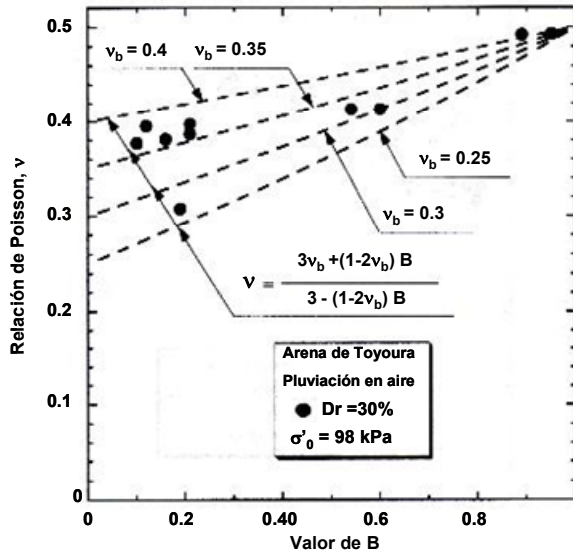
Se formaron probetas compactadas con diferente contenido de humedad, con el objetivo de obtener muestras con diferentes grados de saturación. Se ensayaron tres materiales: los suelos 1 y 2 son materiales de baja plasticidad y el suelo 3 fue una mezcla de 25 % de bentonita con el material del suelo 2, para tener un material con alta plasticidad.

Se formaron probetas cúbicas y cilíndricas compactadas, utilizando las energías Proctor estándar y Proctor modificado. Las muestras cúbicas tenían dimensiones aproximadas de 11 cm, labradas de muestras cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, mientras que las muestras cilíndricas tenían dimensiones aproximadas de 10 cm de diámetro por 11 cm de altura. Se prepararon un total de 18 muestras cúbicas y 6 cilíndricas.

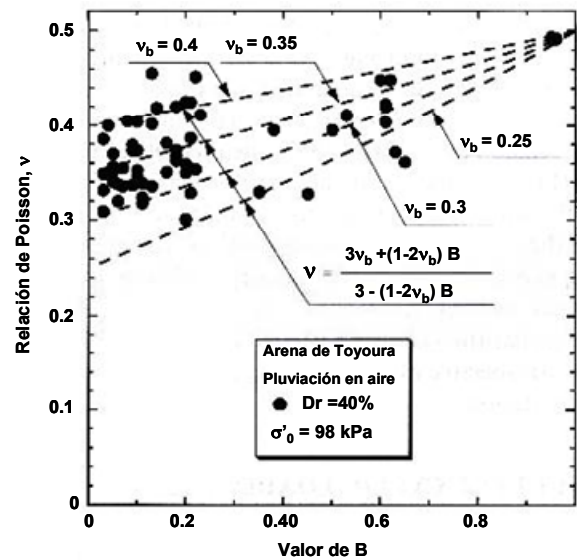
Para medir la velocidad se utilizaron sensores de tipo piezoeléctrico, los cuales fueron colocados en los extremos de las probetas, en un lado el emisor y en el otro el receptor.



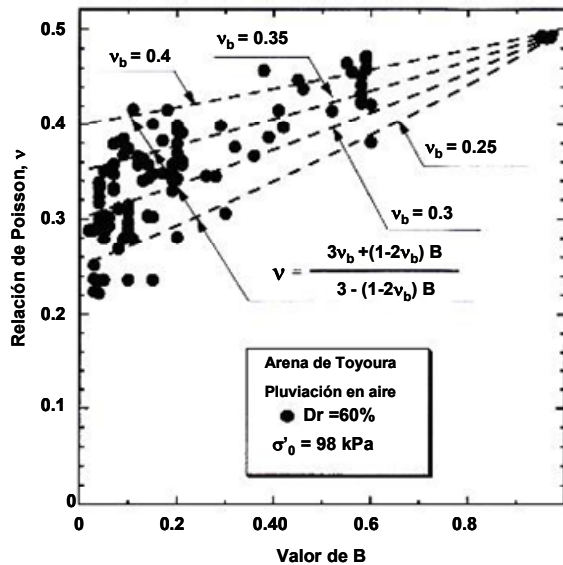
Para validar los resultados obtenidos con la instrumentación utilizada se efectuaron ensayos en arena de Ottawa, en probetas de 15 cm de longitud alojadas en tubo Shelby, cuyas características volumétricas y de esfuerzo eran conocidas. Los resultados obtenidos se compararon con las velocidades obtenidas por Lambe y Whitman (1969), con la conclusión de que los resultados obtenidos fueron comparables con los publicados por estos autores.



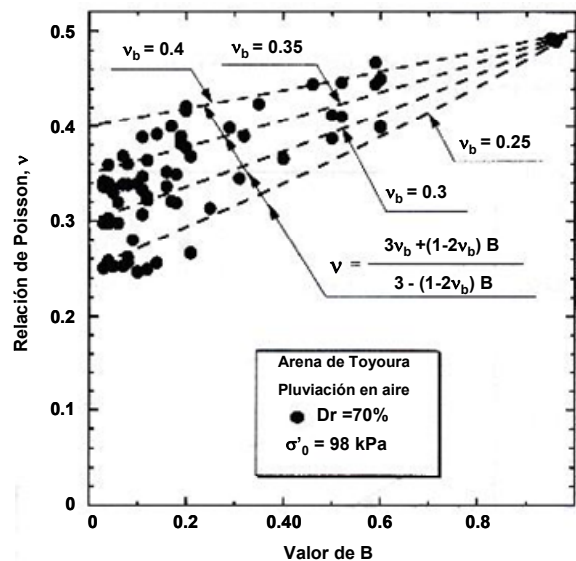
a) Compacidad relativa de 30 %



b) Compacidad relativa de 40 %



c) Compacidad relativa de 60 %



d) Compacidad relativa de 70 %

Figura 1.18 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y la B de Skempton (Tsukamoto *et al.*, 2002)

La variación de las velocidades de onda puede estar afectada por varios factores, incluidos dentro de dos grupos: de composición y ambientales. Los de composición incluyen la mineralogía de la arcilla y el contenido de finos, mientras que los ambientales consideran las condiciones y características de la compactación, el grado de saturación y el esfuerzo efectivo en la muestra. Las velocidades de onda se

incrementan conforme aumenta la energía de compactación y decrecen con el aumento de la plasticidad de los finos.

Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la figura 1.19, donde se observa que para los tres materiales estudiados la variación de la relación de Poisson con el grado de saturación se muestra en forma de abanico, para los materiales menos saturados oscila entre 0.05 y 0.30 y conforme se satura la muestra, disminuye un poco la dispersión hasta llegar a una variación entre 0.35 y 0.50 cerca de la saturación total. Estos resultados muestran una tendencia clara de aumento de la relación de Poisson con el grado de saturación pero con una gran dispersión de los resultados.

En el intervalo de grados de saturación desde 20 a 90% se tiene el correspondiente al peso volumétrico seco máximo, frontera entre la rama húmeda y la seca. En este caso, la relación de Poisson no parece estar afectada por la relación de vacíos o el peso volumétrico seco ya que al pasar por el grado de saturación correspondiente al óptimo, la tendencia que siguen los resultados experimentales es la misma que trae de la rama seca. Al llegar al grado de saturación máximo obtenido en la rama húmeda, los valores de relación de Poisson, aunque son los más altos, están entre 0.40 y 0.50. Los resultados mostrados implican que no es posible definir un valor único de relación de Poisson para un determinado valor de grado de saturación, sino que se debe tomar un intervalo de variación de éste.

Los resultados de este estudio indican que la relación de Poisson depende fuertemente del grado de saturación y menos de la plasticidad de los finos. La relación de Poisson se incrementa con el aumento de la saturación. La variación en la relación de Poisson es ligeramente mayor para el Suelo 1, comparado con los suelos 2 y 3. Gazetas (1991) indica que la relación de Poisson depende fuertemente del grado de saturación y es ligeramente afectada por el tipo de suelo, la presión de confinamiento, y la relación de vacíos. Para los suelos saturados, idealmente incompresibles, le corresponde un valor límite de la relación de Poisson de 0.50.

Dvorkin y Nur en 1996, con el objetivo de analizar la influencia de la porosidad en la variación de las velocidades de compresión y cortante, ensayaron dos tipos de arenisca del Mar del Norte. El primer material es de la zona de Oseberg (Strandenes, 1991) el cual tiene una alta anisotropía intrínseca con porosidades entre 0.13 y 0.32. Este material está formado principalmente de arenas de cuarzo.

El segundo material es una arena no consolidada de la zona de Troll, con porosidades entre 0.22 y 0.38 (Blangy *et al.*, 1993), con cementante prácticamente ausente. En la figura 1.20 se muestran los resultados experimentales de las velocidades de ondas S y P, para probetas sometidas a esfuerzos de confinamiento de 5, 10 y 30 MPa, con el material seco y saturado. Como se puede ver y como es de esperarse, las  $V_s$  no varían al saturar el material, mientras que las  $V_p$  sí se incrementan con la saturación de la muestra.

En la figura 1.21 se muestran los valores de la relación de Poisson para los mismos niveles de esfuerzo, en condiciones saturadas y secas. Se puede ver que la relación de Poisson, como lo demuestran otros estudios, es más alta para las muestras saturadas. Tanto para las muestras saturadas como secas, al incrementarse la porosidad en el intervalo experimental de ensaye de 0.20 a 0.40, aumenta la relación de Poisson, debido a que el material se encuentra en una condición más suelta.

En el caso de las muestras saturadas, la relación de Poisson varía en función del esfuerzo efectivo, de la siguiente forma: para un esfuerzo de 5 MPa, entre 0.30 y 0.40; para 15 MPa, entre 0.28 y 0.35; y para 30 MPa, entre 0.27 y 0.33. De acuerdo con estos resultados, al aumentar el esfuerzo efectivo de confinamiento disminuye la relación de Poisson. Mientras que para las muestras secas, conforme se incrementa el esfuerzo de confinamiento la relación de Poisson también aumenta.

En el caso de los suelos secos, la relación de Poisson oscila entre 0 y 0.10, para el esfuerzo de 5 MPa; entre 0.05 y 0.18, para 15 MPa; y entre 0.10 y 0.22 para el confinamiento de 30 MPa, lo cual muestra un pequeño incremento de la relación de Poisson con el incremento del confinamiento.

Sin embargo, en un trabajo realizado por Salem en el año 2000 en el cual llevó a cabo mediciones de refracción sísmica en materiales principalmente arenosos, registró las velocidades de ondas P y S, para lo cual utilizó un sistema de 24 geófonos instalados en línea, con una separación de 2 m, lo cual permitió determinar la relación de Poisson y cuyos resultados se muestran en la figura 1.22. Se encontró que este

parámetro tiene una relación lineal con la porosidad, conforme aumenta la porosidad, disminuye la relación de Poisson. La relación de Poisson positiva corresponde a materiales superficiales y materiales subyacentes, tales como limos y arcillas y los valores negativos indican suelos preconsolidados, con una fuerte anisotropía.

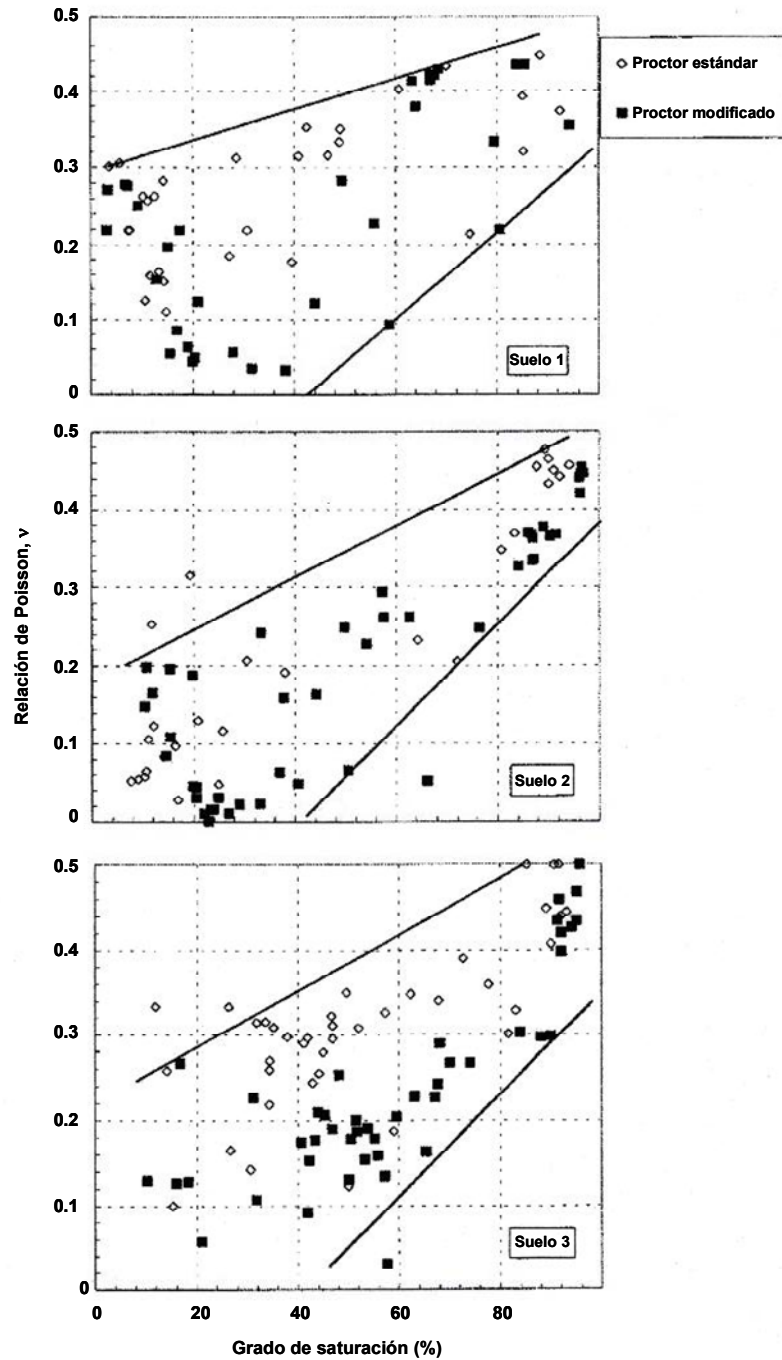


Figura 1.19 Variación de la relación de Poisson con el grado de saturación (Gokhan *et al.*, 2001)

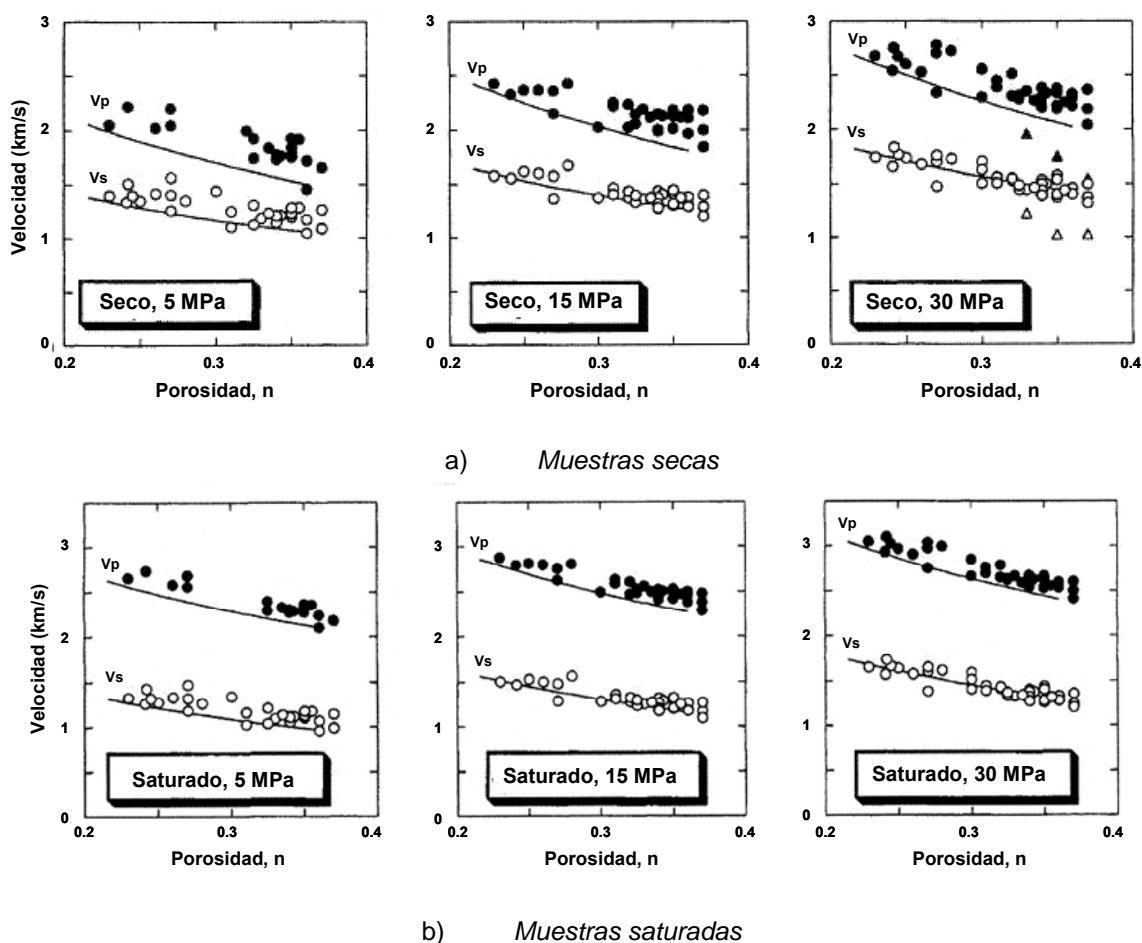


Figura 1.20 Velocidades en muestras secas y saturadas en suelo de Troll. Los símbolos llenos corresponden a las velocidades de onda P y los vacíos a las S. Los triángulos corresponden a resultados con arena de Ottawa obtenidos por Han (1986), Yin (1993) y Domenico (1984). (Dvorkin y Nur, 1996)

Los valores de relación de Poisson disminuyen con la profundidad, lo cual se puede atribuir a que en la superficie se encuentran los materiales más jóvenes y compresibles, pero que pueden llegar a ser menos compresibles y más plásticos con la profundidad (mayor módulo volumétrico, menor compresibilidad y menor relación de Poisson).

Fawaz *et al.*, en el 2002 realizaron ensayos en arena cárstica fina. Ejecutaron una serie de pruebas en la cámara triaxial utilizando este material en condiciones densas para determinar el ángulo de fricción, el módulo de elasticidad tangente y la relación de Poisson. La intención de estudiar este material fue la de utilizarlo posteriormente para formar un modelo de 57.5 cm de diámetro por 89.2 cm de altura, para hacer pruebas con el presiómetro.

Llevaron a cabo una serie de ensayos triaxiales para conocer la variación de los parámetros mecánicos con el incremento del esfuerzo de confinamiento. Estas pruebas se hicieron en probetas de suelo granular de 10 cm de diámetro por 21 cm de altura, con un peso volumétrico entre 15 y 16 kN/m<sup>3</sup> (una porosidad cercana a 83%) mientras que la presión de confinamiento se varió entre 10 y 400 kPa. Estos autores no mencionan la metodología e instrumentación utilizada para determinar la relación de vacíos.

De acuerdo con los resultados que reportan, se observa que conforme se incrementa la presión de confinamiento en el intervalo descrito, el ángulo de fricción decrece de 41 a 37 grados, mientras el módulo

de elasticidad inicial se incrementa de 10 a 250 MPa. Respecto a la relación de Poisson, ésta decrece de 0.45 a 0.22, tal como se ilustra en la figura 1.23.

En un trabajo presentado por Talesnick en el año 2000 se muestra la metodología para determinar cinco parámetros mecánicos para describir el comportamiento elástico de una arenisca. Se utilizó una muestra cilíndrica de roca, la cual se sometió a diferentes condiciones de esfuerzo. Para cada condición de esfuerzo se determinaron los diferentes parámetros.

La roca estaba compuesta por material granular fino con partículas menores a 0.1 mm de diámetro, con un peso volumétrico cercano a 24.1 kN/m<sup>3</sup> y una porosidad media de 10%.

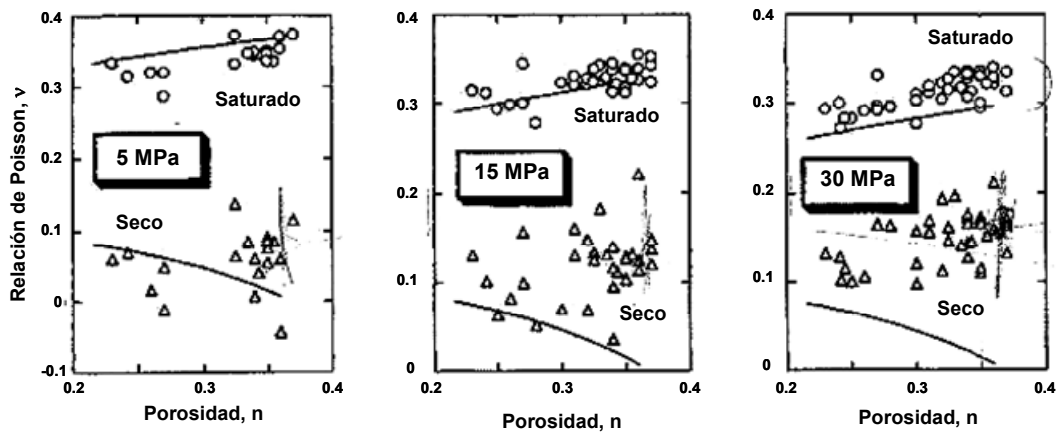


Figura 1.21 Relaciones de Poisson para muestras secas y saturadas de la arena de Troll (Dvorkin y Nur, 1996)

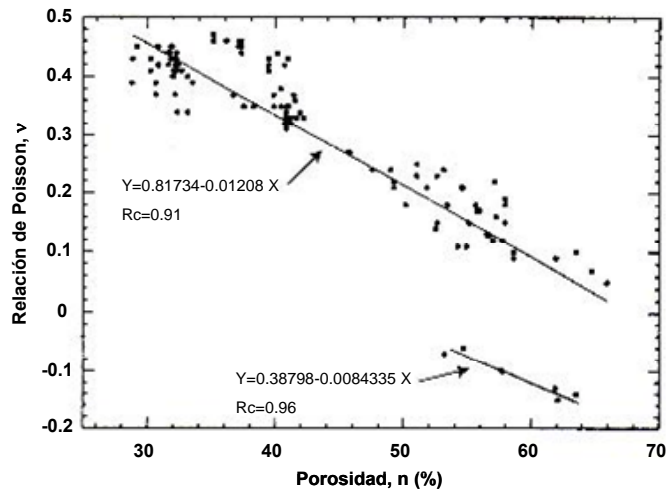


Figura 1.22 Variación de la relaciones de Poisson con la porosidad, obtenidas con refracción sísmica (Salem, 2000)

Se labraron tres muestras cilíndricas huecas a partir de bloques cúbicos de 15 cm, considerando que la parte longitudinal de la muestra fuera normal a la estratificación. Se prepararon además muestras de arena-concreto, con arena fina de una duna israelí, de la cual el 100% pasaba la malla 60 (0.25 mm), con proporciones de agua-cemento de 0.83 y arena-cemento de 2.20. Este bloque se curó en agua durante 28 días y después se labraron las tres muestras cilíndricas.

Las probetas se sometieron a presión axial, presión radial externa e interna y posteriormente a torsión en la parte superior de la probeta. Se instaló una serie de *strain gages* para registrar los desplazamientos en la periferia de la muestra, con la distribución mostrada en la figura 1.24.

Se determinó el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ) para tres especímenes (A\*, B\* y C\*) a los cuales se les aplicó un esfuerzo desviador axial incremental. Los resultados se muestran en la figura 1.25. Para el intervalo de esfuerzo desviador aplicado tanto el módulo de rigidez como la relación de Poisson se mantienen casi constantes. El módulo de elasticidad promedio está en el orden de 21,000 MPa y la relación de Poisson en 0.20.

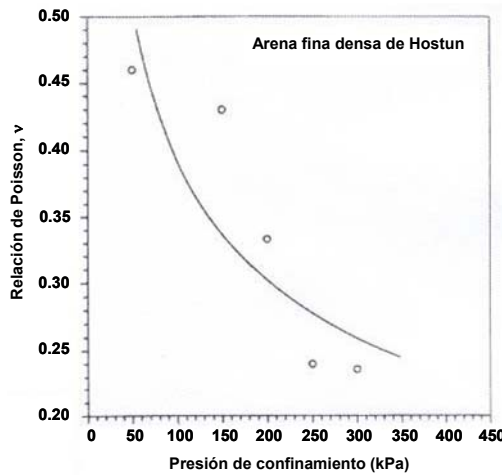


Figura 1.23 Variación de la relación de Poisson con la presión de confinamiento (Fawaz *et al.*, 2002)

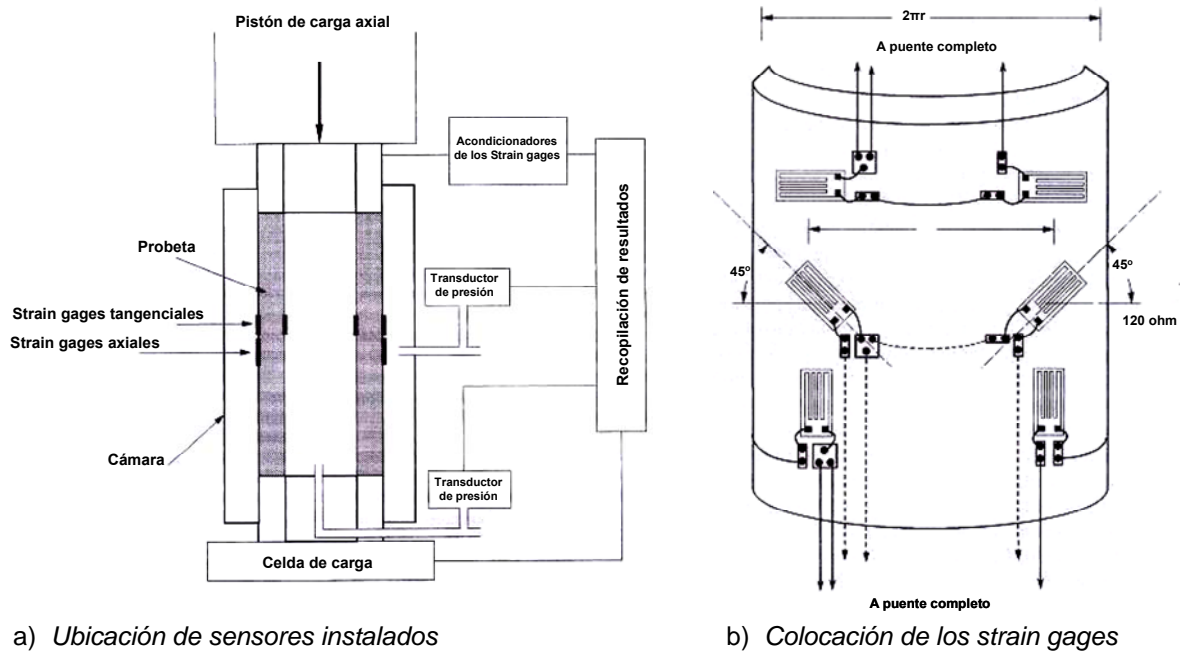


Figura 1.24 Variación de la relación de Poisson con la presión de confinamiento (Talesnick *et al.*, 2000)

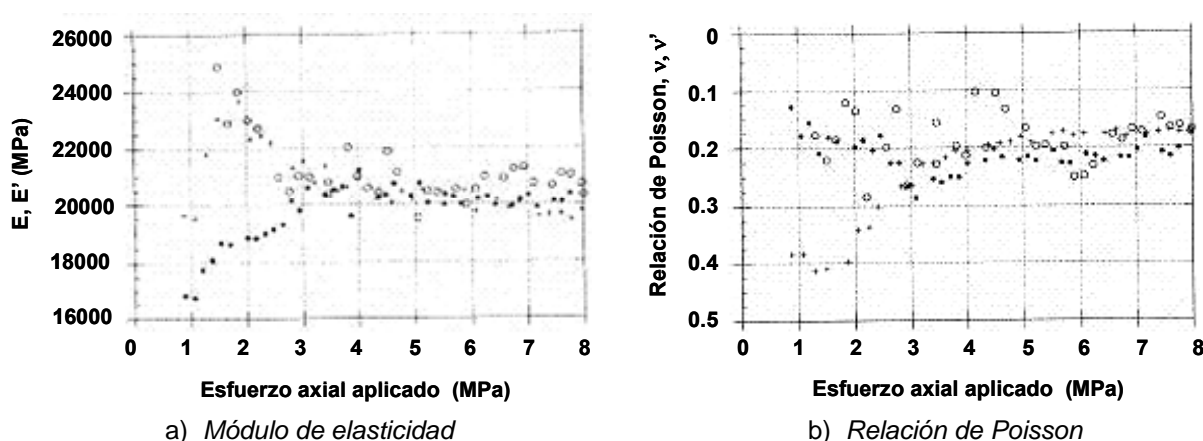


Figura 1.25 Variación de la relación de Poisson y del módulo de elasticidad con la presión de confinamiento (Talesnick *et al.*, 2000)

Dong *et al.* (1994) realizaron ensayos de compresión triaxial y triaxial cíclica en los que se determinó la degradación del módulo de rigidez, la variación del amortiguamiento y la relación de Poisson con la distorsión angular.

Ensayaron dos gravas mal graduadas, muy uniformes, denominadas como Kaku, la primera, con granos angulosos; y Hime, la segunda, con granos subredondeados. Además se utilizaron otras dos gravas con distribución granulométrica muy parecida entre sí, ambas bien graduadas y con granos angulosos, denominadas como Osaka y Nagoya. Las probetas de 30 cm de diámetro por 60 cm de altura se formaron en seis capas, usando un vibrador pequeño, aplicado durante cinco minutos por capa, con el fin de llevar al material a su máxima densidad. Se colocó papel filtro en los extremos superior e inferior de los especímenes y se cubrió la muestra con una membrana de 2 mm de espesor.

La cámara triaxial utilizada cuenta con una celda de carga sumergible colocada sobre el cabezal superior, a la cual se une el pistón. El desplazamiento se mide con un sensor colocado al exterior de la cámara; dos de proximidad en el cabezal superior; y dos LDT's sujetos en la parte lateral del espécimen. La deformación radial se mide utilizando tres sensores tipo clip.

En el trabajo se reportan nueve ensayos, cuatro con carga monotónica (ML) y los cinco restantes con carga cíclica (CL). Los ensayos monotónicos se consolidaron a 78.5 kPa y se llevaron a la falla a una velocidad de deformación axial de 0.06 %/min. La distorsión angular,  $\gamma$ , y el esfuerzo cortante,  $\tau$ , se obtuvieron como  $\varepsilon_a - \varepsilon_r$  y  $(\sigma_a - \sigma_r)/2$ , respectivamente. El módulo de rigidez secante,  $G_{sec}$ , se obtuvo de la curva  $\tau$  vs  $\gamma$  y la relación de Poisson secante,  $\nu_{sec}$ , de la curva  $\varepsilon_r$  vs  $\varepsilon_a$ .

En los ensayos cíclicos se aplicaron diez ciclos con esfuerzos desviadores cíclicos de forma periódica senoidal, con frecuencia de excitación de 0.1 Hz. Se calculó para el ciclo cinco el módulo de rigidez,  $G_{eq}$ , la relación de Poisson,  $\nu_{eq}$ , de las curvas  $\tau$  vs  $\gamma$  y  $\varepsilon_a$  vs  $\varepsilon_r$ , respectivamente.

Uno de los objetivos de esta investigación fue comparar los módulos de rigidez, distorsión angular y relación de Poisson obtenidos en ensayos monotónicos (ML) con los que determinan en una prueba triaxial cíclica (CL).

Respecto a la variación de la relación de Poisson encontraron que para deformaciones angulares entre 0.005 y 0.1% ésta permanece prácticamente constante y a partir de ahí, para la prueba cíclica se incrementa hasta llegar a valores mayores de 0.50, cerca de la falla.

De acuerdo a los autores, valores mínimos de  $\nu$  oscilaron entre 0.20 y 0.30, similar a los que muestran otras arenas. No encontraron relación entre la angulosidad de las partículas y la distribución granulométrica en la variación de la relación de Poisson.

Usando una muestra de grava de Kaku densa, se ensayó bajo condiciones consolidadas drenadas (CD) a diferentes números de ciclos de excitación. En la figura 1.27 se pueden ver los resultados que reportan los ensayos, en los que se aprecia que conforme aumenta el número de ciclos de excitación, el módulo de rigidez disminuye y la relación de Poisson se incrementa de manera poco significativa, en ambos casos. Respecto a la influencia de la distorsión angular, mientras que  $G$  se degrada conforme se incrementa  $\gamma$ ,  $\nu$  permanece prácticamente constante.

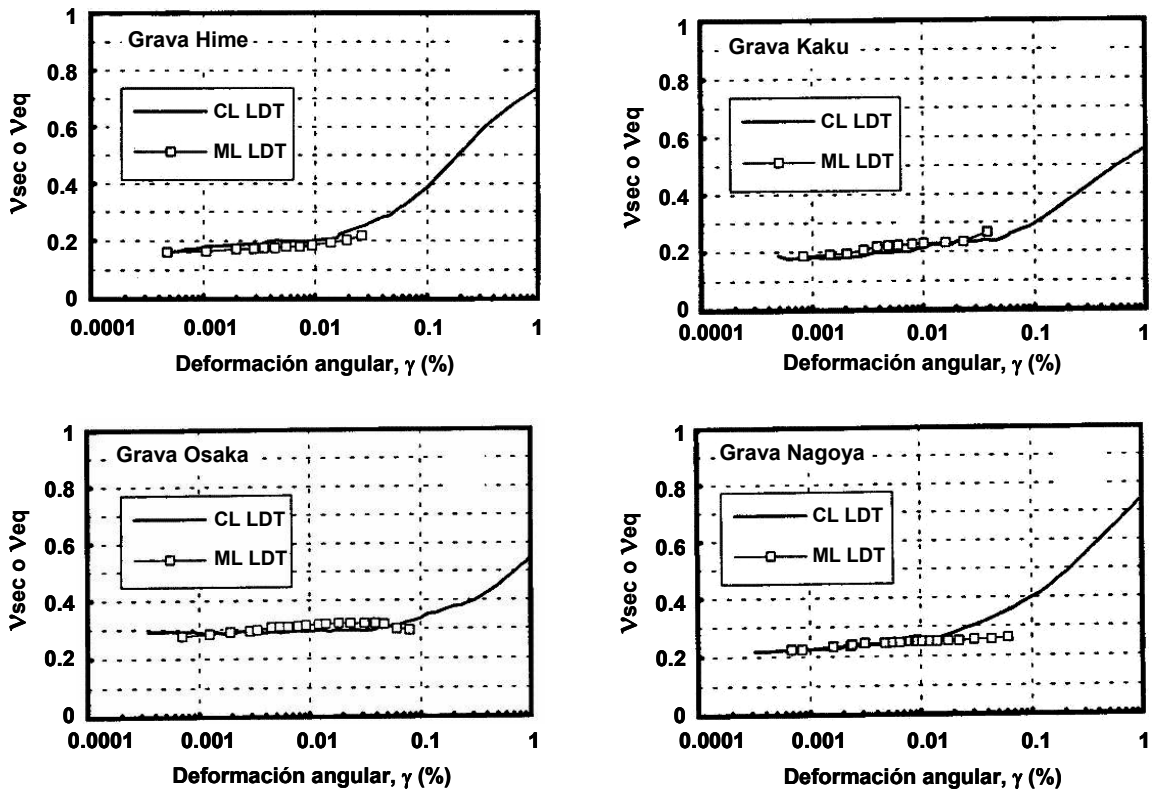


Figura 1.26 Variación de la relación de Poisson obtenida en pruebas triaxiales monotónicas -ML- y cíclicas -CL- (Dong *et al.*, 1994)

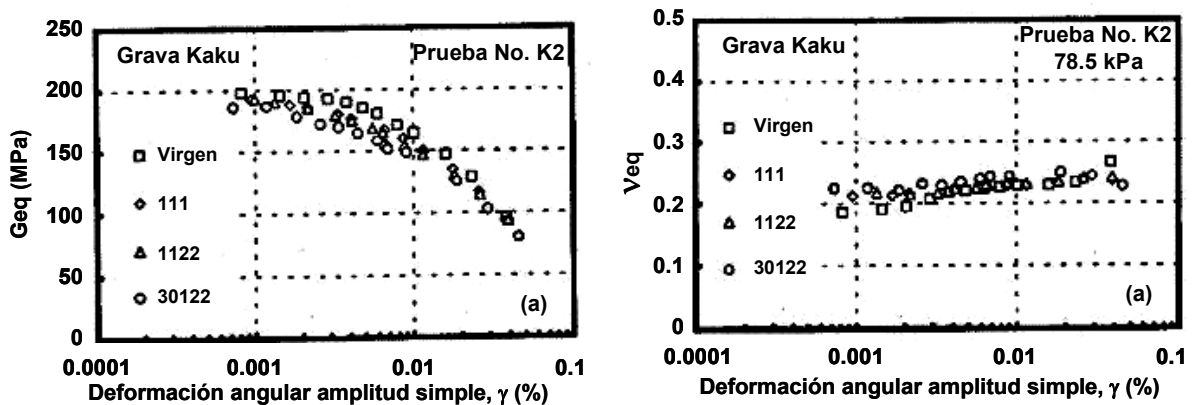


Figura 1.27 Variación del módulo de rigidez y la relación de Poisson obtenidos en pruebas triaxiales cíclicas (Dong *et al.*, 1994)



Yasuda *et al.* (1994) ensayaron probetas de grava para determinar el módulo de rigidez al cortante dinámico y la relación de Poisson en muestras inalteradas y reconstituidas de grava. El material ensayado correspondió a dos estratos diferentes de grava de lecho de río.

Se extrajeron muestras congeladas con nitrógeno, de 33 cm de diámetro por 55 cm de longitud, de dos estratos: el primero, el estrato superior, corresponde a un material del Holoceno; y el segundo, del estrato inferior, pertenece al Pleistoceno. El tamaño máximo de granos del material inalterado estuvo entre 17 y 33 mm. Todas las muestras inalteradas tuvieron aproximadamente la misma distribución granulométrica, independientemente de la diferencia de era geológica a la que pertenecían.

Se formaron muestras reconstituidas utilizando el material que se ensayó mecánicamente en condiciones inalteradas. La granulometría que se utilizó para formar estas probetas se obtuvo como el promedio de las muestras inalteradas ensayadas, con tamaño máximo de partícula de 65 mm. Las densidades relativas de las muestras que se reconstituyeron fueron el valor promedio tanto del estrato superior como del inferior.

Las dimensiones de las muestras inalteradas fueron de 30 cm de diámetro por 55 cm de altura, mientras que las reconstituidas fueron de 30 por 60 cm. Estas últimas se formaron en seis capas y se utilizó un martillo vibratorio para densificar el material. En ambos tipos de material, las probetas se montaron, se les circuló bióxido de carbono para facilitar la saturación, se saturaron por contrapresión con agua desaireada, se midió la  $B$  de Skempton y si este valor era igual o mayor de 0.95, se consolidaron a esfuerzos de 0.05, 0.10, 0.29 y 0.59 MPa.

Se ejecutaron ensayos triaxiales cíclicos, a carga controlada, se aplicaron 12 ciclos con señal dinámica senoidal como excitación, a una frecuencia de 0.2 Hz. Los resultados con que se calcularon los parámetros dinámicos se obtuvieron con la medición de carga y desplazamientos registrados en el ciclo 10.

En la figura 1.28 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente en los que se puede observar que el valor de la relación de Poisson se mantiene casi constante con el incremento de la distorsión angular, excepto en la muestra inalterada del estrato superior que inicia en 0.23 para la distorsión más pequeña y concluye en 0.34 cercano a la falla del suelo. Se aprecia también que los especímenes en condiciones inalteradas muestran valores de  $\nu$  un poco mayores que los reconstituidos.

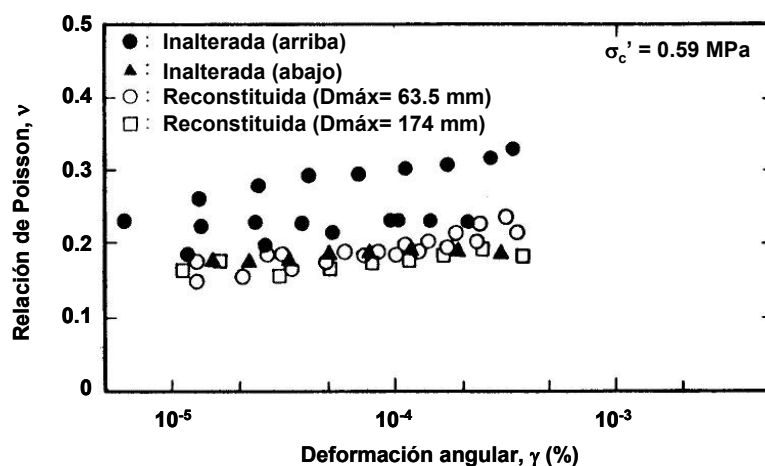


Figura 1.28 Variación de la relación de Poisson obtenida en pruebas triaxiales cíclicas en muestra inalteradas y reconstituidas de grava (Yasuda *et al.*, 1994)

Fioravante *et al.* (1994) ensayaron arena de Quiou carbonatada no cementada, en condiciones secas y saturadas. Ejecutaron ensayos de columna resonante, columna torsionante, triaxial cíclica y elementos laminares.

La arena de Quiou corresponde a un material carbonatado con una cementación muy débil generada por fragmentos de moluscos. Contiene 2% de finos, con arena de gruesa a media, con una clasificación SUCS: *SW-arena bien graduada*. Se obtuvieron sus relaciones de vacíos máxima y mínima, la primera por pluviación y la segunda con el método ASTM D4 254-83 y les correspondieron los valores de 1.281 y 0.831, respectivamente.

Los especímenes de 7 cm de diámetro por 14 cm de altura se formaron con el método de pluviación, lo cual permitió tener muestras muy uniformes. Los especímenes se consolidaron a niveles de esfuerzos de 50 a 800 kPa.

Debido a que el material es fácilmente disgregable y deleznable, se realizaron granulometrías a la muestra después de ensayarse en la cámara triaxial y se encontraron variaciones en la curva granulométrica que incrementaron el porcentaje de finos del 2 al 10%.

Los valores de relación de Poisson se obtuvieron de dos maneras: la primera, usando elementos laminares (BE) y cristales piezoeléctricos (CE); y la segunda, con mediciones locales de desplazamiento axial y radial registrados durante las pruebas triaxiales cíclicas.

Los resultados obtenidos con mediciones de desplazamiento se graficaron con respecto a la deformación angular. Éstos muestran que para las distorsiones más pequeñas, el valor de  $\nu$  varía entre 0.1 y 0.3, pero conforme aumenta el nivel de deformación angular el intervalo se reduce entre 0.08 y 0.2 (figura 1.29). Por la forma en que se presentan los resultados no se aprecia la influencia clara de la relación de vacíos.

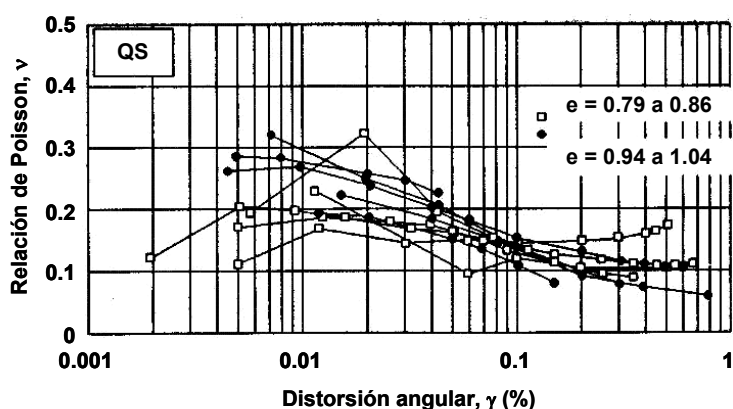


Figura 1.29 Variación de la relación de Poisson con la distorsión angular, para dos intervalos de relación de vacíos (Fioravante *et al.*, 1994)

En la figura 1.30 se presentan los resultados de las pruebas que se efectuaron con elementos laminares y cristales piezoeléctricos. Se aprecia claramente un incremento de  $\nu$  para relación de vacíos mayores; es decir, conforme se rigidiza el suelo por efecto de la disminución de vacíos en la masa de suelo, disminuye la relación de Poisson. El valor más pequeño, para la condición más densa, fue de 0.20 y aumentó a 0.40 para la condición más suelta. En este mismo gráfico también se muestran algunos puntos experimentales obtenidos durante la prueba triaxial cíclica, en los que se observa la misma tendencia, pero no se especifica a qué nivel de distorsión angular o número de ciclo corresponde.

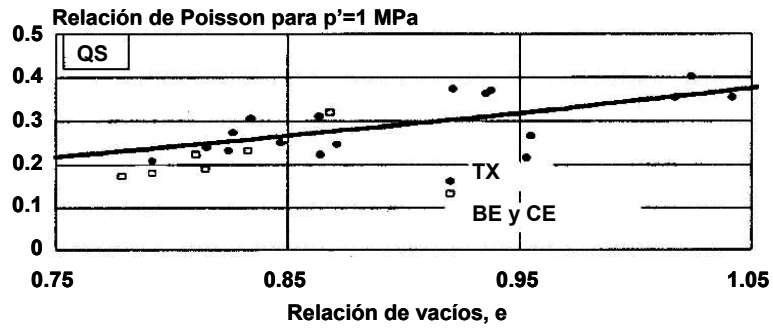


Figura 1.30 Variación de la relación de Poisson con la relación de vacíos (Fioravante *et al.*, 1994)

En 1988 Rivera ensayó dos suelos: la arena de Hostun con un  $C_u=1.82$  y de  $C_c=1.09$ , clasificada como *SP-Arena mal graduada*, con valores de  $e_{m\acute{a}x}=0.99$  y  $e_{m\acute{i}n}=0.65$ ; y la arena de Melange, con un  $C_u=5.60$  y  $C_c=1.11$ , clasificada como *SP-Arena mal graduada*, con  $e_{m\acute{a}x}=0.77$  y  $e_{m\acute{i}n}=0.36$ . Ambas arenas tienen una densidad de sólidos de 2.65.

Se formaron especímenes de 7cm de diámetro por 15 cm de altura, se ensayaron en columna resonante y en triaxial cíclica a diferentes niveles de esfuerzo, en condiciones secas y saturadas. Se aplicaron presiones en un intervalo de 25 a 600 kPa.

Se instalaron sensores locales para medir los desplazamientos radiales y axiales en el tercio central de la probeta, además, en el caso de las pruebas triaxiales, una celda de carga sumergible colocada en el cabezal superior del espécimen. A partir de las mediciones locales se determinaron el módulo de elasticidad, E, y la relación de Poisson dinámica,  $\nu$ , para diferentes niveles de esfuerzo efectivo, relación de vacíos y distorsión angular.

En la figura 1.31 se muestra la variación de la relación de Poisson en probetas secas, con diferentes relaciones de vacíos, sometidas a esfuerzos de confinamiento entre 0.05 a 0.55 MPa. Se puede ver que tanto la relación de vacíos como el esfuerzo de confinamiento no tienen una influencia aparente en la variación de la relación de Poisson, la cual se mantiene entre 0.2 y 0.3.

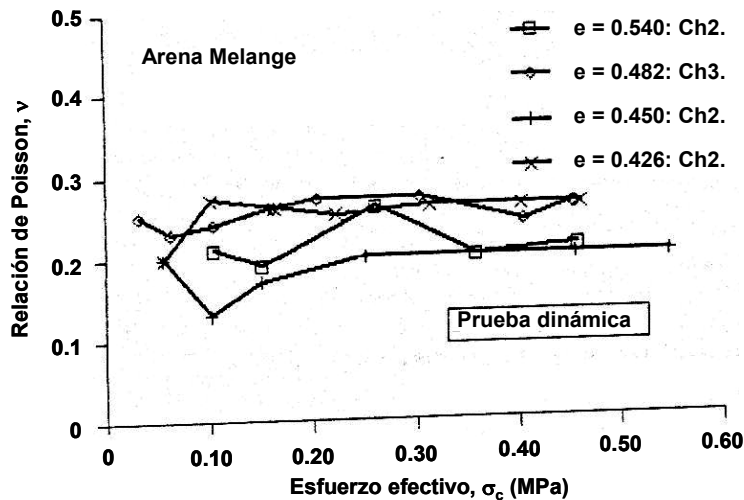


Figura 1.31 Influencia de la relación de vacíos y el esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson (Rivera, 1988)

Rivera (1988) probetas en condiciones secas y saturadas, las cuales arrojaron resultados como los que se presentan en la figura 1.32. Se muestran resultados de tres probetas con relaciones de vacíos iniciales semejantes (condiciones densas), dos de las cuales se ensayaron saturadas y una seca. Presentan relaciones de Poisson cercanas o iguales a 0.50 para las muestras saturadas y 0.20 para las secas. En ambos casos el esfuerzo de confinamiento no parece tener influencia en  $\nu$ , ya que éste permanece prácticamente constante con el incremento del esfuerzo.

En la figura 1.33 se presentan los resultados de ensayos secos ejecutados en columna resonante, para diferentes condiciones de esfuerzo de confinamiento, de 66 a 365 kPa, para un intervalo de distorsión angular de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$ . Lo que se puede ver es que  $\nu$  está entre 0.25 a 0.30, sin mostrar una influencia clara del esfuerzo de confinamiento, confirmando lo que se muestra en la figura 1.32. Respecto a la influencia de la distorsión angular, se aprecia que  $\nu$  se mantiene constante hasta antes de  $10^{-4}$ , a partir del cual se presenta un leve incremento.

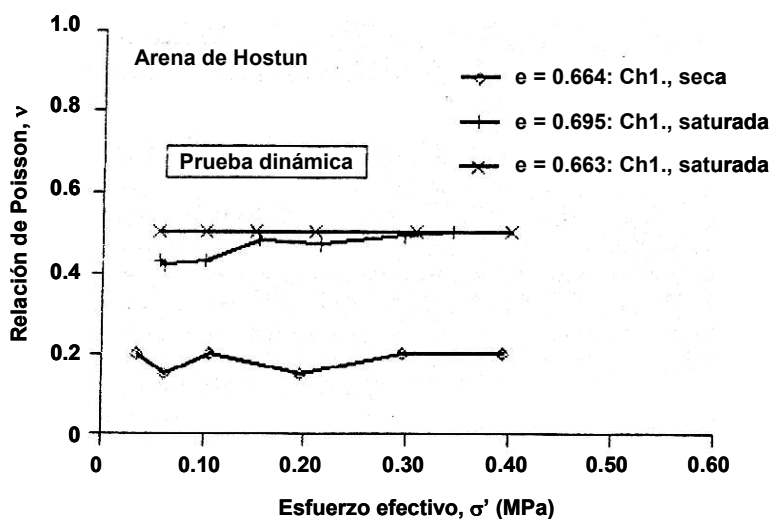


Figura 1.32 Influencia de la saturación y del esfuerzo efectivo en la relación de Poisson (Rivera, 1988)

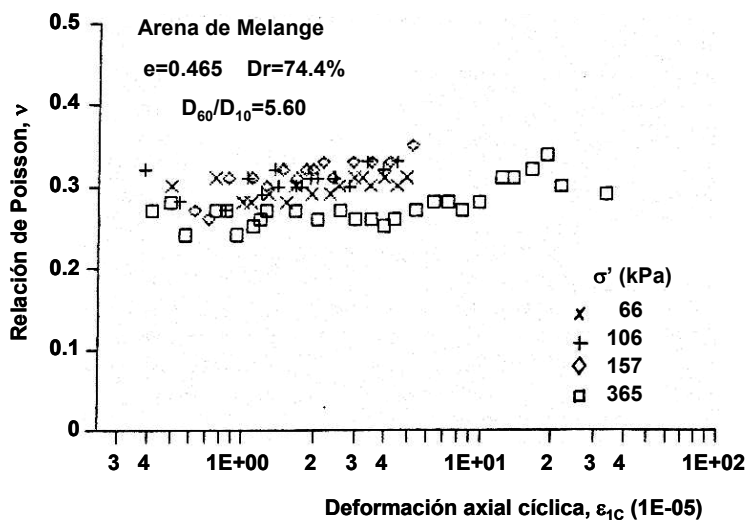


Figura 1.33 Influencia del esfuerzo efectivo y la distorsión angular en la relación de Poisson (Rivera, 1988)

En los resultados experimentales mostrados se observa una importante dispersión en los valores de relación de Poisson, tanto en los que se mide la deformación axial y radial de la muestra como en los que se obtienen a partir de las velocidades de onda de cortante y compresión.

Es coincidente el incremento en la relación de Poisson al aumentar el grado de saturación del suelo, como lo muestran los trabajos de Tsukamoto *et al.* (2002) y Gokhan *et al.* (2001), sólo que el primero reporta para material seco valores que están entre 0.20 y 0.40 (figura 1.18), mientras que para el segundo los valores van de 0.03 a 0.30 (figura 1.19). Para estos mismos materiales sólo que en condiciones de saturación total Tsukamoto *et al.* (2002) reportan valores puntuales muy cercanos a 0.50, mientras que Gokhan *et al.* (2001) muestran valores entre 0.35 y 0.50.

Respecto a la porosidad, se presentan resultados contradictorios, mientras que Dvorkin y Nur (1996) muestran que para arenas secas y saturadas la relación de Poisson se incrementa al aumentar la porosidad (figura 1.21), Salem (2000) indica lo contrario (figura 1.22), aunque cabe aclarar que en el primer trabajo referido fueron pruebas ejecutadas en muestras de suelo ensayadas en laboratorio y para el segundo se llevaron a cabo ensayos en campo.

Fioravante *et al.* (1994) reportaron resultados que se obtuvieron en pruebas triaxiales con medición local y usando elementos laminares y cristales piezoeléctricos en los que muestran la influencia de la relación de vacíos. Se aprecia claramente que conforme aumenta la relación de vacíos, se incrementa la relación de Poisson (figura 1.30).

Los resultados que relacionan el nivel de deformación con la relación de Poisson (Hoque *et al.*, 1996; Chaudhary *et al.*, 2003; Dong *et al.*, 1994; Yasuda *et al.*, 1994; Fioravante *et al.*, 1994; y Rivera, 1988) coinciden que ésta tiende a mantenerse constante o presentar un incremento muy pequeño al incrementarse la distorsión angular o el esfuerzo desviador aplicado, hasta llegar a la falla, lo cual se puede ver en las figuras 1.12, 1.16b, 1.26, 1.27, 1.28, 1.29 y 1.33. En general, de los resultados mostrados, los valores de relación de Poisson se ubican entre 0.10 y 0.30.

La influencia del esfuerzo efectivo, según reporta Rivera (1988), es despreciable en la variación de la relación de Poisson, tal como se puede ver en las figuras 1.31 y 1.32, la relación de Poisson se ubica entre 0.20 y 0.50.

Aunque existe un número importante de investigaciones donde se estudian los parámetros que más influencia tienen en la variación de la relación de Poisson en suelos, éstos no siempre son coincidentes en los resultados que se reportan. Bajo este escenario se abre la posibilidad de realizar un estudio que complementa dichos trabajos y que aporte al conocimiento sobre el comportamiento dinámico de suelos granulares.

Respecto al módulo de rigidez al cortante dinámico, ante la ausencia de información referente a la variación potencial de la deformación a lo largo de la probeta (y por tanto del módulo de rigidez), se estima imperativo estudiar si tal variación afecta significativamente a los valores que se obtienen cuando se considera el desplazamiento de todo el espécimen.

---

## **CAPÍTULO 2**

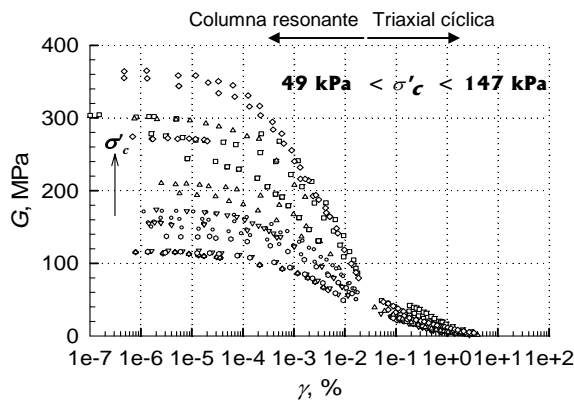
INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO

---

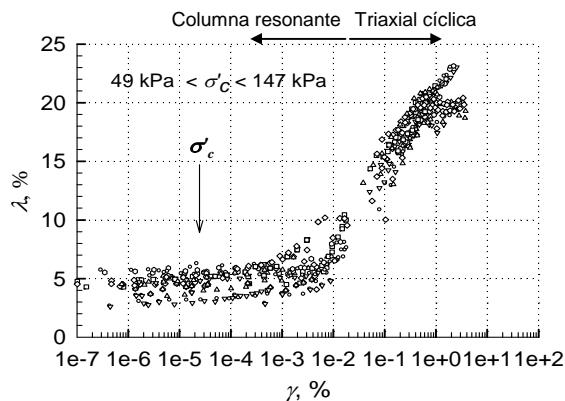
## 2 INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO

Los parámetros dinámicos más importantes que se requieren para el análisis dinámico de depósitos de suelo y sistemas suelo-estructura son el módulo de rigidez al cortante dinámico,  $G$ , la relación de amortiguamiento,  $\lambda$ , y su variación con la deformación angular,  $\gamma$ . Las curvas que se obtienen normalmente se les conocen como curva de degradación del módulo de rigidez y curva del incremento del amortiguamiento (figura 2.1).

Para cubrir el intervalo de deformaciones de interés en problemas geotécnicos existen diferentes equipos que en forma combinada cubren todo este intervalo. Dentro de estos equipos, los que más uso tienen son la columna resonante, para niveles de deformación angular entre  $10^{-5}$  y  $10^{-1}\%$  y la cámara triaxial cíclica, para intervalos de deformación que van de  $10^{-3}$  a  $10\%$  (prácticamente en la falla).



a) Degradación del módulo de rigidez



b) Incremento del amortiguamiento

Figura 2.1 Variación del módulo de rigidez,  $G$ , y el amortiguamiento,  $\lambda$ , con la deformación angular,  $\gamma$  (González *et al.*, 2007)

Además de los parámetros  $G$  y  $\lambda$ , en los problemas bi y tridimensionales es necesario conocer con precisión la relación de Poisson. Este estudio está enfocado a la evaluación del primero y tercer parámetros.

Este tipo de ensayos requieren de la medición de diferentes parámetros como desplazamiento, carga, presión de poro, cambio de volumen y aceleración, con un número importante de datos a censar por segundo y con un alto grado de precisión. Esto implica la necesidad de instrumentar y automatizar el equipo que se utiliza en la ejecución de los ensayos. En los incisos subsecuentes se detallan estos aspectos.

## 2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO MTS

El equipo triaxial cíclico MTS (figuras 2.2 y 2.3) se utiliza para ejecutar pruebas triaxiales estáticas (carga monotónica) y dinámicas (señales periódica o aperiódica) a carga o desplazamiento controlado, en probetas de 10.14 ó 15.24 cm de diámetro y 26 ó 30 cm de altura, respectivamente. Consta, básicamente, de cuatro elementos:

1. Sistema hidráulico (aplicación de carga)
2. Pánel de control
3. Sistema de aplicación de presión (confinante y contrapresión)
4. Sistema automatizado del equipo, captura y procesamiento de datos

### 2.1.1 Sistema hidráulico de aplicación de carga

La carga que se aplica a la probeta se hace mediante un sistema hidráulico con presión de aceite (figura 2.4), el cual consta de una bomba que suministra aceite a dos acumuladores que a su vez están conectados, por medio de mangueras, a un pistón hidráulico, formando un circuito cerrado de presión de aceite.

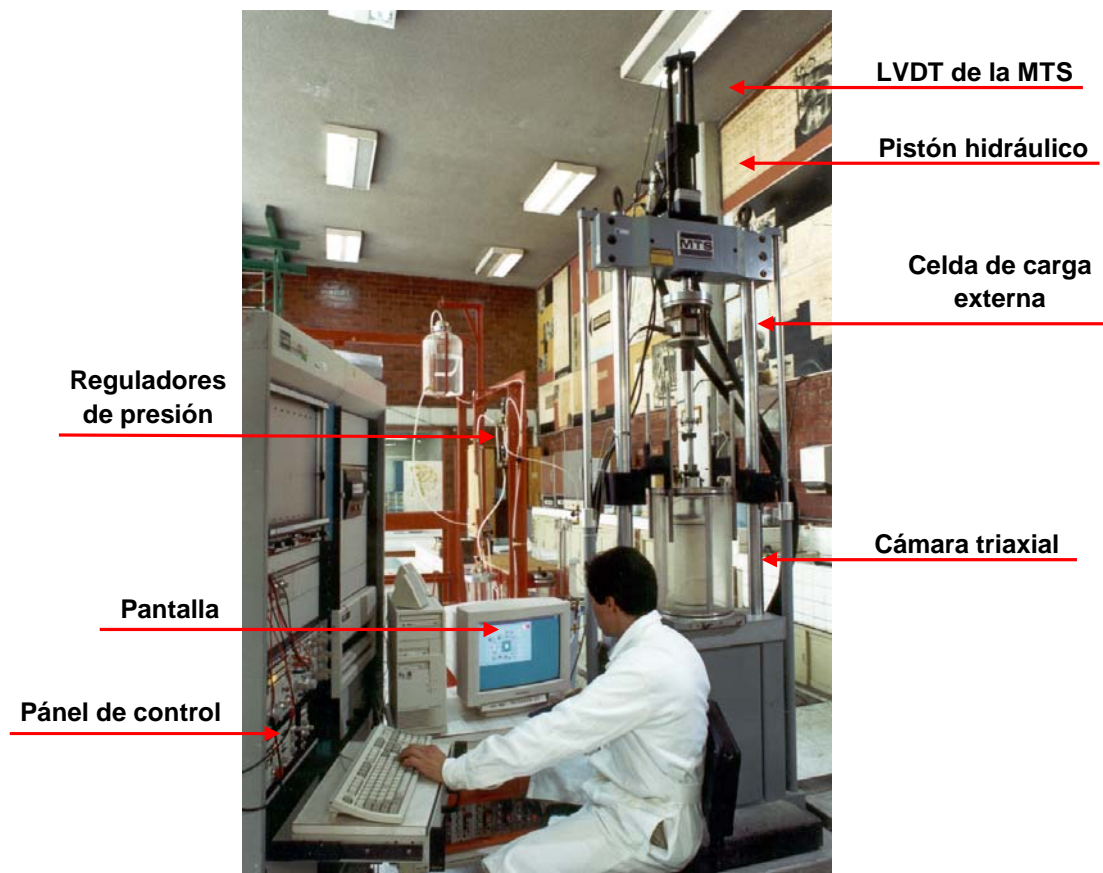


Figura 2.2 Equipo triaxial cíclico MTS



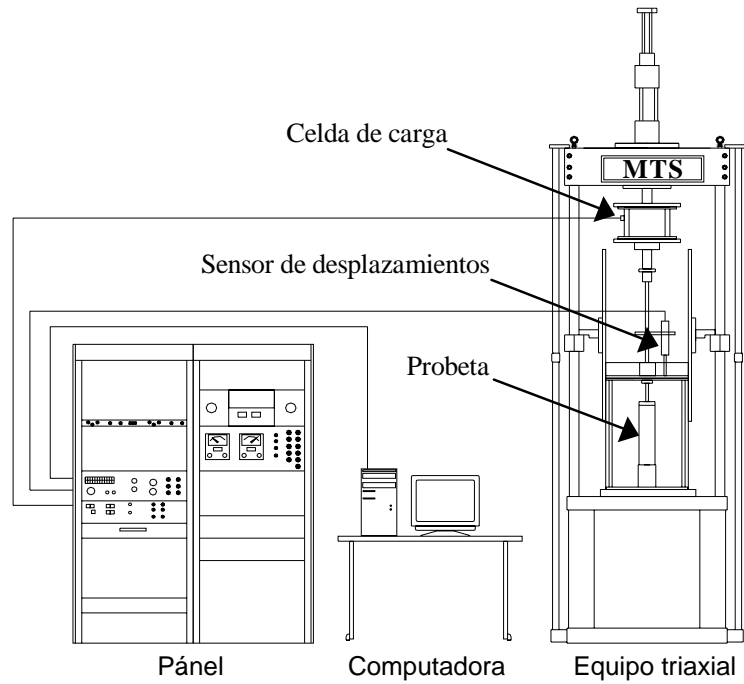


Figura 2.3 Esquema general del equipo triaxial cíclico MTS

La bomba tiene la capacidad de aplicar hasta 180 MPa de presión de aceite, la cual se transmite al pistón del equipo triaxial.



Figura 2.4 Sistema hidráulico para aplicar presión al pistón del equipo

### 2.1.2 Pánel de control (figura 2.5)

El equipo trabaja a carga o desplazamiento controlado, según se requiera, a porcentajes de trabajo de 10, 20, 50 ó 100%, con respecto a un valor máximo del sensor de carga que esté instalado en el equipo (en este caso de 500 kg) y de desplazamiento de 15 cm si se controla el equipo con el LVDT de la MTS y de 5 cm si se utiliza el sensor colocado en la tapa de la cámara. En este pánel se da la ganancia al sistema para cuando éste trabaja a carga o desplazamiento controlado, según sea el caso.

Tiene un botón de encendido de la bomba de aceite para trabajar a baja presión y otro para pasar de esta condición a presión alta.

Con una perilla ubicada en el tablero de control se mueve el pistón para colocar en posición el cabezal superior durante el montaje de la probeta. Se ajusta, también, el valor de ganancia de uno de los acondicionadores (Span 1) para modo de trabajo en carga o desplazamiento controlado.

Se establecen los límites de trabajo superior e inferior, tanto en carga como en desplazamiento, para los cuales el equipo, por seguridad, se desactiva. Por ejemplo, si se desea trabajar en un intervalo de carga de 200 kg se ajusta este valor en el equipo como límite superior. Cuando se salga de este intervalo de trabajo durante la prueba, el equipo se mueve a la posición inicial. La definición de los límites de trabajo se considera como un factor de seguridad para garantizar el correcto comportamiento de los sensores instalados.

En el tablero de control todos los cambios son manuales y se hacen, en su mayoría, antes de montar la probeta.



Figura 2.5 Tablero de control

### 2.1.3 Sistema automatizado, control y procesamiento de datos

Este sistema, formado por el equipo triaxial MTS, una computadora con una tarjeta de adquisición de datos instalada y un conjunto de sensores, permite diseñar y ejecutar cuatro diferentes tipos de pruebas (Flores, *et al.*, 2002):

- a) *Prueba estática.* Aplica un patrón de carga en rampa; es decir, carga o desplazamiento a una tasa de aplicación constante, entre los valores inicial y final definidos.
- b) *Prueba dinámica senoidal.* Aplica como excitación, en carga o desplazamiento controlado, un patrón senoidal en el que se varía la amplitud de la señal y número de ciclos, además se especifica si la prueba es de compresión, compresión-extensión (en los porcentajes requeridos) o sólo extensión.
- a) *Prueba con patrón dinámico arbitrario.* Con este módulo se diseña una prueba con las siguientes señales: rampa, senoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra e intercalada entre éstas un valor de carga o desplazamiento constante, o combinaciones de éstas. Además, se definen las características de frecuencia, número de ciclos y amplitud que se quieren.
- b) *Desplazagrama.* Permite leer el archivo de un acelerograma, carga en pantalla todas las características del sismo y selecciona una de las direcciones en que se registró el evento. Hace la doble integración y la corrección de línea base para obtener una señal de desplazamiento-tiempo, la cual se escala y se aplica al equipo triaxial.

## 2.2 INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO

Los sensores instalados en el equipo son los siguientes:

*Colocados fuera de la cámara:*

- Un sensor de desplazamiento axial con una carrera de 150 mm, con el cual se puede controlar automáticamente el equipo cuando se trabaja a desplazamiento controlado. Se localiza en la parte más alta del marco de carga.
- Un sensor de desplazamiento axial con una carrera de 50 mm. Se ubica en la tapa de la cámara triaxial (Cabezal superior, CS). Con este sensor también se puede hacer el control automático del equipo, cuando se requieren aplicar amplitudes pequeñas.
- Un sensor de desplazamiento axial con un intervalo de medición de 20 mm, colocado en el CS de la cámara triaxial. Al igual que con los dos sensores anteriores, el control automático se puede hacer con este sensor, en caso de que los desplazamientos axiales no rebasen el intervalo de medición de éste.
- Una celda de carga externa de 500 kg de capacidad colocada, bajo el marco de carga (ver figura 2.2), con la cual se hace la retroalimentación del equipo cuando se trabaja a carga controlada.
- Una celda de carga sumergible de 500 kg de capacidad, colocada en la base (pedestal) de la cámara.
- Dos celdas de presión, donde se registran las presiones de confinamiento y contrapresión que se aplican a la probeta y la presión de poro en la base y en la altura media de la muestra, en caso de ser prueba no drenada.
- Una celda de presión diferencial para registrar los cambios volumétricos en caso de pruebas drenadas, colocada a un lado de la cámara triaxial.

*Colocados dentro de la cámara:*

- Dos sensores de desplazamiento axial con intervalo de medición de 10 mm. Éstos se colocan en los extremos superior (TMS) e inferior (TMI) del tercio medio de la probeta, para medir el desplazamiento en estos puntos.
- Dos sensores de desplazamiento de tipo magnético, de 25 mm de intervalo de medición con los cuales se mide el desplazamiento radial de la probeta en su tercio medio.
- Dos acelerómetros miniatura colocados dentro de la muestra.

En la tabla 2.1 se presenta el tipo, número e intervalo de medición de los sensores que se pueden instalar en el equipo triaxial cíclico y en las figuras 2.6 y 2.7 se muestra la distribución y posición de trabajo de cada uno de éstos.

Tabla 2.1 Sensores instalados en el equipo triaxial cíclico MTS

Sensor	Cantidad	Parámetro a medir	Unidades	Intervalo de medición
LVDT	1	desplazamiento axial	mm	-75 a 75 mm
LVDT	1	desplazamiento axial	mm	-25 a 25 mm
LVDT	1	desplazamiento axial	mm	-10 a 10 mm
LVDT	2	desplazamiento axial	mm	-5 a 5 mm
Sensor magnético	2	desplazamiento radial	mm	0 a 25 mm
Celda de carga	1	carga exterior de cámara	kg	0 a 500 kg
Celda de carga	1	carga interior de cámara	kg	0 a 500 kg
Celda de presión	2	presión de poro	kg/cm <sup>2</sup>	0 a 7.5 kg/cm <sup>2</sup>
Presión diferencial	1	cambio de volumen	mm <sup>3</sup>	0 a 50 cm de columna de H <sub>2</sub> O

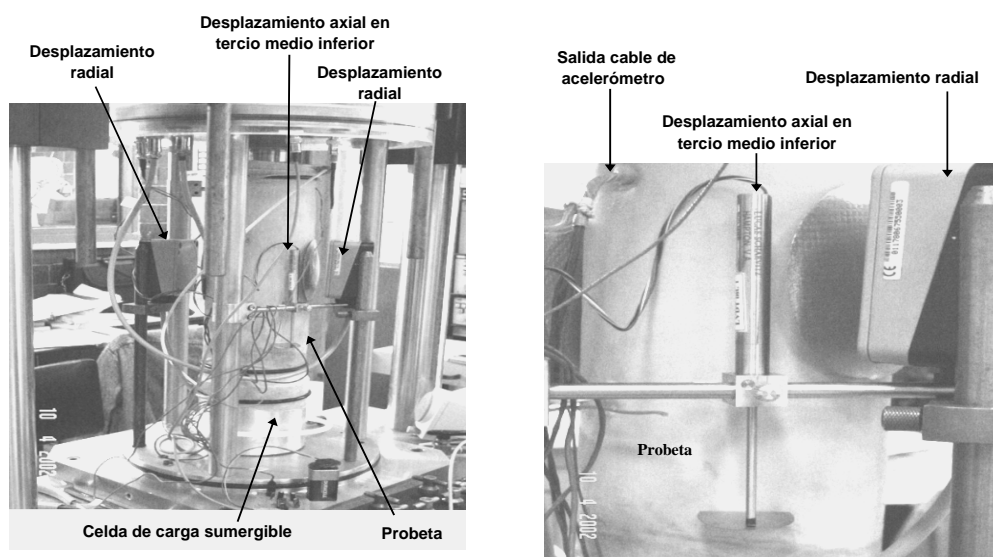
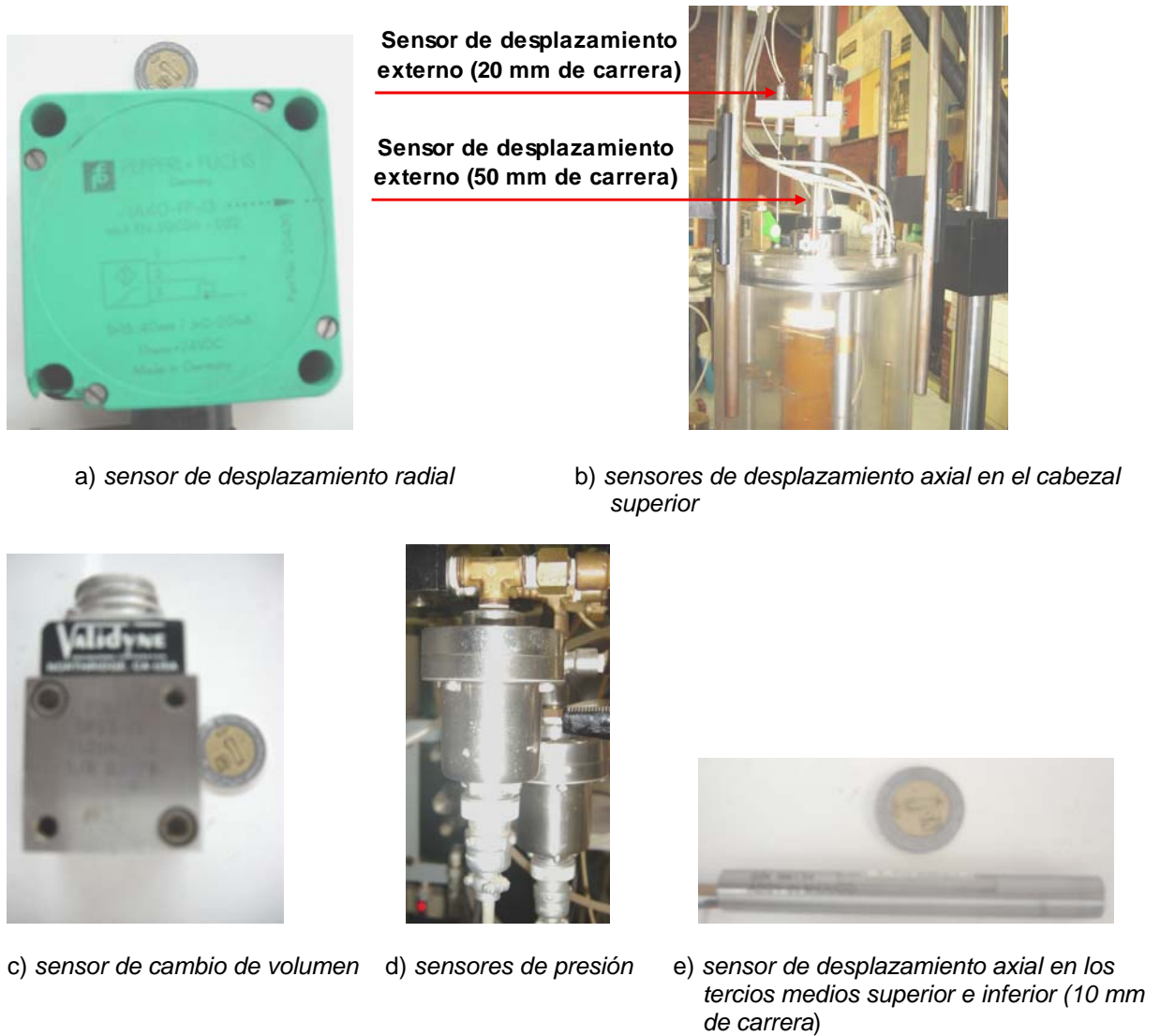


Figura 2.6 Distribución de algunos de los sensores instalados en el equipo triaxial cíclico MTS

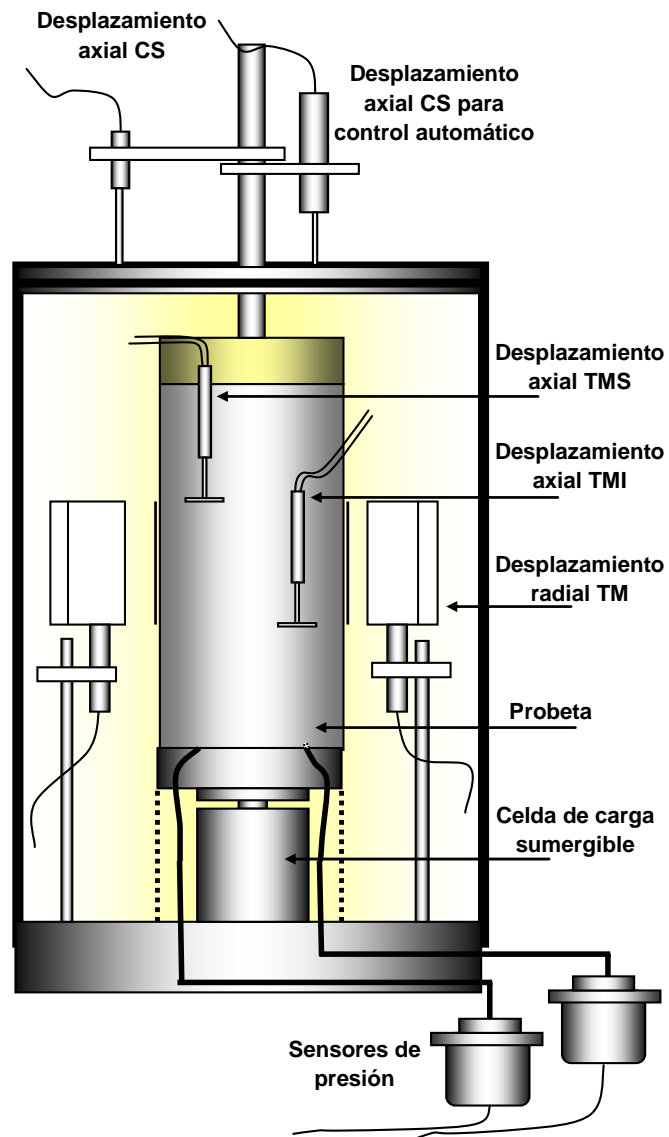


Figura 2.7 Esquema de distribución de algunos de los sensores instalados en el equipo triaxial cíclico

## 2.3 AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO

Para la automatización del equipo se utilizó una tarjeta de adquisición de datos modelo PC MIO 16Ex10 de National Instrument con 16 canales analógicos de entrada y dos de salida, 16 bits, con la cual se hace el manejo automático y registro de las señales de los sensores durante la ejecución de las pruebas.

Para la operación automática, el equipo mide las variables de carga y desplazamiento y puede seleccionar alguna de éstas para operar en carga o desplazamiento controlado. La excitación es aplicada a través de la tarjeta de adquisición de datos instalada en el CPU de la computadora, usando una salida analógica por lo cual es posible aplicar prácticamente cualquier excitación por más compleja que sea, en un intervalo de frecuencias de 0 a 5 Hz.

El programa de manejo automático del equipo, la adquisición de datos y los módulos de reporte se hicieron en el lenguaje de LAB VIEW, un programa que trabaja bajo la plataforma de National Instrument (Flores *et al.*, 2002). El programa de manejo fue conceptualizado y desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM, y consta de los módulos: operación, reporte, reporte múltiple y calibración, que a continuación se describen.

### 2.3.1 Módulo de operación

Este módulo permite configurar una señal de excitación, verificar los valores de cada uno de los transductores instalados en el momento deseado y aplicar la configuración diseñada (figura 2.8).

Los gráficos que se presentan aquí aparecen en la pantalla con ambiente Windows a color, sólo que se presentan en blanco y negro para darle claridad a la impresión.

### 2.3.2 Configuración

En la figura 2.9 se muestra la pantalla de configuración de una prueba. Ésta permite recuperar un patrón de ensaye prediseñado o bien diseñar uno nuevo. Cuando se tiene el patrón a ejecutar, en pantalla se presenta la fecha en la que se diseñó éste; si la prueba es de tipo drenada o no drenada; el tipo de excitación: dinámica senoidal, estática, patrón arbitrario, barrido de frecuencia o desplazagrama; la operación del equipo: a carga o desplazamiento controlado; y si la prueba es consolidada isotrópica o anisotrópicamente.

Para diseñar los patrones de excitación se selecciona el botón de *patrón de excitación* y aparece una pantalla que presenta el menú de las diferentes opciones. Si se selecciona *patrón dinámico senoidal*, aparece la pantalla que se presenta en la figura 2.10 y se le da como dato, en cada uno de los recuadros, la amplitud, en *mm* o *kg* (si se trabaja en desplazamiento o carga controlada, respectivamente); la frecuencia en hertz (*Hz*), número de ciclos; y se le da un valor de *offset* que permite desplazar la ordenada para configurar la prueba para que ésta se ejecute sólo a *compresión* (valores positivos de desplazamiento o carga), *extensión* (valores negativos de carga o desplazamiento), aunque por las condiciones del ensaye no es posible realizarla o *compresión-extensión*, en los porcentajes requeridos. Se define el número de muestras que se desean tomar por ciclo, con lo cual se calcula el valor del incremento de tiempo *dt* en *segundos* al que se tomará cada lectura durante el ensaye.

Si la opción elegida es diseñar una *prueba estática* (figura 2.11), se dan como datos la posición inicial del pistón para el tiempo igual a cero, en *mm* o *kg*, que suele ser cero y corresponde a la posición en la que se encuentra éste al inicio de la etapa de aplicación de carga o desplazamiento; la posición final, en *mm* o *kg*; y el tiempo de duración de la prueba, en segundos (*s*), con lo cual se determina la tasa de cambio del desplazamiento o la carga con el tiempo. Se define también el número de muestras que se desea tomar durante el ensaye y calcula el incremento de tiempo *dt* con el cual se tomarán las lecturas. El valor del *offset* corresponde a la aplicación de un valor de carga o desplazamiento inicial antes de aplicar el vector de carga o desplazamiento, valor al que llega con una señal en rampa en un tiempo fijo de cinco segundos.

 <b>Instituto de Ingeniería</b> Instrumentación - Geotecnia	<b>Sistema de ensayos MTS</b> Geotecnia
---	--

Figura 2.8 Menú de operación


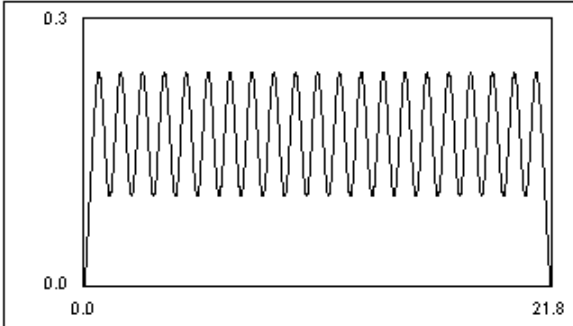
 <b>Instituto de Ingeniería</b> Instrumentación - Geotecnia		<b>Sistema de ensayos MTS</b>	
<b>Fecha del patrón</b>	<input type="text" value="01/04/02"/>	<b>Operación MTS</b>	<input type="text" value="Deformación controlada"/>
<b>Tipo de prueba</b>	<input type="text" value="Prueba drenada"/>	<b>Patrón</b>	<input type="text" value="No repetir"/>
<b>Excitación</b>	<input type="text" value="Dinámica senoidal"/>	<b>Consolidación</b>	<input type="text" value="No"/>
		<input type="button" value="Recuperar Patrón"/> <input type="button" value="Patrón de Excitación"/> <input type="button" value="TERMINAR"/>	
		<b>Tiempo (s)</b>	<input type="text" value="21.78"/>

Figura 2.9 Pantalla de configuración de una prueba

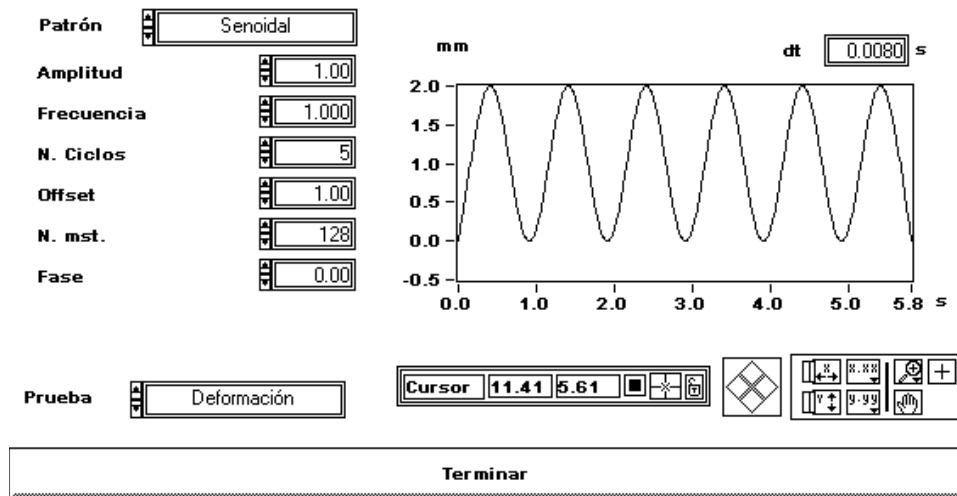


Figura 2.10 Patrón de excitación dinámico sinusoidal

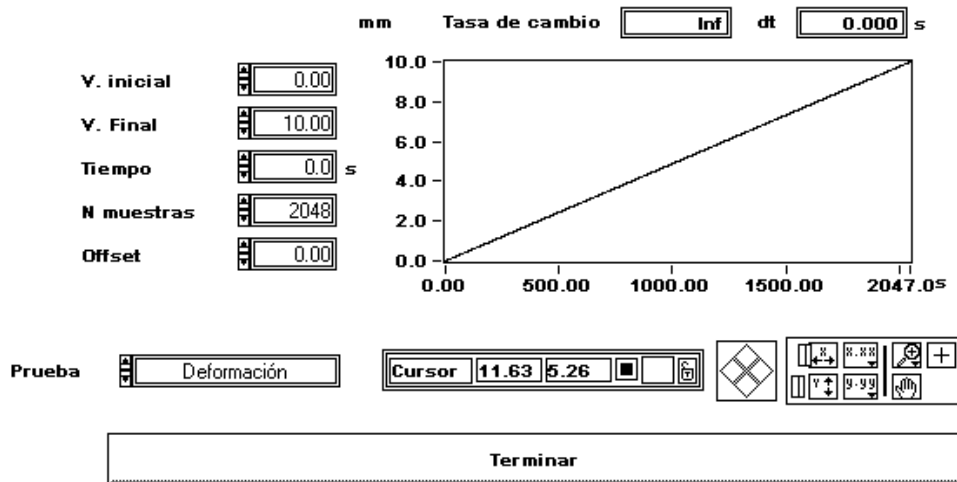


Figura 2.11 Patrón de excitación estático

Para la prueba con *patrón arbitrario* (figura 2.12) se tiene la opción de seleccionar señales periódicas con forma de senoide, cuadrada, diente de sierra, triángulo y rampa o mantener un valor constante. El diseño del patrón de ensayos se hace de acuerdo a las necesidades del usuario, haciendo una combinación libre de cada una de las señales, número de ciclos, frecuencia y amplitud. Para este caso no hay módulo de cálculo de parámetros, pero se adquiere la señal de todos los sensores en tiempo real durante el ensayo para el análisis posterior de los resultados. Para las señales en rampa se define el valor inicial ( $V_i$ ) y el valor final ( $V_f$ ), el *número de muestras* a tomar y el *incremento de tiempo*  $dt$  al que se desea se realice cada medición; en el caso de las señales periódicas se define la *amplitud* pico a pico, el *número de ciclos*, la *frecuencia* de excitación, el *corrimiento* u *offset* respecto al valor en el que iniciará la aplicación de la señal y el *número de muestras* que se desea tomar por ciclo. En la figura se muestra un ejemplo en el que se diseñó un patrón de excitación con las cinco señales disponibles.

En el *barrido de frecuencias* (figura 2.13) se selecciona la forma de la señal periódica (senoide, cuadrada, diente de sierra o triángulo); se define la amplitud pico a pico de la señal, en *mm* o *kg*; se definen las frecuencias de inicio y término de la excitación, en *Hz*; se especifican el *incremento de frecuencia* ( $\Delta f$ ) en *Hz* que se aplicarán a partir de la frecuencia inicial hasta la final, el *número de ciclos* a aplicar por cada *incremento de frecuencia* y el *valor del corrimiento* u *offset* a partir de la posición de inicio del pistón.



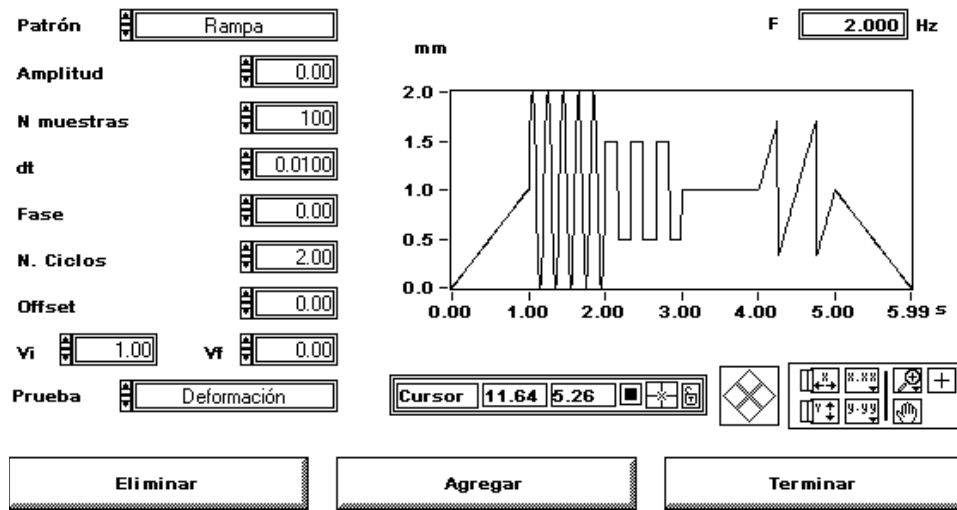


Figura 2.12 Patrón de excitación arbitrario

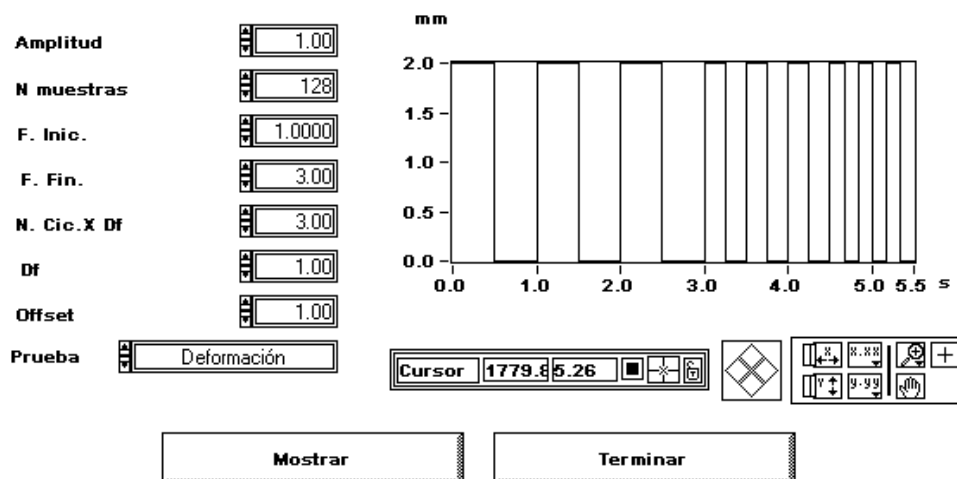


Figura 2.13 Barrido de frecuencias con señal cuadrada

### 2.3.3 Transductores

En el módulo de operación aparece el botón de transductores y al presionar éste se muestra en pantalla la variación gráfica y numérica de la carga y el desplazamiento con el tiempo. Además, en la parte inferior de la pantalla se puede ver la variación numérica de todos los sensores instalados (figura 2.14); esto permite monitorear cada uno de ellos en las diferentes etapas de la prueba.

### 2.3.4 Ensayo

En el tablero de control se definen las condiciones de trabajo del equipo, a carga o desplazamiento controlado y se indica el porcentaje de trabajo de la celda de carga y del sensor de desplazamiento con los que se controla el equipo, de tal forma que cuando se presiona el botón de ensayar, aparece una pantalla en la que se pide corroborar los porcentajes de trabajo definidos previamente en dicho tablero. En caso de que el patrón de prueba diseñado requiera utilizar un porcentaje de trabajo mayor al que se definió, se genera un

mensaje de error que indica aumentar éste o diseñar un patrón con una amplitud menor (figura 2.15). En esta pantalla se indica el valor que debe tener una perilla denominada “span” ubicada en el tablero del equipo: 6.70 para desplazamiento controlado y 9.50 para carga controlada. Este valor corresponde a la ganancia eléctrica con la que se calibraron los sensores para su operación en carga o desplazamiento controlado.

Ya que se definieron los porcentajes de trabajo aparece una pantalla en la que se indican las dimensiones de la probeta, las condiciones de esfuerzo a las que está sometida y se redacta, si se desea, un comentario referente al ensaye. Se da, además, el nombre con que se identifica la prueba y se indica la carpeta donde se guardan los archivos que se generen.

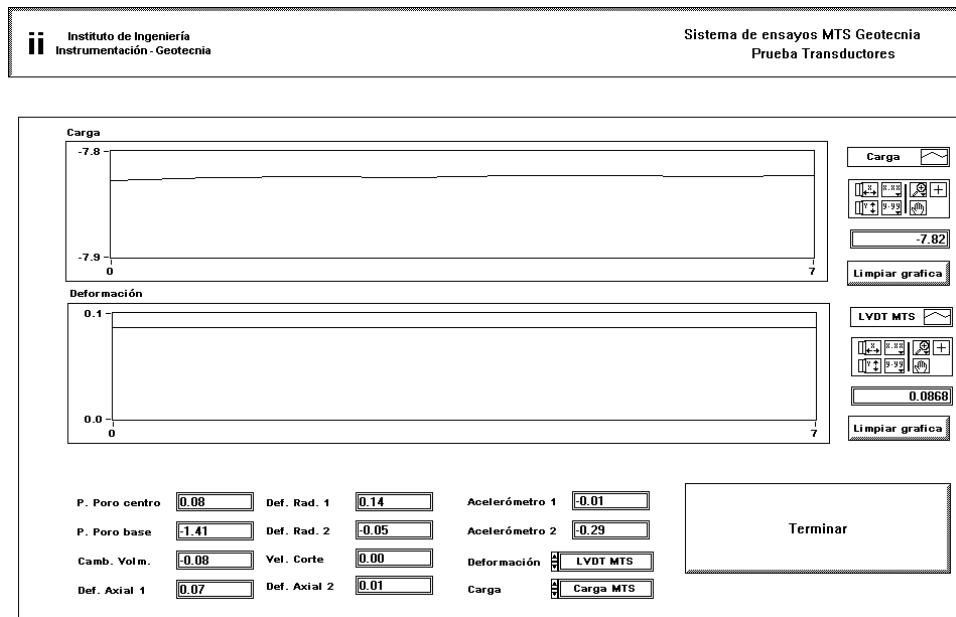


Figura 2.14 Pantalla de transductores

**Seleccione el modo (carga o desplazamiento) y porcentaje de operación del equipo y fije el valor del SPAN.**

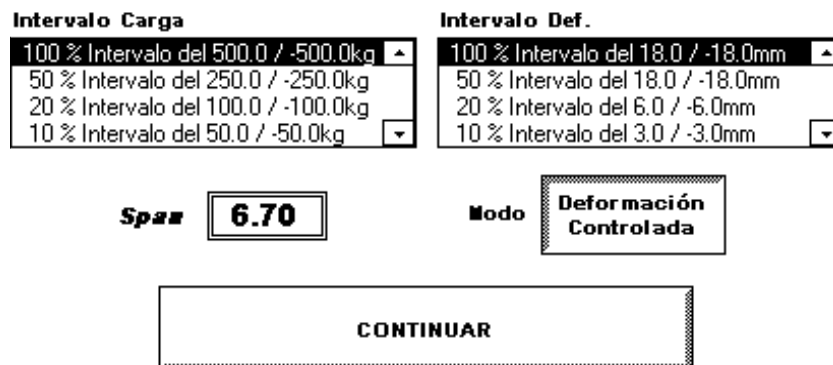


Figura 2.15 Definición del porcentaje de trabajo del equipo

En la etapa de ensaye aparecen cinco gráficos en la pantalla, cuatro del lado izquierdo y uno al lado derecho, según se muestra en la figura 2.16. De los cuatro gráficos del lado izquierdo, en los primeros dos se pueden ver las señales de carga y desplazamiento vs tiempo y en los otros dos se puede seleccionar cualesquiera de los sensores instalados que se desee visualizar. En caso de una prueba monotónica, en la pantalla de la derecha aparece el gráfico de carga vs desplazamiento; si el patrón de excitación es dinámico senoidal aparece la señal de carga vs desplazamiento de cada uno de los ciclos; y si la señal es un patrón arbitrario o barrido, aparece la señal de carga vs desplazamiento de toda la excitación. Durante la ejecución del ensaye, las señales que no se puedan visualizar de manera gráfica se pueden observar de manera numérica en los recuadros de la parte inferior izquierda de la pantalla.

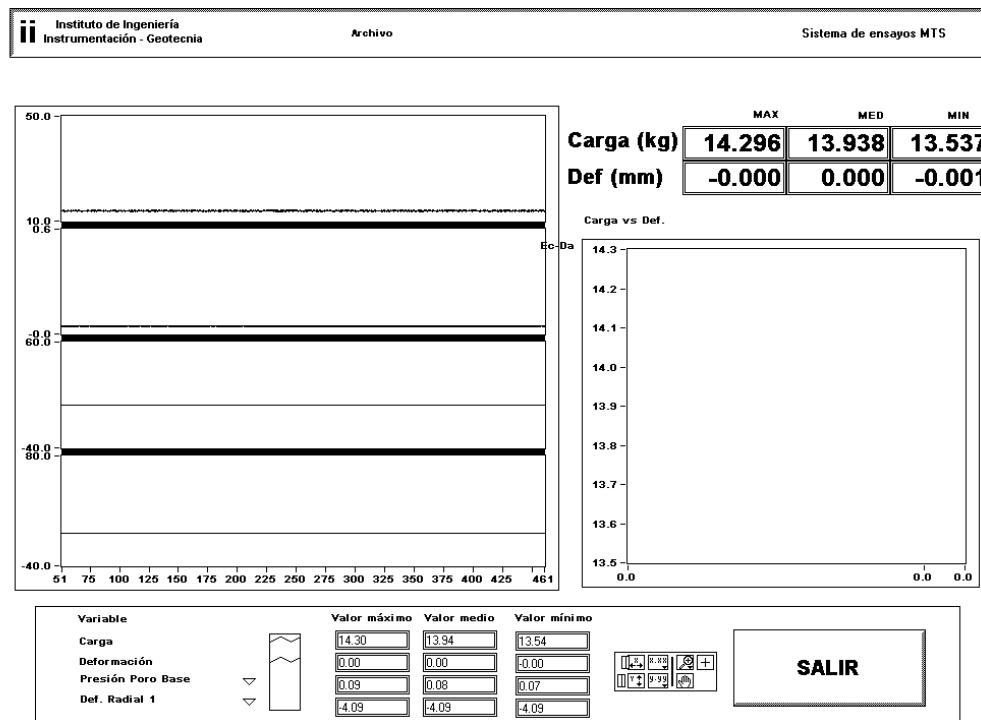


Figura 2.16 Ejecución del patrón de excitación diseñado

### 2.3.5 Módulo de reporte

Este módulo permite realizar el cálculo de los parámetros mecánicos del suelo, para las probetas ensayadas con patrones de excitación “monotónico” y “dinámico senoidal”, sometidas a las diferentes condiciones de esfuerzos (UC, UU, CU y CD). En el caso de los patrones de excitación “arbitrario” y “barrido” sólo se obtiene la evolución con el tiempo de las señales en cada uno de los sensores instalados.

En el menú principal, cuya pantalla aparece en la figura 2.17 se debe seleccionar el archivo correspondiente al patrón de excitación ejecutado. Cuando éste se carga, aparece la fecha de realización de la prueba, las condiciones de drenaje, el tipo de excitación usado y la forma de operación del equipo triaxial. Se puede optar por desplegar e imprimir los resultados en forma gráfica si se selecciona *analizar archivo*; o bien, generar un archivo de resultados experimentales incluyendo los parámetros calculados, para posteriormente graficarlos en una hoja de cálculo (p.e. Excel) si se opta por *generar un archivo ASCII*.


 <b>Instituto de Ingeniería</b> <b>Instrumentación - Geotecnia</b>		<b>Sistema de ensayos MTS</b> <b>Reporte</b>	
<b>Archivo</b>	<input type="text" value="C:\GEO_DATOS\seno_200_0100.DAT"/>		
<b>Fecha del archivo</b>	<input type="text" value="8/5/2002"/>	<input type="button" value="Seleccionar Archivo"/>	
<b>Tipo de prueba</b>	<input type="text" value="Prueba drenada"/>		
<b>Exitación</b>	<input type="text" value="Dinámica senoidal"/>	<input type="button" value="Analizar Archivo"/>	
<b>Operación MTS</b>	<input type="text" value="Deformación controlada"/>		
<b>Consolidación</b>	<input type="text" value="No"/>		
<b>Comentario</b>	<input type="text" value="Jales Las Charcas. Senoide, semiamplitud 0.10 mm"/>		<input type="button" value="Generar archivo ASCII"/>
<input type="button" value="TERMINAR"/>			

Figura 2.17 Menú principal del módulo de *reporte*

Si se selecciona una prueba en la que se aplica un patrón dinámico senoidal, aparecen en una pantalla tres gráficos (figura 2.18). En los dos inferiores se presenta la deformación y la carga vs tiempo y en el superior el ciclo de histéresis, esfuerzo cortante vs deformación angular, para el número de ciclo que se haya seleccionado. Aparece, además, al lado derecho del gráfico, el valor del amortiguamiento,  $\lambda$ , y del módulo de rigidez secante,  $G$ , calculados para el ciclo que se presenta gráficamente.

El ciclo de histéresis se muestra con los resultados calculados a partir de los datos experimentales. Se tiene la opción de filtrar la señal, tecleando el ícono de *filtrado/no filtrado* y diseñar el filtro con los valores de frecuencias de corte inicial y final,  $f_i$  y  $f_h$ , mostrados debajo de este ícono. Una señal filtrada se presenta en la figura 2.19.

En la pantalla de la figura 2.18 se puede presionar el botón de *imprimir ciclos*, esto nos lleva a la pantalla de la figura 2.20 en la que aparece la lista de los ciclos. De esta lista se pueden seleccionar entre uno y doce para que los presente gráficamente y muestre en la tabla que aparece a la derecha de la pantalla los parámetros dinámicos que le corresponden a cada ciclo. Se tiene la opción de tener los ciclos con la señal filtrada o no filtrada.

Debajo de la gráfica aparecen varios recuadros con las características principales de la prueba. En la parte inferior del extremo derecho aparece un recuadro en el que se pueden hacer observaciones acerca del ensaye. Una vez seleccionados los ciclos requeridos, el modo de filtrado o no filtrado y hechas las anotaciones requeridas, se puede mandar imprimir.

Si se selecciona el ícono de *gráfica transductores* de las figuras 2.18 y 2.19, se presenta una pantalla en la que se muestran las señales en el tiempo de algunos de los sensores instalados, tal como se muestra en la figura 2.21. En las gráficas superiores: desplazamiento axial en el tercio superior (TMS), el desplazamiento axial en el tercio inferior (TMI), el desplazamiento radial 1; y en las inferiores: el desplazamiento radial 2, la carga axial y el desplazamiento axial en el cabezal superior (CS).

En la parte inferior de la pantalla se tienen las características de operación del equipo: tipo de ensaye, fecha de ejecución y las condiciones de esfuerzos aplicados. Aquí se puede diseñar la impresión dándole las escalas deseadas y las características de la línea del gráfico. Posteriormente se manda imprimir, tal como aparece en la figura 2.21.

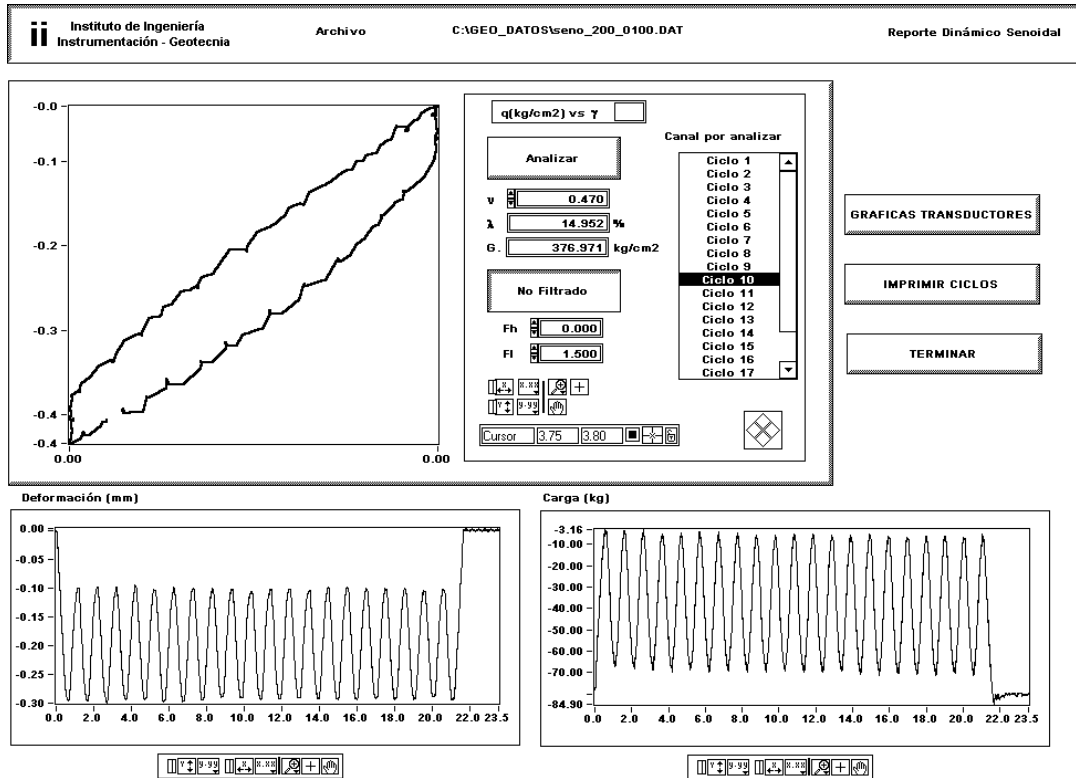


Figura 2.18 Prueba con patrón dinámico sinusoidal, sin filtro

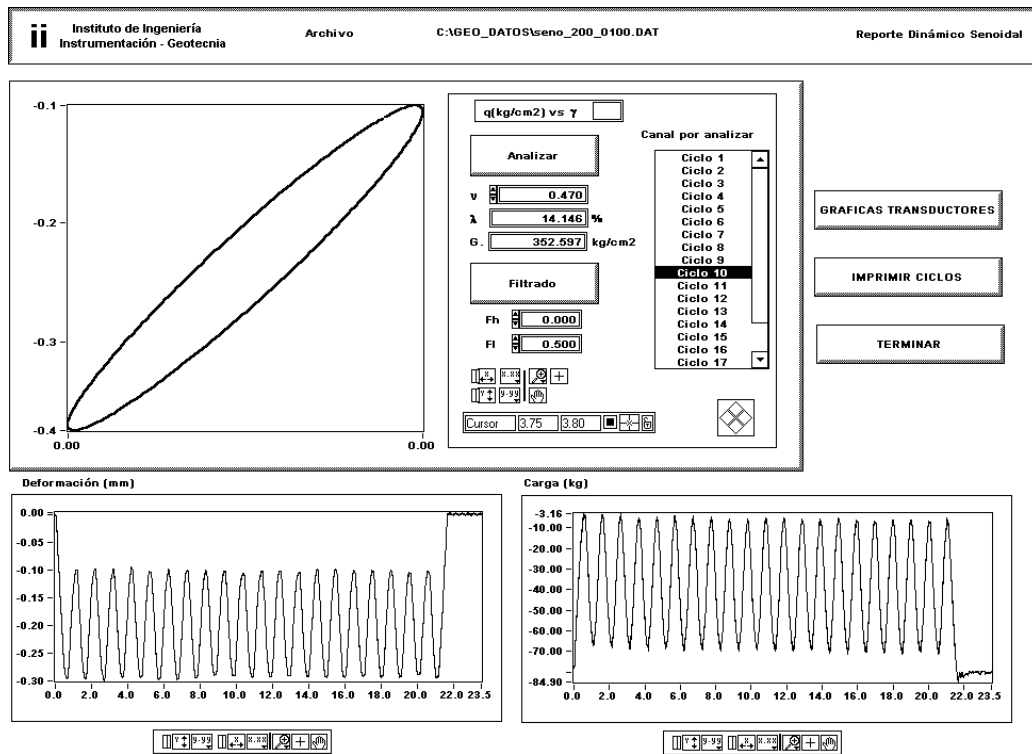


Figura 2.19 Prueba con patrón dinámico sinusoidal, con filtro

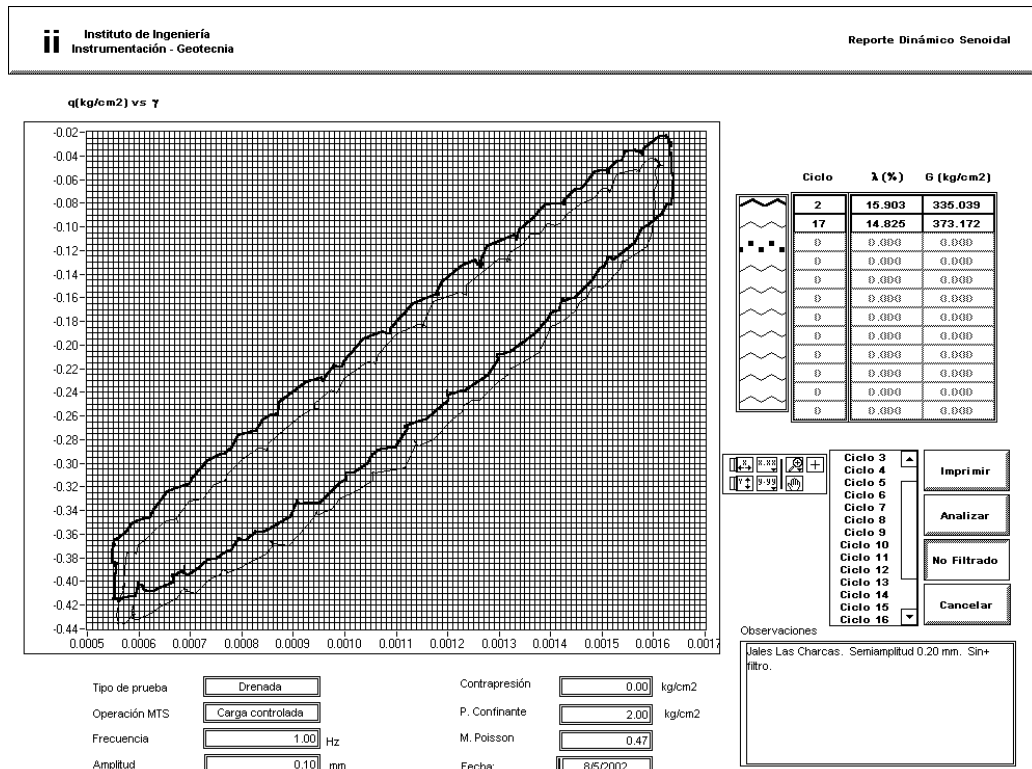


Figura 2.20 Pantalla de impresión de ciclos de histéresis, sin filtro

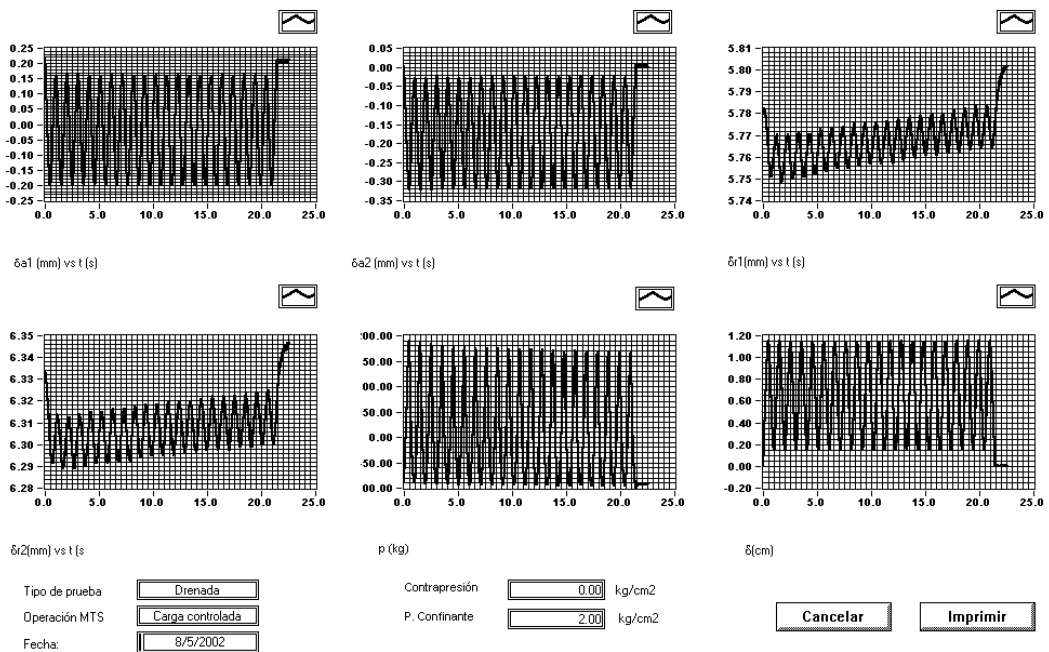


Figura 2.21 Pantalla de impresión de señales de transductores

Si se desea imprimir sólo uno de los gráficos de los que se presentan en la figura 2.21, se selecciona éste, se diseña la impresión, se escribe el comentario deseado y se manda imprimir, tal como aparece en la figura 2.22.

De cada una de las señales que se presentan en las figuras 2.18 a 2.22 se pueden generar archivos de texto separados por tabuladores, compatibles con hoja de cálculo (p.e. Excel) para su análisis posterior por parte del usuario.

Si en el menú principal del *módulo de reporte*, mostrado en la figura 2.17 se selecciona una prueba estática, se pregunta si los cálculos se harán con la presión de poro registrada en la base o a la altura media de la muestra. Se selecciona cualesquiera de estas dos y presenta en pantalla los resultados que se muestran en la figura 2.23: las curvas esfuerzo cortante ( $\tau$ ) vs deformación unitaria axial ( $\epsilon$ ); esfuerzo desviador ( $q$ ) vs esfuerzo promedio ( $p'$ ), presión de poro base ( $u_b$ ) vs deformación unitaria axial ( $\epsilon$ ), presión de poro en la altura media ( $u_c$ ) vs deformación unitaria axial ( $\epsilon$ ); Deformación radial 1 ( $\delta_{r1}$ ) vs deformación unitaria axial ( $\epsilon$ ); y deformación radial 2 ( $\delta_{r2}$ ) vs deformación unitaria axial ( $\epsilon$ ). Se tiene la opción de diseñar e imprimir estos resultados, generar un archivo de texto o seleccionar cualesquiera de las gráficas e imprimirla de forma independiente, tal como se muestra en la figura 2.24.

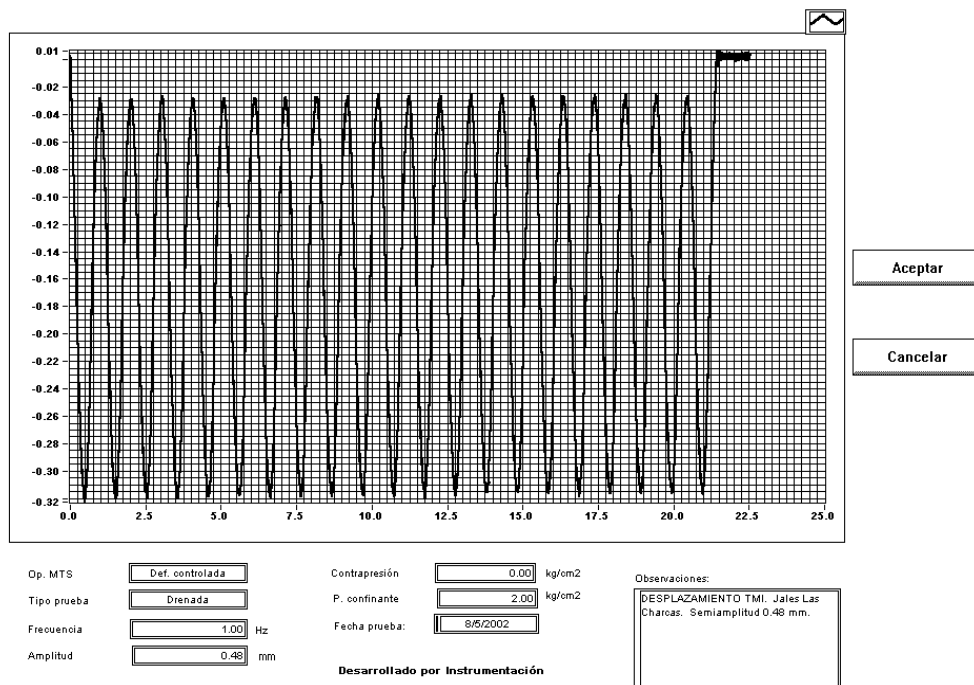


Figura 2.22 Pantalla de impresión de señales de un transductor

### 2.3.6 Módulo de reporte múltiple

En las pruebas triaxiales con patrón dinámico senoidal se requiere aplicar al mismo espécimen de suelo señales de desplazamiento, incrementando la deformación axial, manteniendo constante el número de ciclos y la frecuencia de excitación. De las señales de carga y desplazamiento se selecciona, para cada incremento, el mismo ciclo. Lo que se obtiene son señales de carga vs desplazamiento axial, tal como se presenta en la figura 2.25.

A partir de los valores de carga y desplazamiento se determina el esfuerzo cortante y la deformación angular para cada ciclo, tal como se presenta en la figura 2.26. De este ciclo se determina el módulo de rigidez secante,  $G_s$ , del suelo.

Al acceder al módulo de reporte múltiple aparece la pantalla que se muestra en la figura 2.27, se selecciona el directorio de trabajo donde se guardaron los resultados de las señales de excitación aplicadas a la probeta. Al seleccionar una carpeta aparecen todos los archivos cuyo nombre base sea el mismo y aparece en el recuadro de "ciclos" del primero al máximo aplicado. El usuario selecciona uno a uno los archivos que desea analizar, luego el o los ciclos en los que desea se calcule el módulo de rigidez para cada una de las semiamplitudes e indica si la señal se analizará filtrada o no filtrada. Se presiona el botón de *Aceptar selección de archivos* para que el programa corrobore que todas las señales seleccionadas tengan el mismo número de ciclos y la misma frecuencia de excitación. Al presionar *Analizar* se realiza el cálculo del módulo de rigidez secante y la distorsión angular para cada uno de los ciclos indicados de las señales seleccionadas. Al terminar el análisis que dura unos cuantos segundos, se pueden *mostrar las gráficas* e imprimirlas si se desea (figura 2.28) o bien *generar un archivo ASCII* para posteriormente graficarlo en Excel.

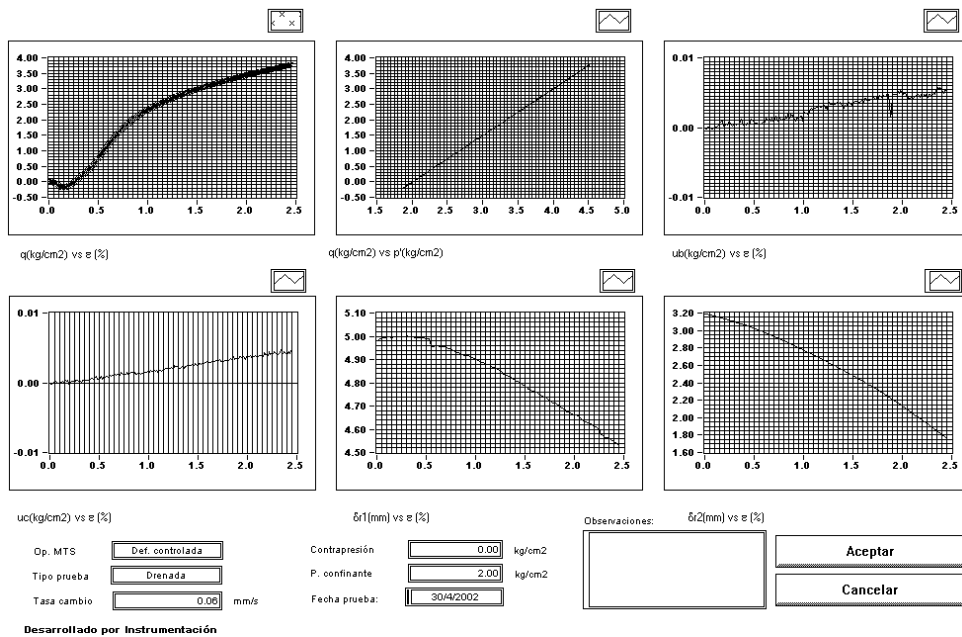


Figura 2.23 Reporte de una prueba estática

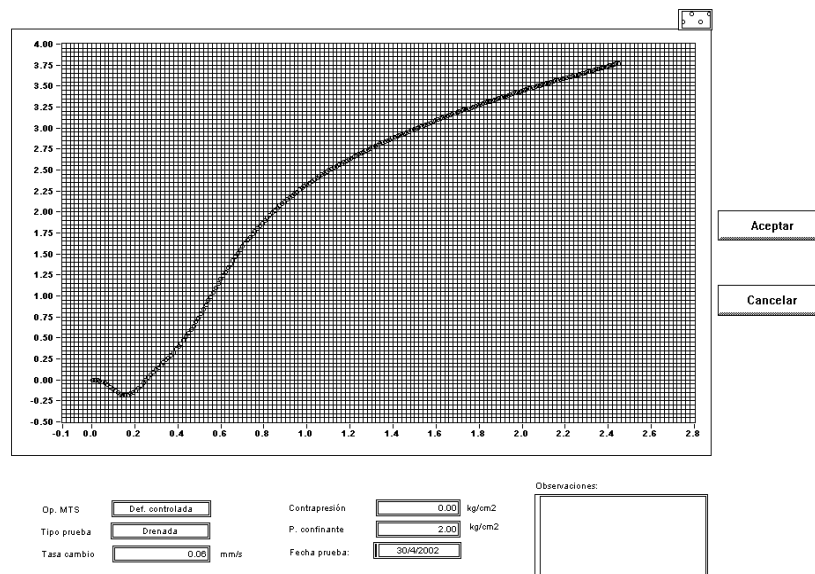


Figura 2.24 Pantalla e impresión de una de las curvas de reporte estático



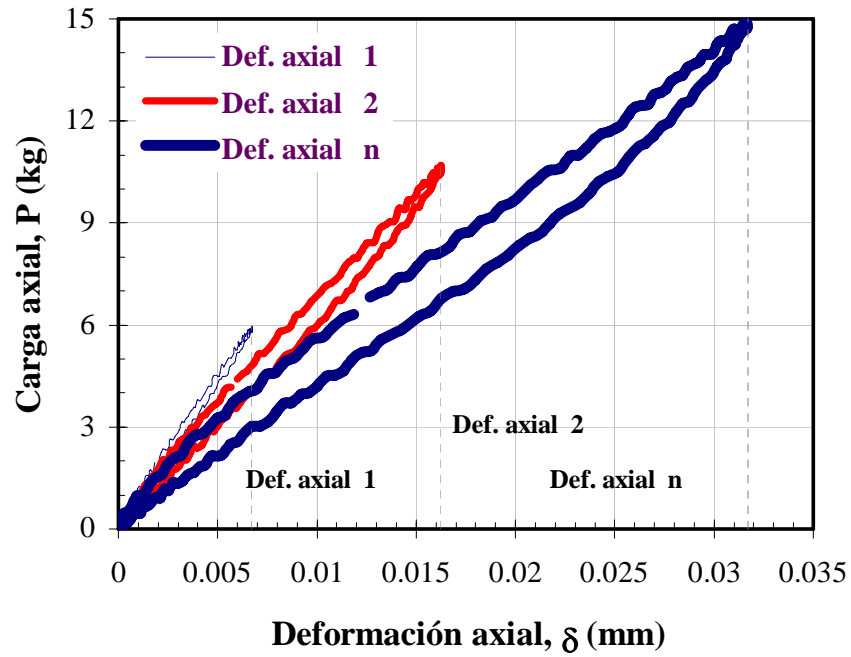


Figura 2.25 Carga vs deformación axial en la probeta, para un ciclo determinado y varias señales de desplazamiento

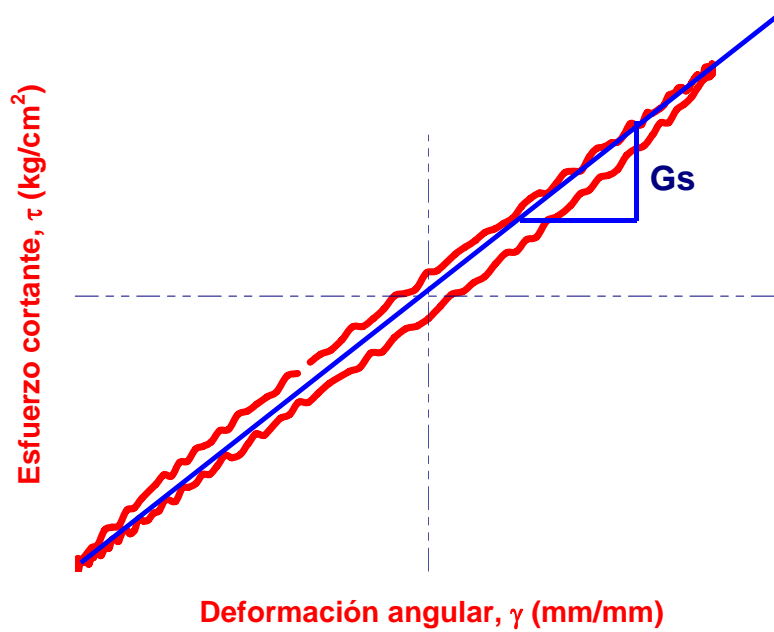


Figura 2.26 Determinación del módulo de rigidez secante,  $G_s$ , para una amplitud de desplazamiento y un ciclo determinado

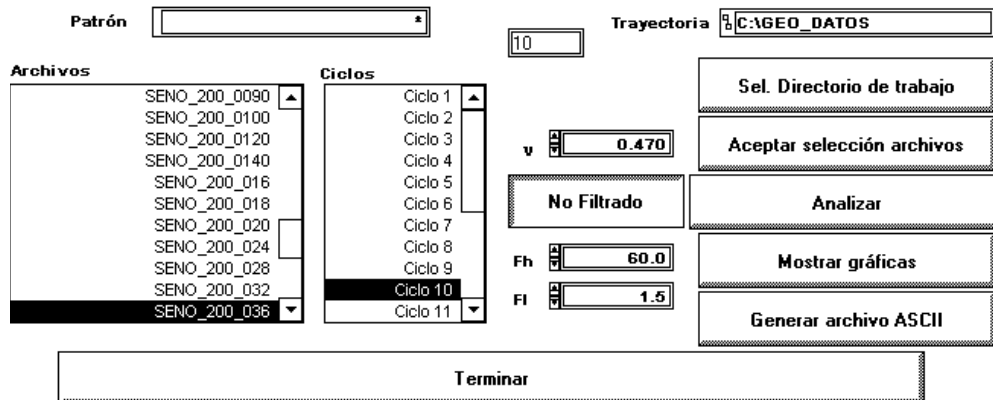


Figura 2.27 Selección de señales y número de ciclos considerados para el cálculo de parámetros

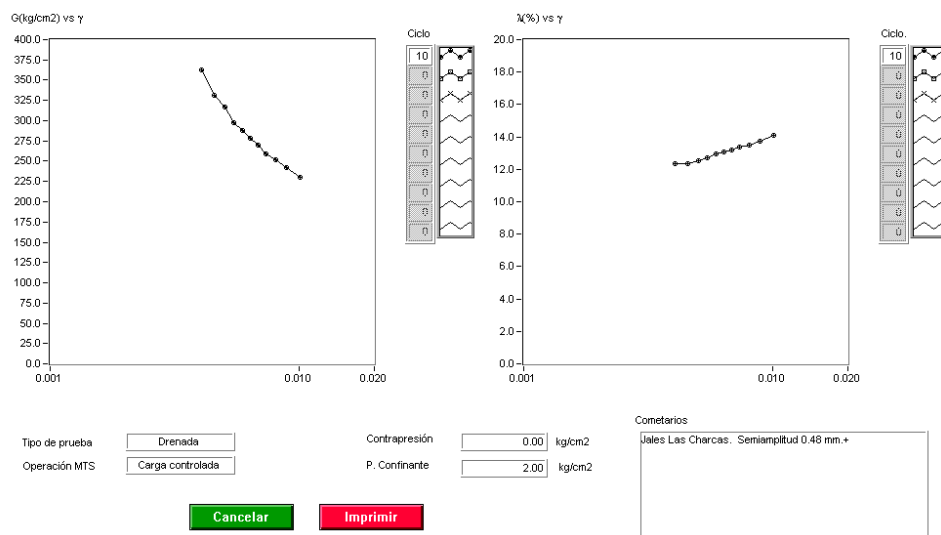


Figura 2.28 Curva de degradación del módulo de rigidez e incremento del amortiguamiento

### 2.3.7 Módulo de calibración

Debido a la necesidad de calibrar periódicamente los sensores instalados en el equipo, se diseñó el módulo de calibración de transductores, el cual permite obtener las constantes de calibración de los sensores del equipo triaxial MTS en cada uno de los porcentajes de trabajo (*Calibrar sistema MTS*) o bien los sensores instalados (*Calibrar transductores*). En la figura 2.29 se presenta el menú principal de calibración.

Si se desea calibrar cualesquiera de los transductores es necesario que éstos se encuentren conectados y encendido el tablero de control. Se selecciona la opción de *calibrar transductores* y aparece la lista de sensores instalados. Se selecciona el deseado, el intervalo de voltaje en el que se quiera trabajar, las unidades en las que el sensor se calibrará y la constante del patrón que se utilizará como referencia. En la figura 2.30 se muestra la forma en que se selecciona un sensor de desplazamiento cuya calibración se realiza con un tornillo micrométrico con unidades de salida en milímetros, por tal razón la constante patrón de calibración se toma como uno.

En la pantalla de calibración (figura 2.31) se teclea en el ícono de *indicador* el valor leído en el equipo patrón (en este caso el tornillo micrométrico), se presiona el botón de *tomar lectura* y aparece el valor real medido

en el sensor. Al ir tomando valores en el equipo patrón y registrándolos en el *indicador* se va formando la curva de calibración: en la ordenada están las unidades que el sensor registra y en las abscisas la variación de voltaje. De los puntos registrados se calculan la **pendiente** y la **ordenada**, que se toman como las constantes de calibración del sensor.

Cuando se termina la calibración del sensor y se tecléa *salir*, se pregunta al usuario si desea cambiar las constantes de calibración del sensor, si la respuesta es sí, se actualizan automáticamente las constantes de calibración y se genera un archivo en el que aparecen la fecha de calibración, el sensor calibrado, las constantes de calibración y los puntos registrados.

En caso de que se deseen cambiar las constantes de calibración de un sensor, se ingresa a *cambiar constantes de calibración de transductores* (figura 2.32), se selecciona el sensor y directamente se tecléan las nuevas **pendiente** y **ordenada**.

- Calibrar sistema MTS
- Calibrar transductores
- Cambiar constantes de calibración de transductores
- Cambiar constantes de calibración de MTS transductores
- Cambiar constantes de calibración de MTS servo
- Terminar

Figura 2.29 Menú de calibración de transductores

**Seleccione los límites de la tarjeta y las unidades en las que se hará la calibración.**

**Presiones terminar para iniciar la calibración.**

Límites  Unidades

Transductor

C. Cal. Patrón

Figura 2.30 Selección del sensor a calibrar

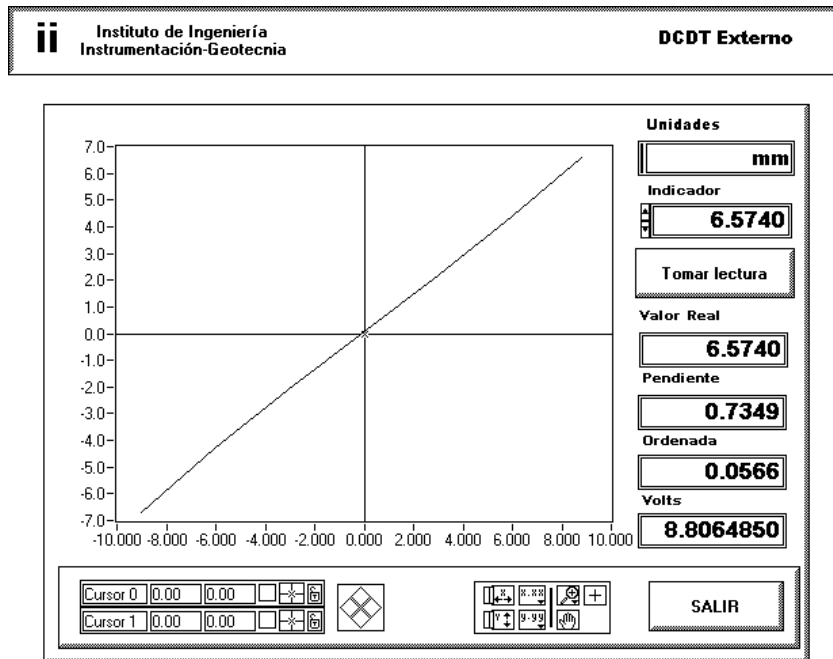


Figura 2.31 Calibración de un sensor de desplazamiento

Transductor

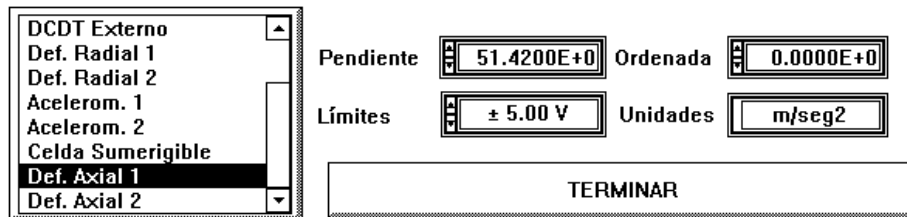


Figura 2.32 Cambiar constantes de calibración de un sensor

---

## **CAPÍTULO 3**

DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

---

### 3 DESCRIPCIÓN DEL LOS MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

#### 3.1 Descripción de los materiales

Se ensayaron dos materiales granulares: Residuos mineros de la unidad minera “Las Charcas” y material tomado de un banco de materiales para la construcción de la presa “La Parota”, con clasificación según el SUCS: de *SM-Arena limosa*, para el primero; y *SP-Arena mal graduada*, para el segundo (tabla 3.1 y figura 3.1). La densidad relativa de sólidos que se determinó fue de 3.02 y 2.69, para Las Charcas y La Parota, respectivamente.

El material de Las Charcas es un residuo minero, producto de la trituración de mineral en una mina ubicada en el estado de San Luís Potosí, Méx., con aristas predominantemente angulosas y La Parota es material aluvial, de formas redondeadas a subredondeadas, de un depósito en el río Papagayo, en el estado de Guerrero, Méx.

Tabla 3.1 Granulometrías de los materiales ensayados

Las Charcas SLP					La Parota Gro.		
Malla número	Abertura malla	Peso retenido	Retenido	Pasa	Peso retenido	Retenido	Pasa
	mm	gr	%	%	gr	%	%
4	4.750						100.00
10	2.000				660.00	22.00	78.00
20	0.840			100.00	720.00	24.00	54.00
40	0.420	85.30	9.91	90.09	630.00	21.00	33.00
60	0.250	213.61	24.81	65.28	360.00	12.00	21.00
80	0.177	120.23	13.96	51.32	240.00	8.00	13.00
100	0.149	116.21	13.50	37.82	105.00	3.50	9.50
200	0.074	159.90	18.57	19.25	240.00	8.00	1.50
PASA 200		165.70	19.25		45.00	1.50	
Suma=		860.95 gr		Suma=	3000.00 gr		

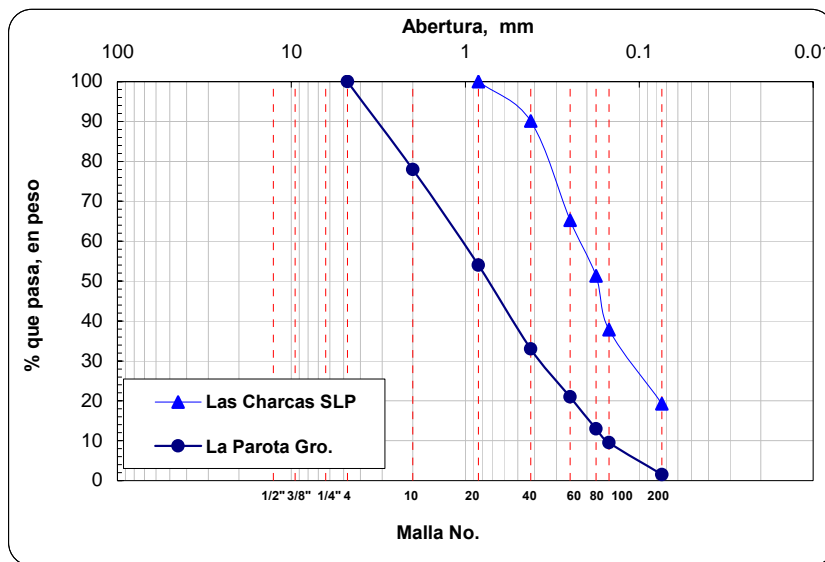


Figura 3.1 Granulometrías de los materiales ensayados

### 3.2 Formación de la probeta

Las probetas de suelo se formaron utilizando un método de compactación que consiste en colocar diez capas, con doce apisonadas en cada una, utilizando un pisón de diámetro un poco mayor al radio de la muestra. Durante la formación se coloca el pisón sobre el suelo, con el objetivo de que genere la densificación del material debido al peso propio de éste. Se varía tanto el peso del pisón como el contenido de agua, cubriendo el intervalo correspondiente al contenido de agua óptimo.

Para formar las probetas de suelos es necesario preparar el material con un contenido de agua predefinido, pesar suelo en veinte cápsulas (dos por capa) colocarlas en una charola metálica y cubrirlas con un trapo húmedo para evitar la pérdida de humedad (figura 3.2a). En un molde partido unido con dos abrazaderas se coloca una membrana de látex, se le aplica vacío al molde a tres diferentes alturas, para lograr que la membrana se adhiera al interior de éste (figura 3.2b). El pedestal se coloca sobre una base cilíndrica de madera y sobre el cabezal se monta el molde con la membrana. Se coloca un papel filtro sobre el pedestal y se vacía el material correspondiente a la primera de diez capas, distribuyéndolo de manera uniforme en la sección del molde (figura 3.2c). Se apisona doce veces la superficie del material, en el orden que aparece en la figura 3.2d. Ya que se compactó el suelo de la capa, se procede de la misma forma con las subsecuentes, y al llegar a la octava se coloca una extensión para facilitar la colocación de las dos últimas. Ya colocadas las diez capas se retira la extensión, se enrasa la muestra y se procede al montaje en la cámara triaxial.

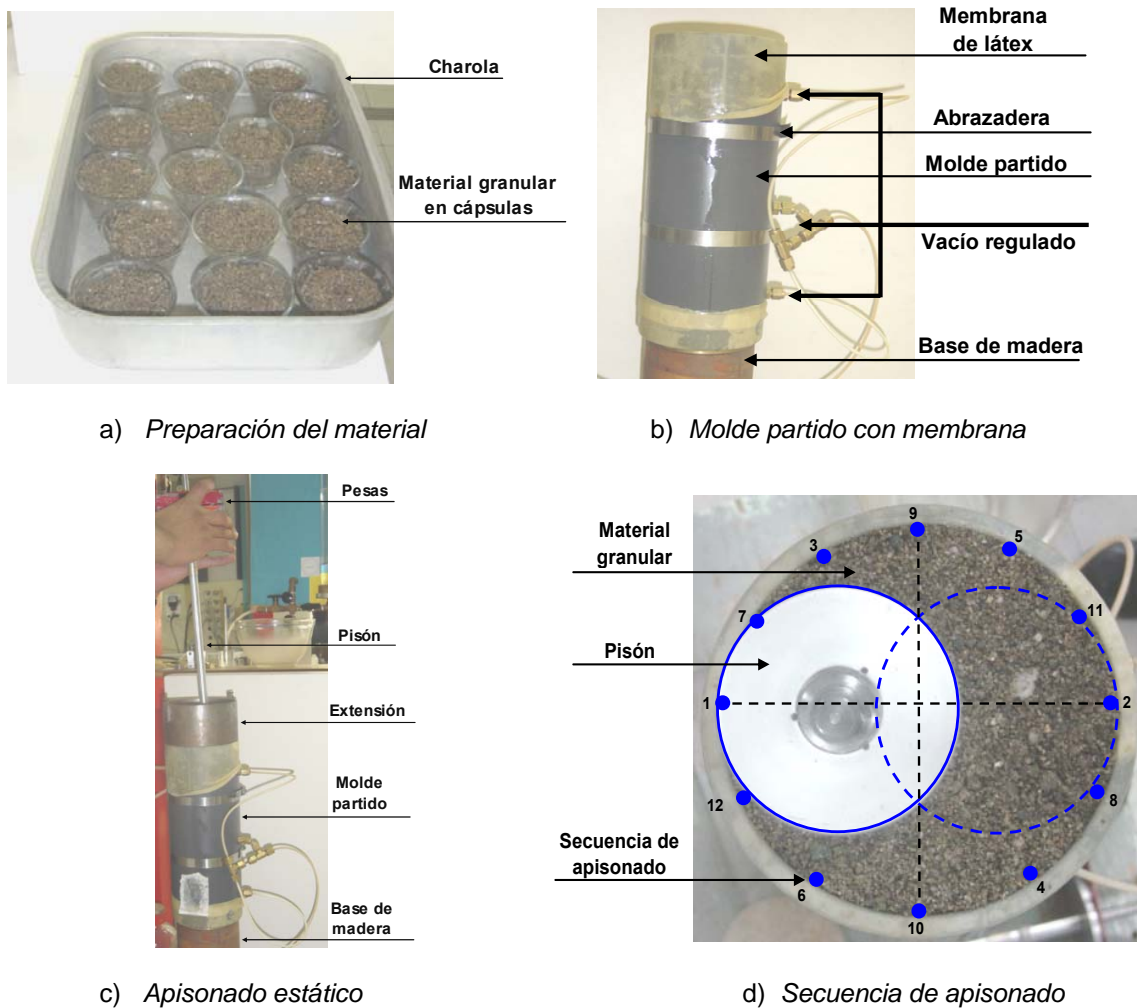


Figura 3.2 Secuencia gráfica de formación de la probeta de suelo

Se traslada la probeta con el molde y el pedestal a la base de la cámara triaxial cíclica. Se fija el pedestal a la base de la cámara, se coloca el papel filtro en la parte superior de la muestra, se baja el pistón hasta que haga contacto el cabezal con la muestra, se levanta la membrana de látex y se coloca el pedestal sobre la muestra, se levanta la membrana para cubrir el cabezal y se coloca un arosello. Se aplica vacío a la parte interna de la probeta, lo cual permite quitar con mucho cuidado el molde partido y que la estructura de la muestra se mantenga estable.

Ya que se tiene montada la muestra, se colocan los sensores de desplazamiento en los tercios superior e inferior, se baja la cámara de acrílico y se aplica la presión de confinamiento al suelo.

Se determina la relación de vacíos y la compacidad relativa de la probeta al término de su formación y el cambio que ésta sufre primero, por la aplicación del vacío regulado para quitar el molde y segundo, debido a la aplicación del confinamiento. La estimación de estos cambios en la compacidad relativa se presenta en el capítulo donde se hace el análisis de resultados.

### 3.2.1 Resultados de compactación

Antes de iniciar la etapa de ensayos dinámicos se obtuvieron las curvas de compactación de los materiales estudiados (figura 3.3).

En el material de la Parota se obtuvieron las curvas para las energías de compactación obtenidas con los pesos de pisón de 0.50, 2.0, 4.0, y 6.0 kg y cuatro contenidos de agua, que van de 0.20 a 9 %. De las curvas de compactación se obtuvieron las relaciones de vacíos máxima y mínima. En esta investigación se consideró que la máxima corresponde al valor obtenido con un peso de pisón de 0.10 kg y mínima a la que se obtiene con un peso de pisón de 6 kg. Los valores de relación de vacíos máxima y mínima, determinada con este método, son 0.80 y 0.42, respectivamente.

Si se hubiera utilizado otro método de compactación, las relaciones de vacíos máxima y mínima seguramente serían diferentes; por tanto, las compacidades relativas reportadas son referidas a este método específico.

Para los Jales SLP se utilizaron los mismos pesos de pisón mencionados en el párrafo anterior y 5 contenidos de agua, entre 0 y 9.5 %. Los valores de relación de vacíos máxima y mínima para este material son 1.55 y 0.60, respectivamente.

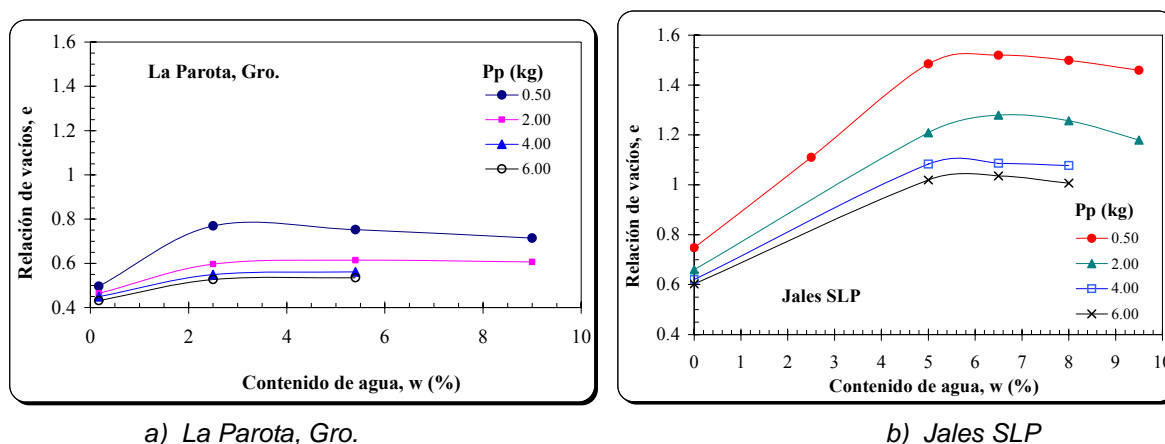


Figura 3.3 Curvas de compactación de los materiales ensayados



### 3.2.2 Relaciones de vacíos máxima y mínima de otras arenas

En un trabajo publicado por Cubrinovski e Ishihara en 2002 muestran resultados de la caracterización de 300 arenas naturales, incluyendo arenas limpias y arenas con finos, con el objetivo de analizar la influencia de los finos, la composición granulométrica y la angulosidad de las partículas en la relación de vacíos máxima,  $e_{máx}$ , mínima,  $e_{mín}$ , y en el rango de relaciones de vacíos,  $e_{máx}-e_{mín}$ .

Tomaron algunas arenas como material base, a las cuales se les agregaron diferentes porcentajes de finos (10, 20, 30, hasta 80%), en su mayoría no plásticos. Se utilizaron tres métodos para determinar  $e_{máx}$  y  $e_{mín}$ : el procedimiento estipulado por la Sociedad Japonesa de Geotecnia (JGS) para arenas con menos del 5% de finos, el procedimiento de la Sociedad Americana para Ensayo de Materiales (ASTM) para suelos que contienen más de 15% de finos y procedimientos no estandarizados (NS).

En las figuras 3.4a y b se presentan resultados obtenidos por estos autores que muestran la variación de las relaciones de vacíos máxima y mínima con el porcentaje de finos. Al colocar en estos mismos gráficos los resultados experimentales obtenidos con el método de compactación utilizado en esta tesis se puede apreciar que para ambos materiales, tanto  $e_{máx}$  y  $e_{mín}$  caen dentro del intervalo de valores que arrojan los resultados reportados por los autores del artículo citado.

Al graficar ahora  $e_{máx}$  y el intervalo de relaciones de vacíos ( $e_{máx}-e_{mín}$ ) con respecto al diámetro de partícula correspondiente al 50% que pasa ( $D_{50}$ ), los cuales se muestran en las figuras 3.4c y d, se puede ver que al igual que con el porcentaje de finos, los resultados reportados en la tesis caen dentro de los intervalos reportados por Cubrinovski e Ishihara, lo cual garantiza la aplicación del método de compactación para la formación de probetas de arenas y la obtención de la compacidad relativa a partir de estos valores de relación de vacíos máxima y mínima.

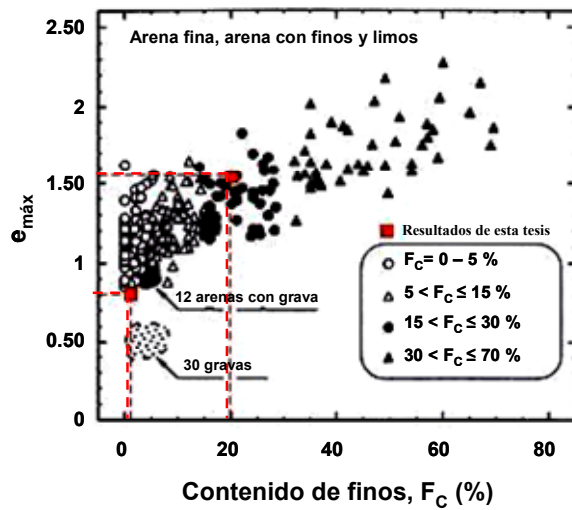
### 3.3 Procedimientos de ensaye e interpretación

Para colocar los instrumentos de desplazamiento axial y radial se divide la altura de la muestra en tres franjas de 8.60 cm cada una, para dar una altura total de 25.80 cm, tal como se ilustra en la figura 3.5a, de tal forma que se colocan sensores de desplazamiento axial en el cabezal (CS), tercio superior (TMS), y tercio inferior (TMI) y de desplazamiento radial en el tercio central (TMC). Al aplicar una señal periódica senoidal de excitación en el CS se registran las señales de desplazamiento axial en los TMS y TMI, y radial en el TMC, tal como se ilustra gráficamente en la figura 3.5b.

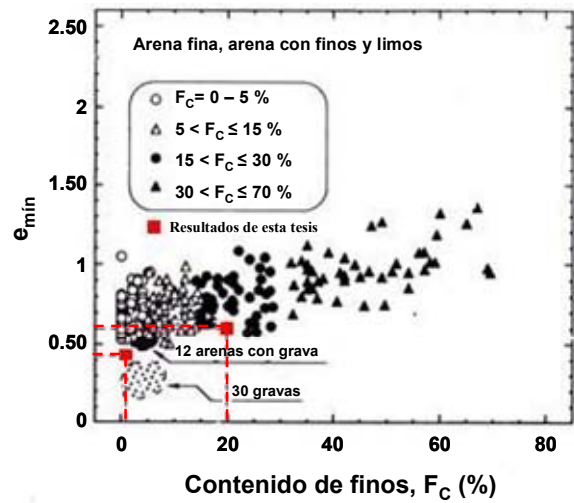
En la figura 3.6a se presentan resultados experimentales de los desplazamientos axiales en el CS, TMS y TMI. Como se puede observar, el valor de los desplazamientos disminuye conforme el punto de registro se desplaza del cabezal al pedestal. La señal del TMC resulta de la resta de las señales de los sensores del TMS y TMI, y representa el desplazamiento axial en la franja del tercio medio.

En la figura 3.6b se muestran las señales de desplazamiento radial. Al igual que los desplazamientos axiales, éstos también tienen una variación periódica senoidal, la cual en esta investigación resultó ser del orden de entre 10 y 30 veces menor que la de excitación en el CS.

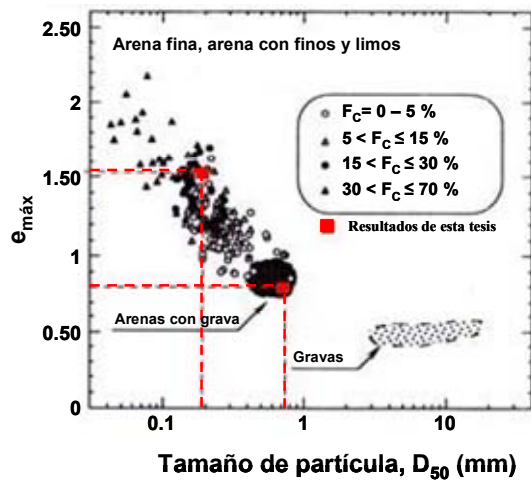
La prueba se realizó a desplazamiento controlado y se aplicaron veinte ciclos a una frecuencia de excitación de 1Hz. La semiamplitud de desplazamiento axial se incrementa entre cada serie de ciclos aplicados, hasta llevar la probeta a la falla. Al finalizar el ensaye se cuenta con una serie de archivos (uno para cada semiamplitud de desplazamiento) con resultados de desplazamiento axial en el CS, TMS y TMI, radial a la altura media de la muestra en dos puntos opuestos y carga en el exterior e interior de la cámara.



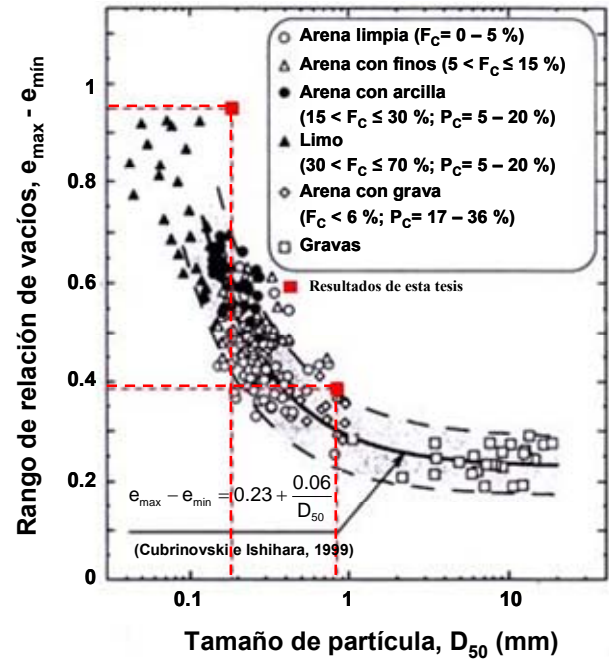
a)  $e_{m\acute{a}x}$  vs Contenido de finos



b)  $e_{m\acute{i}n}$  vs Contenido de finos



c)  $e_{m\acute{a}x}$  vs  $D_{50}$



d)  $e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}$  vs  $D_{50}$

Figura 3.4 Variación de  $e_{m\acute{a}x}$  y  $e_{m\acute{i}n}$  con el contenido de finos y  $D_{50}$  (Cubrinovsky e Ishihara, 2002)

### 3.4 Cálculo de parámetros

De cada archivo de desplazamiento vs tiempo y carga vs tiempo se selecciona un ciclo (en esta tesis se tomó el de la mitad de la señal; es decir, el ciclo diez de los veinte aplicados), a partir del cual se determina el módulo de rigidez al cortante dinámico.

### 3.4.1 Módulo de rigidez y distorsión angular

De la señal de carga y desplazamiento del ciclo seleccionado se grafica el ciclo de histéresis *carga* contra *desplazamiento axial* y a partir de éste y las dimensiones de la probeta se obtiene el de *esfuerzo cortante* contra *distorsión angular*. De este ciclo se obtiene la pendiente entre el punto máximo y mínimo para determinar el módulo de rigidez secante,  $G_{sec}$ , y la distorsión angular con doble o simple amplitud, tal como se muestra en la figura 3.7.

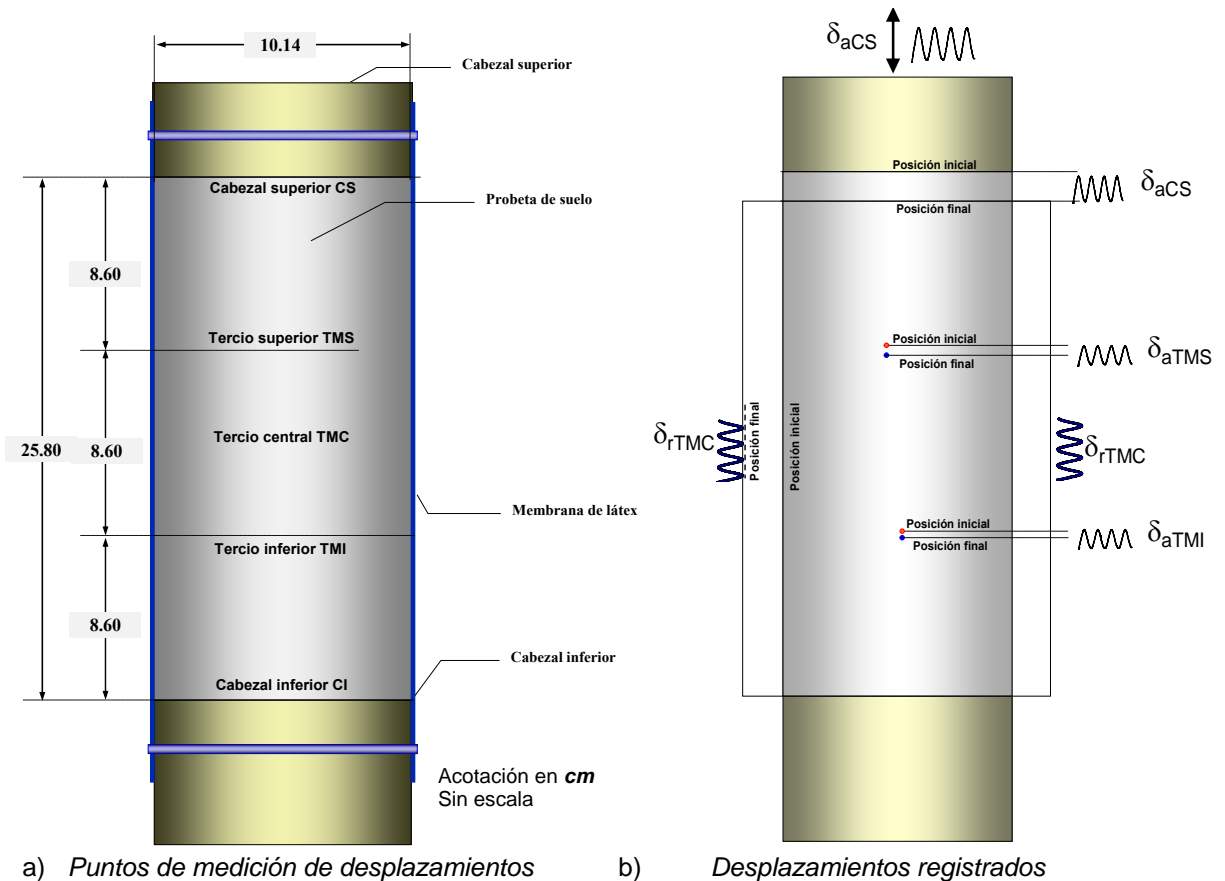


Figura 3.5 Desplazamientos axiales y radiales en la probeta de suelo

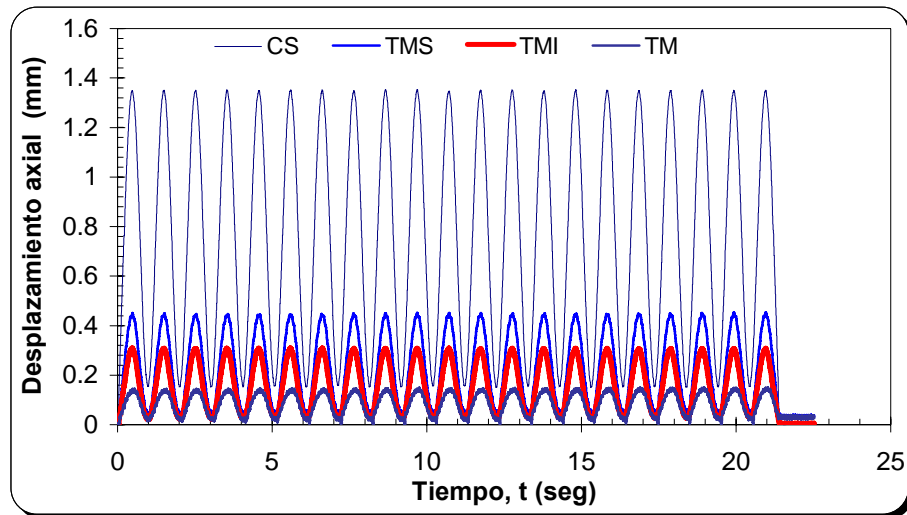
Para calcular los parámetros dinámicos de la base al CS y el correspondiente al TMC, se toma la señal de desplazamiento axial que le corresponde y se utiliza, para cualquiera de éstas, la señal de carga registrada con la celda de carga sumergible.

### 3.4.2 Relación de Poisson

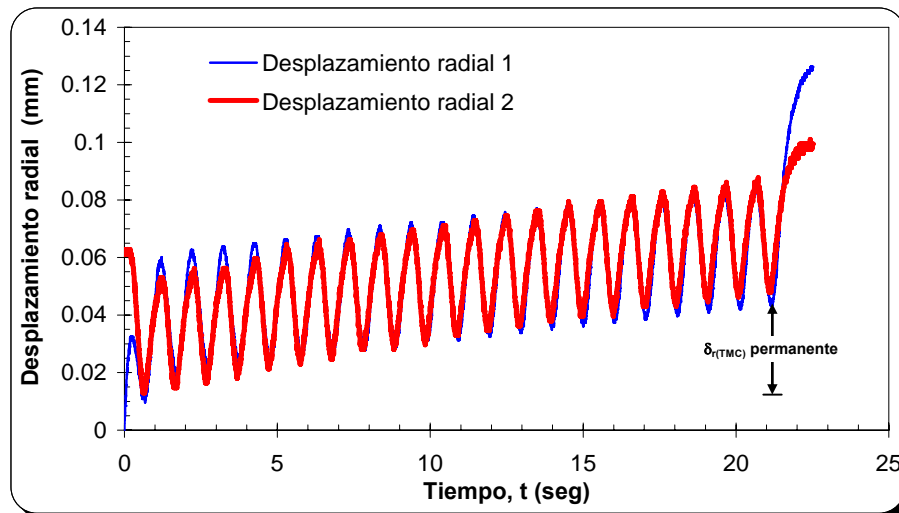
Para el cálculo de la relación de Poisson se toma el desplazamiento axial correspondiente al tercio central (TMC), como la diferencia punto a punto de las señales del TMS y TMI, tal como se muestra en la figura 3.8. El desplazamiento radial se obtiene del promedio de los desplazamientos radial  $\delta_{r1}$  y  $\delta_{r2}$ , tal como se ilustra en la figura 3.9.

Las deformaciones unitarias axial y radial en el TMC se obtienen con las señales pico a pico entre el espesor de la franja ( $H_0$ , aproximadamente 86 mm) para la deformación axial ( $\epsilon_a$ ) y entre el radio de la muestra ( $r_0$ , aproximadamente 50.7 mm), para la deformación radial ( $\epsilon_r$ ). La relación entre estos valores es la relación de Poisson.

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_a}$$



a) Desplazamientos axiales en CS, TMS y TMI



b) Desplazamientos radiales en el TMC de la muestra

Figura 3.6 Resultados experimentales de desplazamientos axiales y radiales

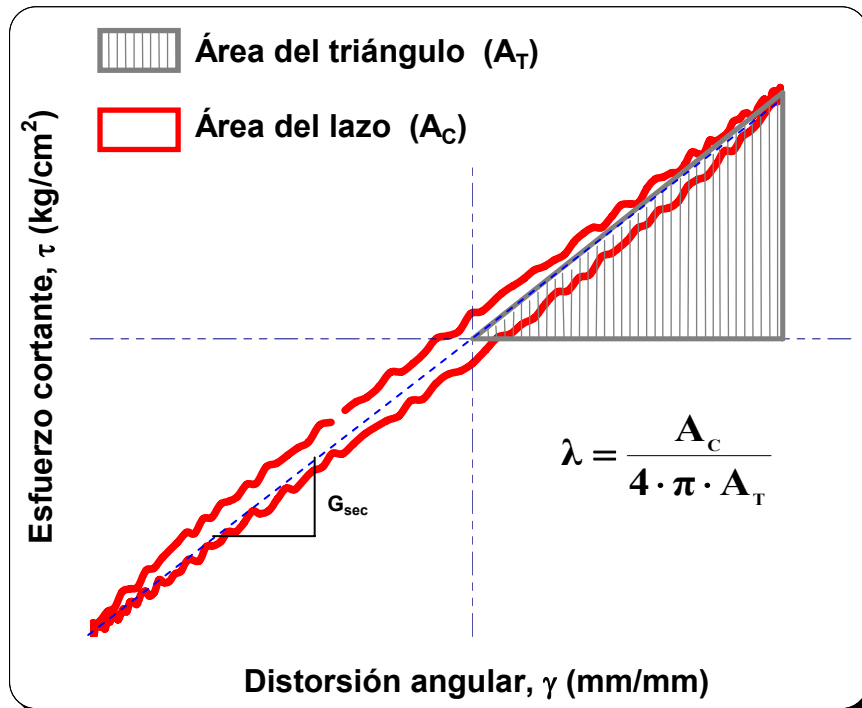


Figura 3.7 Cálculo del módulo de rigidez al cortante dinámico

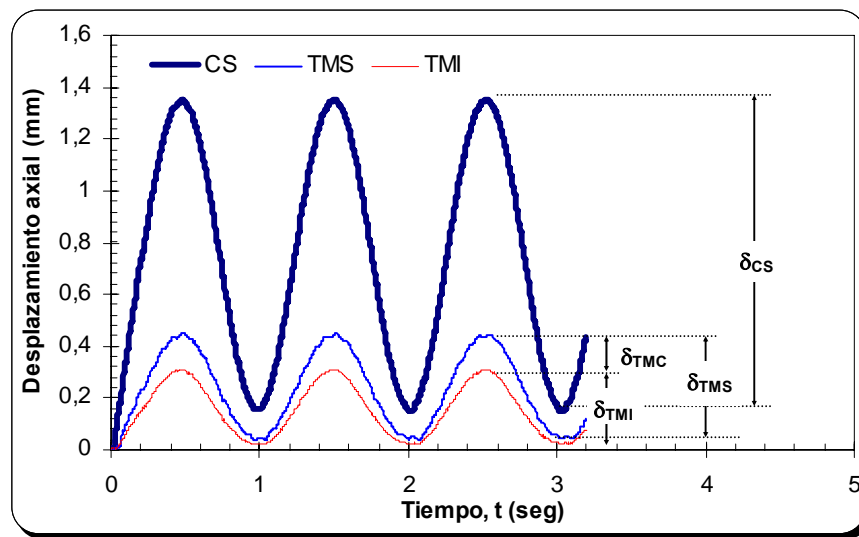


Figura 3.8 Medición de los desplazamientos axiales, a partir de las señales registradas

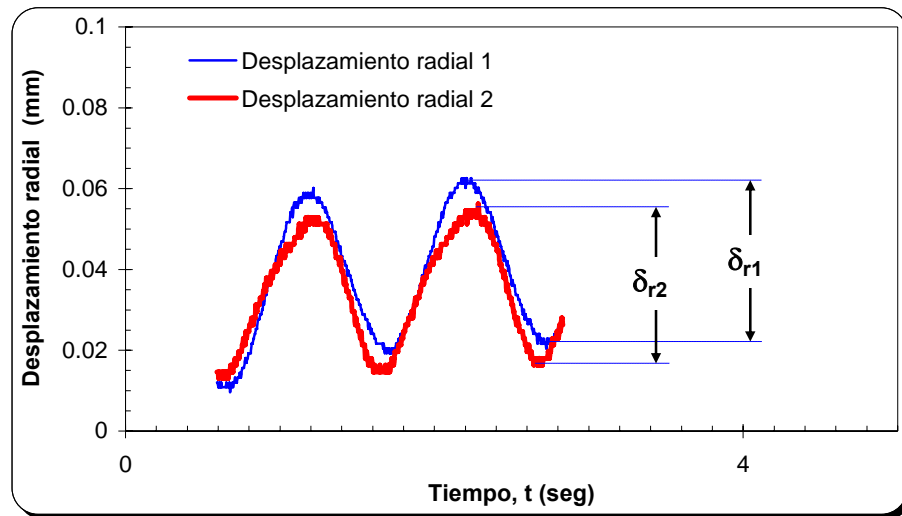


Figura 3.9 Medición de los desplazamientos radiales, a partir de las señales registradas

---

## **CAPÍTULO 4**

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

## 4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se mencionó en el capítulo 3, se ensayaron dos materiales en los cuales se determinó la relación de Poisson y el módulo de rigidez en condiciones dinámicas. Uno de los factores que afecta la magnitud de estos parámetros, pero principalmente del módulo de rigidez, es la compacidad relativa de la probeta antes de ser ensayada. Debido a las varias etapas que se siguen desde la formación de la probeta hasta su ensaye, es factible que la compacidad relativa al final de la formación de la muestra difiera de la que se tiene antes de su ensaye. Las variaciones serán más notables en muestras formadas con compacidades relativas bajas. Consecuentemente, deben evaluarse los cambios inducidos en cada etapa, desde la formación hasta el ensaye de la probeta.

### 4.1 Variación de la compacidad relativa en la etapa de formación de la probeta

Con el objetivo de identificar la forma en que varía la compacidad relativa a lo largo de la probeta en la etapa de su formación, se compactaron tres especímenes en un molde cilíndrico de acrílico transparente cuyas dimensiones son las mismas del que se utiliza para formar las probetas que se ensayan en el equipo triaxial. El material se compactó en capas intercaladas de suelo natural con material teñido de color rojo, tal como se muestra en la figura 4.1.

Al formar la probeta por capas se tomó la altura de la base del molde a la interfaz de cada una de ellas, como se ilustra en la figura 4.2, lo que permitió tener al final la variación del espesor de cada capa por la influencia de la colocación de las capas superiores. Estas alturas se tomaron en tres ejes de la muestra a  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $240^\circ$ , las cuales después se promediaron para tener el espesor de cada capa y la altura de la muestra conforme se añadían las capas.

En la tabla 4.1 se muestra un ejemplo ilustrativo de la forma en que se tomaron las alturas de las capas durante la formación de la probeta. En la primera columna se define la altura desde la base hasta la capa correspondiente ( $h_1, h_2, \dots, h_{10}$ ), en la parte superior de la tabla se indica la capa colocada y la posición en la que se tomó la lectura, de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $240^\circ$ . Después de compactar una nueva capa se tomaron las alturas de todas y cada una de las capas en los ángulos indicados, desde la primera hasta la última colocada. Se pudo determinar la disminución de la altura de cada franja de suelo al colocar una nueva capa de suelo y compactarla.

Con las alturas  $h_1, h_2, \dots, h_{10}$ , se obtuvieron los espesores de cada una de las capas conforme se colocan las capas subsecuentes, tal como se muestra en la tabla 4.2. El espesor por capa se obtuvo como el valor promedio de los espesores obtenidos en la capa en los tres puntos de medición. A partir de estos espesores promedio por capa se calcularon los espesores de las franjas de suelo, de la base a la capa analizada, los cuales se muestran en la tabla 4.3. Los resultados que corresponden a las capas cuatro a siete y que se encierran en un corchete corresponden al tercio medio de la probeta de suelo.

Puesto que se tienen las relaciones de vacíos máxima y mínima obtenidas con el método que se detalla en el capítulo 3, los espesores de cada capa (tabla 4.2) y la masa del suelo que se colocó en cada una de éstas, fue posible determinar la compacidad relativa por capa, la cual se muestra en las columnas indicadas en la tabla 4.4. Al igual que en los espesores, en los resultados mostrados en esta tabla se puede ver la influencia, en una capa específica, de la colocación de capas subsecuentes en la variación de su compacidad relativa. En la columna doce se muestra la "compacidad promedio de la probeta", la cual representa la compacidad relativa de la franja de suelo de la base a la capa que se enumera, de tal forma que el valor del último renglón, 51.77 %, es la compacidad relativa promedio de las diez capas de suelo; es decir, la compacidad relativa que se reporta de la probeta. Las tres últimas columnas reportan los resultados para el tercio central e indican: la antepenúltima, a partir de la capa cuatro, donde inicia la franja central, las capas colocadas durante la compactación; la penúltima, las capas del tercio central de las cuales se promedió la compacidad relativa; y en la última, la compacidad relativa promedio de las capas que se indican en la columna anterior y corresponde a la evolución de la compacidad relativa en el tercio central.



En la figura 4.3 se muestran los resultados de tres ensayos realizados, para compacidades relativas promedio de 51.77, 65.88 y 91.61 %. Con símbolos llenos se indica la compactación relativa promedio de la franja de suelo que va de la base a la capa que indica el numeral y con símbolos vacíos la compactación relativa de la franja del tercio medio. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que la compactación relativa varía en la primera y segunda capa y a partir de ésta se mantiene casi constante durante la colocación de las capas subsecuentes. Si se toma solamente la franja del TMC se aprecia que en este espesor las compactaciones relativas máxima y mínima son 53.33 y 52.70, respectivamente; es decir, una diferencia del orden del 1 %.

Los resultados mostrados indican que la compactación relativa medida axialmente en el tercio central se mantiene constante al colocar las capas subsecuentes, lo que nos permite hacer la consideración de que al final de la etapa de formación de la probeta, esta franja central es homogénea en cuanto a su compactación relativa en dirección longitudinal.

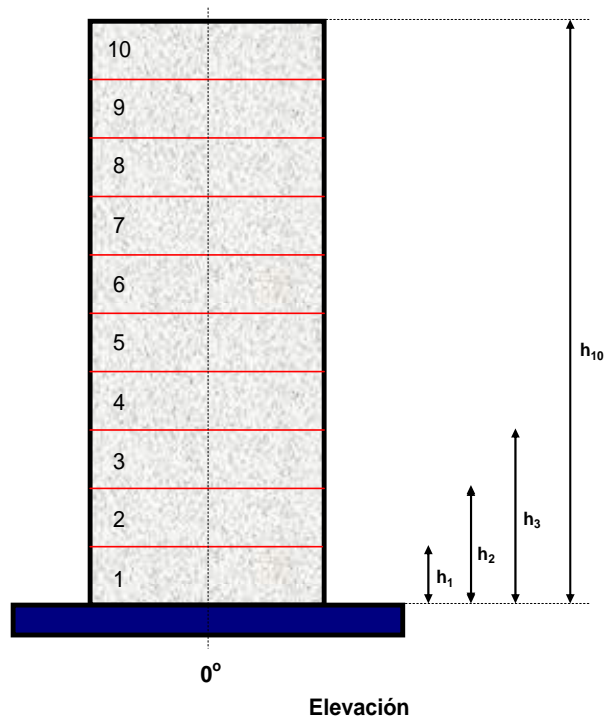
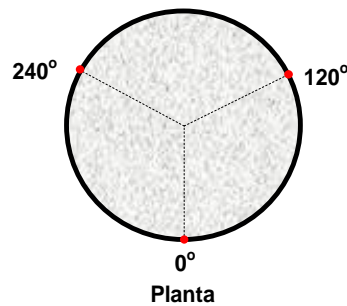


Figura 4.1 Fotografía de distribución de capas durante la formación de la muestra

Figura 4.2 Distribución de lecturas durante la formación de la probeta

Tabla 4.1 Lecturas tomadas a colocar cada una de las capas

Capas	1			2			3			8			9			10		
	Posición			Posición			Posición			Posición			Posición			Posición		
Alturas	0°	120°	240°	0°	120°	240°	0°	120°	240°	0°	120°	240°	0°	120°	240°	0°	120°	240°
h	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
h <sub>1</sub>	2.80	3.30	3.35	2.80	3.28	3.25	2.80	3.25	3.25	2.80	3.25	3.25	2.80	3.25	3.25	2.80	3.25	3.25
h <sub>2</sub>				6.15	6.00	6.35	6.20	6.00	6.35	6.20	6.05	6.35	6.20	6.00	6.35	6.20	6.00	6.35
h <sub>3</sub>							9.50	9.00	9.20	9.50	9.00	9.20	9.50	9.05	9.20	9.50	9.05	9.20
h <sub>4</sub>										12.40	11.80	12.10	12.40	11.80	12.10	12.40	11.80	12.10
h <sub>5</sub>										15.50	15.00	15.30	15.45	15.00	15.30	15.50	15.05	15.30
h <sub>6</sub>										18.45	17.90	18.20	18.45	17.85	18.20	18.45	17.85	18.20
h <sub>7</sub>										21.65	20.70	21.40	21.65	20.70	21.40	21.65	20.70	21.40
h <sub>8</sub>										24.55	23.80	24.30	24.55	23.80	24.30	24.55	23.80	24.35
h <sub>9</sub>										27.60	26.80	27.40	27.70	26.85	27.50	27.70	26.85	27.50
h <sub>10</sub>													29.95	29.95	29.95	29.95	29.95	29.95

Tabla 4.2 Espesores promedio de cada capa durante la formación de la probeta

Espesores		ESPESOR DE CAPA ANALIZADA									
Capa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TMC
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	
1	3.15	3.11	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10
2		3.06	3.08	3.08	3.08	3.08	3.10	3.08	3.10	3.08	3.08
3			3.05	3.05	3.05	3.05	3.03	3.05	3.03	3.03	3.07
4				2.88	2.88	2.88	2.87	2.87	2.87	2.87	2.85
5					3.12	3.13	3.17	3.17	3.15	3.18	3.18
6						2.95	2.93	2.92	2.92	2.88	2.88
7							3.03	3.07	3.08	3.08	3.08
8								2.97	2.97	2.98	2.98
9									3.05	3.12	3.12
10										2.60	2.60

Tabla 4.3 Espesores promedio de la franja de suelo que va de la base a la capa colocada

Espesores		ESPESOR DE FRANJA ANALIZADA									
Capa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TMC
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	
1	3.15	3.11	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10
2		6.17	6.18	6.18	6.18	6.18	6.20	6.18	6.20	6.18	6.18
3			9.23	9.23	9.23	9.23	9.23	9.23	9.23	9.23	9.25
4				12.12	12.12	12.12	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10
5					15.23	15.25	15.27	15.27	15.25	15.28	15.28
6						18.20	18.20	18.18	18.17	18.17	18.17
7							21.23	21.25	21.25	21.25	21.25
8								24.22	24.22	24.23	24.23
9									27.27	27.35	27.35
10										29.95	29.95

Tabla 4.4 Compacidad relativa por capa, correspondiente a la franja de suelo que va de la base a la capa colocada y la del tercio medio

Capa	COMPACIDAD RELATIVA POR CAPA										Dr prom. en probeta	Dr en tercio medio central		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Capas colocadas	Capas promediadas	Dr %
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%				
1	44.60	47.49	48.21	48.21	48.21	48.21	48.21	48.21	48.21	48.21	44.60			
2		49.42	48.82	48.82	48.82	48.82	48.21	48.82	48.21	48.82	48.46			
3			49.82	49.82	49.82	49.82	49.82	49.82	49.82	49.42	48.95			
4				53.33	53.33	53.33	53.63	53.63	53.63	53.63	50.04	4	4	53.33
5					52.07	51.82	51.58	51.58	51.82	51.34	50.45	4,5	4,5	52.70
6						53.03	53.03	53.23	53.43	53.43	50.84	4,5,6	4,5,6	52.73
7							52.86	52.86	52.86	51.07	51.07	4,5,6,7	4,5,6,7	52.82
8								53.48	53.48	53.33	51.45	4,5,6,7,8	4,5,6,7	52.82
9									53.30	52.63	51.64	4,5,6,7,8,9	4,5,6,7	52.94
10										53.99	51.77	4,5,6,7,8,9,10	4,5,6,7	52.81

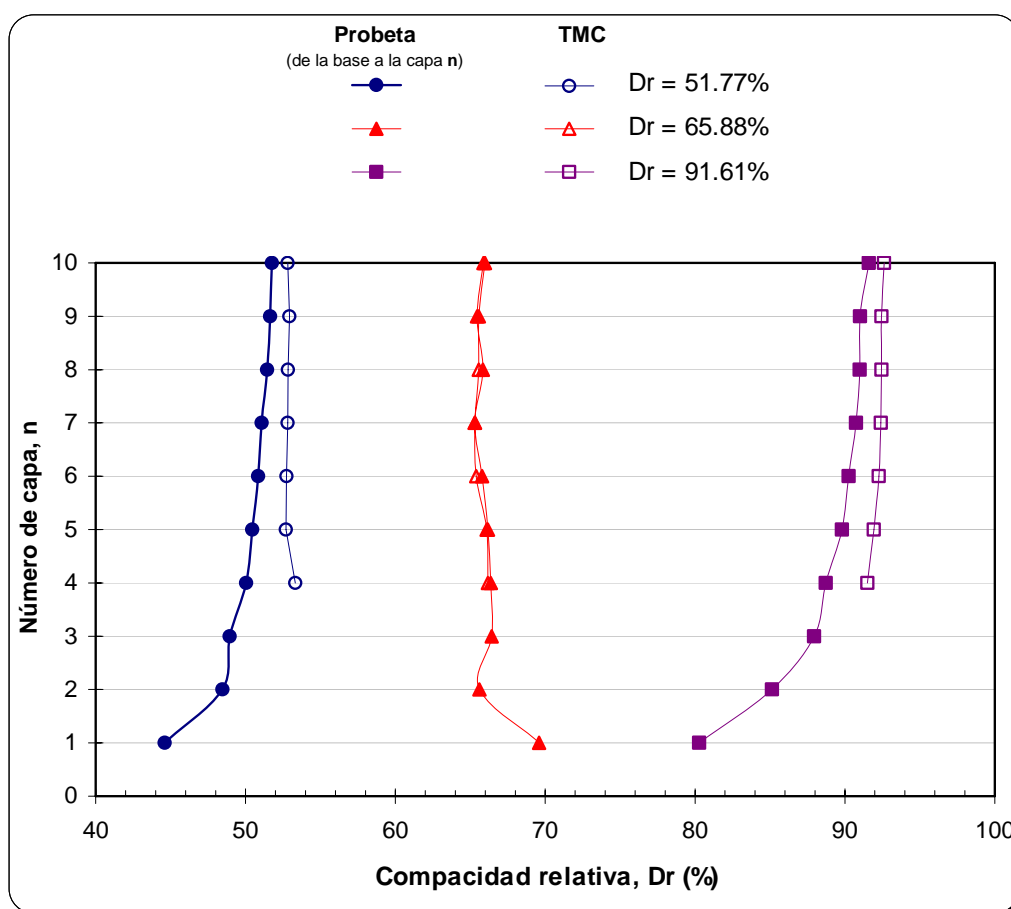


Figura 4.3 Variación de la compactación relativa a lo largo de la probeta en la etapa de formación

#### 4.2 Corrección de cambio volumétrico

La probeta de suelo pasa por diferentes etapas, desde su montaje hasta la aplicación de la excitación dinámica, y en algunas de estas etapas sufre densificación. En este apartado se define la metodología para evaluar cuánto se densifica la muestra en las diferentes etapas del ensayo, desde la formación del espécimen hasta el inicio de la etapa de falla.

Al momento de formar la probeta se puede estimar la compactación relativa tomando como volumen de la probeta la correspondiente al molde en el que se formó, que se denominará compactación relativa sin vacío,  $Dr_{sv}$ . En la etapa de montaje en la cámara triaxial, cuando se tiene la muestra de suelo en la cámara (con la membrana sujeta con arosellos en el cabezal y el pedestal), para evitar se destruya la probeta antes de retirar el molde, se aplica 14.7 kPa ( $0.15 \text{ kg/cm}^2$ ) de vacío a la muestra. Este vacío genera una reducción de su volumen y con esto una densificación. Se toman las dimensiones de la probeta y se calcula la compactación relativa con vacío,  $Dr_{cv}$ . Con estas compactaciones relativas obtenidas se estima el valor de  $\beta_1 = Dr_{cv} / Dr_{sv}$  que corresponde al incremento de la compactación relativa al aplicar el vacío al espécimen.

En las figuras 4.4 y 4.5 se aprecia que el vacío aplicado no afecta a probetas con compactaciones relativas iniciales iguales o mayores a 60 % y que para probetas con compactaciones relativas iniciales cercanas a 20 %, el incremento puede llegar a ser de hasta el doble del inicial. Esto indica que en realidad sólo se ensayan probetas con compactaciones relativas cercanas a 40 % o mayores, ya que si tenemos la compactación más baja que podamos formar en el molde (20 %), al montarla en la cámara y aplicarle vacío ésta se densificará y llegará a valores cercanos a 40 %.

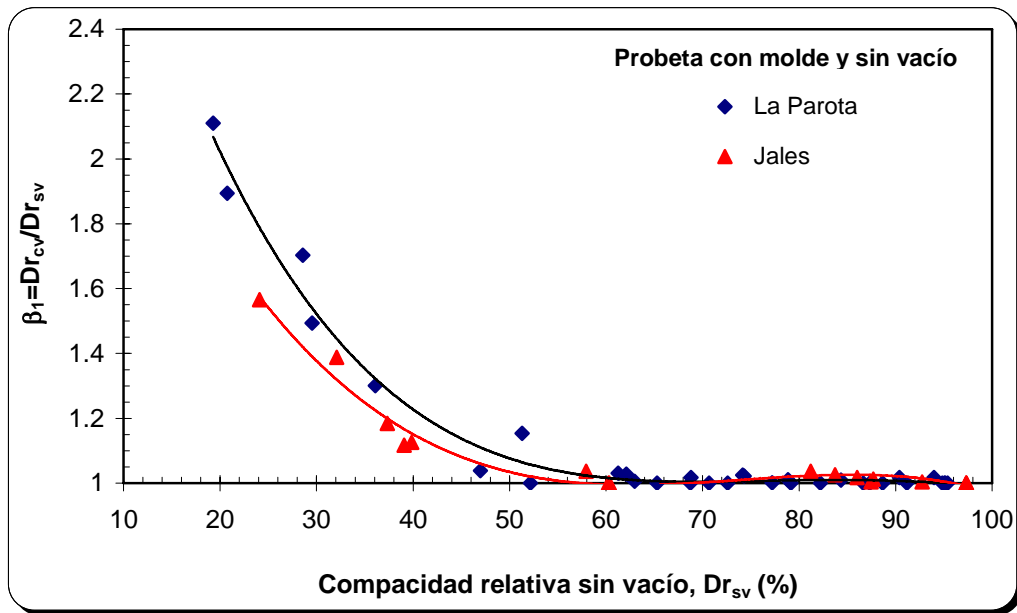


Figura 4.4 Variación de la compacidad relativa inicial con la aplicación del vacío regulado a 14.7 kPa (0.15 kg/cm<sup>2</sup>)

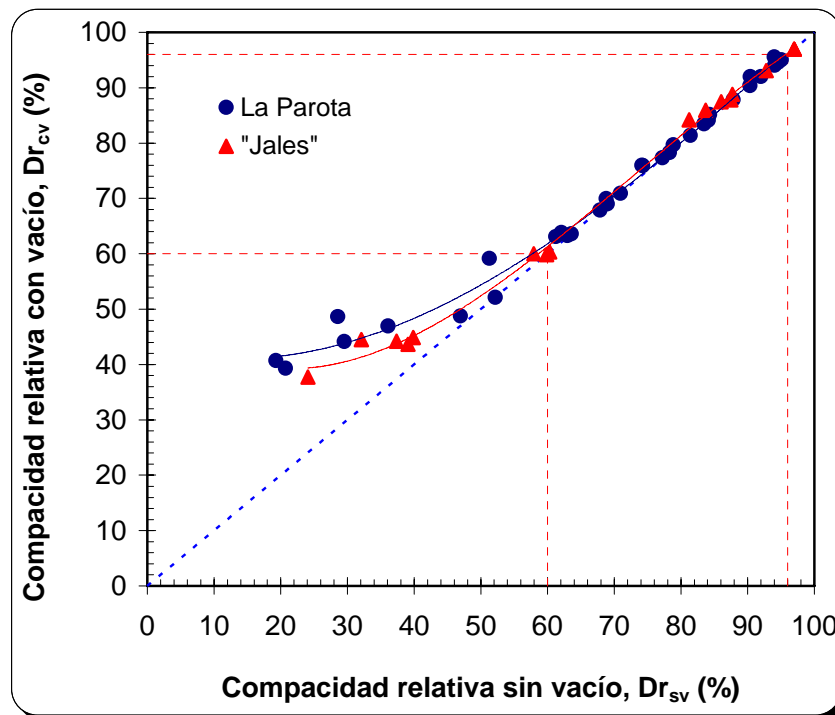


Figura 4.5 Relación entre las compacidades relativas antes y después de aplicar el vacío a la probeta

Manteniendo el vacío aplicado, se fijan los sensores de desplazamiento axial y radial, se coloca la cámara de acrílico y se aplica el esfuerzo de confinamiento. Esto genera la segunda densificación de la probeta, la cual es posible estimar ya que se cuenta con las lecturas de los sensores de desplazamiento antes y después de aplicar el confinamiento. Debido a que en la etapa experimental para determinar los parámetros mecánicos del suelo no se cuantificó esta densificación, fue necesario hacer una serie de ensayos para estimar el cambio de volumen con la aplicación del esfuerzo de confinamiento, los cuales se discuten a continuación.

Debido a que las probetas de suelo se ensayaron en condiciones no consolidadas no drenadas (UU), parcialmente saturadas (contenidos de agua de 0 a 6.5 %), fue necesario estimar la variación del volumen al someter el espécimen a un esfuerzo de confinamiento isotrópico. Se formaron probetas con densidades que cubren todo el intervalo de compacidades relativas que el método de formación de probetas permite obtener.

Para calcular el incremento en la compacidad relativa respecto a la que se obtiene al aplicar el vacío, se tomó como referencia la franja del tercio central, en la cual se midieron las deformaciones axiales con los LVDT's instalados en los tercios inferior y superior, los cuales registran el desplazamiento relativo en el punto en el cual están colocados y los desplazamientos radiales con los sensores magnéticos, que toman el valor promedio del desplazamiento en la franja del tercio central. Se consideró el tercio central debido a que la interpretación de los resultados de los ensayos corresponde a esta zona de la probeta. La diferencia de los desplazamientos registrados por los LVDT define el desplazamiento axial, mientras que el desplazamiento radial se obtiene como el promedio del desplazamiento registrado en los dos sensores de no contacto (ver figuras 3.8 y 3.9 del capítulo 3).

Para estimar el cambio de volumen en la probeta se ejecutaron 18 ensayos, 9 en el material de La Parota y 9 en los Jales, sometidos a esfuerzos de confinamiento entre 49 y 196 kPa (0.50 y 2 kg/cm<sup>2</sup>), tal como se muestra en la tabla 4.5. La formación y montaje de las probetas se realizaron conforme al procedimiento que se describe detalladamente en el capítulo 3.

En las etapas de montaje, aplicación de vacío regulado y de presión de confinamiento se llevó un registro de los desplazamientos axiales y radiales de la muestra, por lo tanto fue posible obtener la compacidad relativa de las muestras al aplicar el vacío a la probeta ( $Dr_{cv}$ ) y luego se someterlo al esfuerzo isotrópico de confinamiento ( $Dr$ ).

Se definió la relación entre la compacidad relativa obtenida al someter al suelo al esfuerzo de confinamiento ( $Dr$ ) y la compacidad relativa de la probeta con vacío,  $Dr_{cv}$ , como  $\beta_2$  ( $\beta_2=Dr/Dr_{cv}$ ). Esta variable representa el cambio de la compacidad relativa debida a la presión de confinamiento, respecto a la que se tiene después de aplicar el vacío regulado.

Tabla 4.5 Ensayos realizados para determinar el cambio volumétrico de las muestras al aplicar el esfuerzo de confinamiento

La Parota			Jales SLP		
Prueba No.	$Dr_{cv}$ %	$\sigma_c$ kPa	Prueba No.	$Dr_{cv}$ %	$\sigma_c$ kPa
1	32.23	49, 98 y 196	1	37.73	98 y 196
2	81.72	49, 98 y 196	2	37.87	49, 98 y 196
3	95.04	49, 98 y 196	3	37.88	98 y 196
4	95.28	49, 98 y 196	4	44.67	49, 98 y 196
5	95.59	49, 98 y 196	5	60.32	49, 98 y 196
6	42.13	49, 98 y 196	6	84.32	49, 98 y 196
7	51.01	49, 98 y 196	7	93.39	196.00
8	63.83	49, 98 y 196	8	93.47	98 y 196
9	75.25	49, 98 y 196	9	93.49	49, 98 y 196

El porcentaje de incremento de la compacidad relativa en la probeta depende de su valor inicial (después de haber aplicado vacío) y del esfuerzo de confinamiento que se aplique. Para los materiales más sueltos sometidos al esfuerzo de confinamiento más alto, como es de esperarse, se presenta el mayor cambio en la compacidad relativa. En el caso de los jales este aumento es del orden del 22 %, mientras que para el material de La Parota de 28 % (figuras 4.6 y 4.7). Para los materiales con las compacidades relativas iniciales más altas, la variación al ser sometida a confinamientos de 196 kPa (2 kg/cm<sup>2</sup>) representa incrementos menores al 2 %, en ambos materiales. Por tanto, la variación en la compacidad relativa se encuentra en el intervalo del 2 al 28 % entre los materiales más densos y los más sueltos, respectivamente.

En la figura 4.8 se muestra la variación del valor de  $\beta_2$  con la compacidad relativa con vacío ( $Dr_{cv}$ ), para los tres niveles de esfuerzo aplicados. Aquí se observa que, como se pudo ver en las dos figuras anteriores, conforme aumenta la compacidad relativa inicial, el valor de  $\beta_2$  es menor. A este juego de curvas fue posible ajustarlas ecuaciones de un polinomio de cuarto orden, los cuales se incluyen en la figura 4.8.

Al aplicar el esfuerzo de confinamiento, la variación más importante en el valor de  $\beta_2$  se presenta en el intervalo de 40 a 60 % de compacidad relativa inicial. Después de este punto,  $\beta_2$  sigue disminuyendo pero con una tasa de cambio despreciable.

Los resultados experimentales obtenidos permiten cuantificar la compacidad relativa de la probeta sometida a cualquier esfuerzo de confinamiento, a partir de la compacidad relativa que se tiene al final de la formación la probeta,  $Dr_{sv}$ .

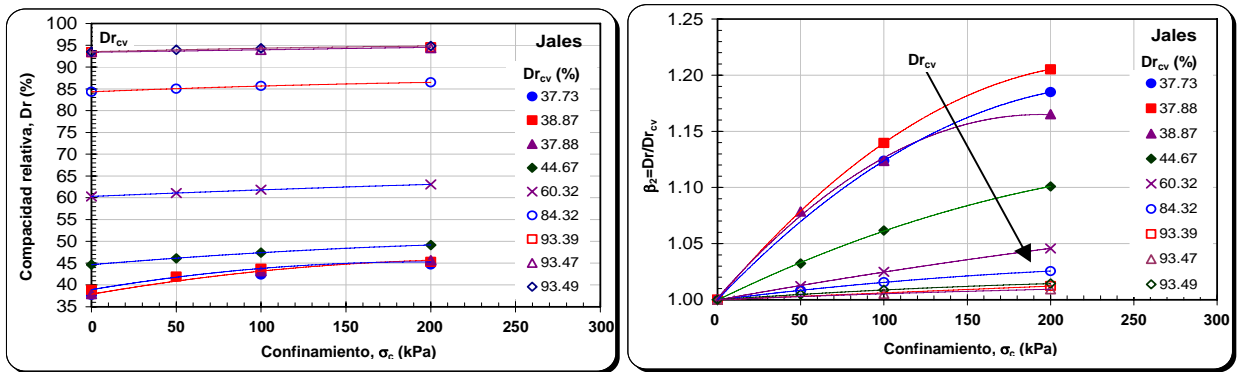


Figura 4.6 Variación de la compacidad relativa inicial con el esfuerzo de confinamiento, Jales SLP

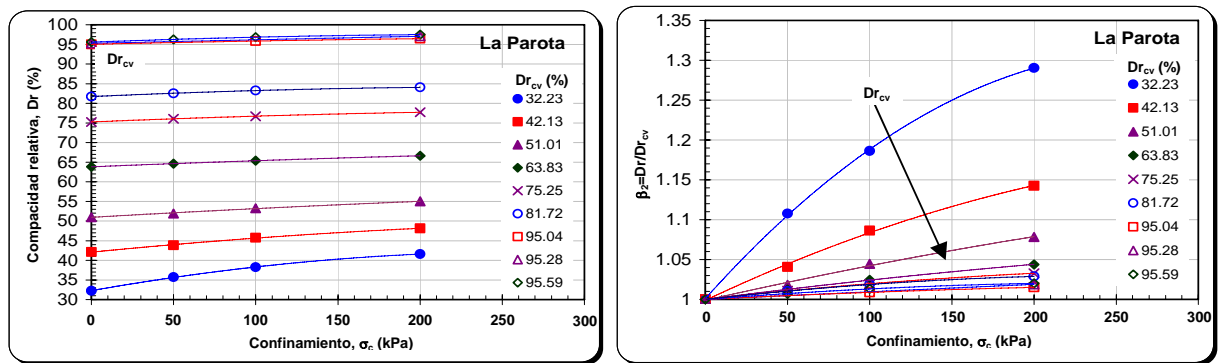


Figura 4.7 Variación de la compacidad relativa inicial con el esfuerzo de confinamiento, La Parota

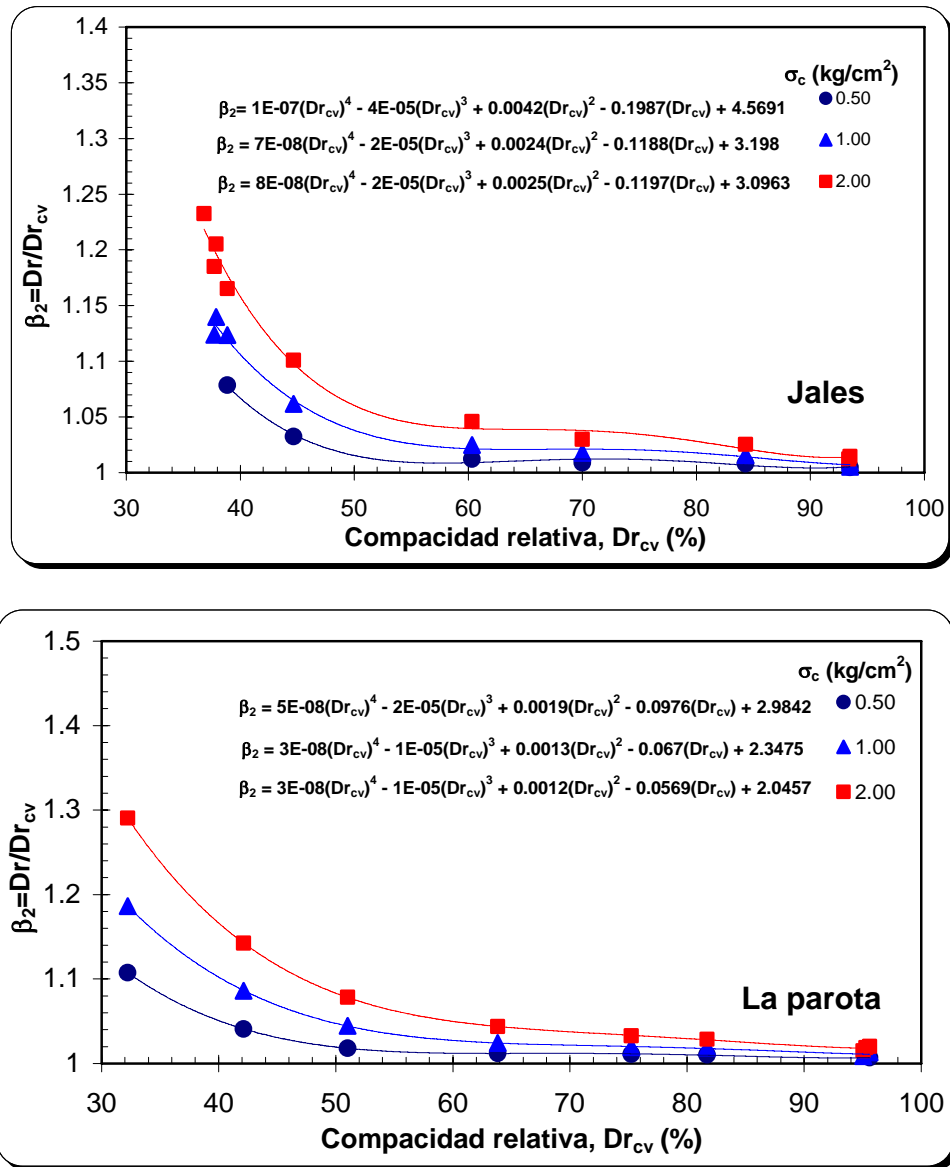


Figura 4.8 Variación de  $\beta_2$  con el esfuerzo de confinamiento

En las figuras 4.9 y 4.10 se muestra la historia de la variación de la compacidad relativa desde la formación de la probeta, la aplicación del vacío para retirar el molde y de los esfuerzos de confinamiento isotrópico. Se aprecia, como ya se ha comentado, que para las compacidades relativas menores de 40 % la aplicación del vacío induce un incremento importante en la compacidad relativa. Arriba del 60 % de compacidad relativa, la variación de ésta en las diferentes etapas del ensaye es poco apreciable.

En la figura 4.9b y 4.10b se muestra la historia de la variación de la relación  $Dr_{cv}/Dr_{sv}$  para las diferentes etapas de preparación del espécimen y se aprecia que para los materiales que se formaron en las condiciones más sueltas, con compacidades relativas del orden del 20 al 40 %, la densificación de la probeta es importante al aplicarle el vacío regulado. En ambos materiales, al rebasar el 60 % de compacidad relativa al momento de formar la probeta, el incremento total es menor del 10 %.

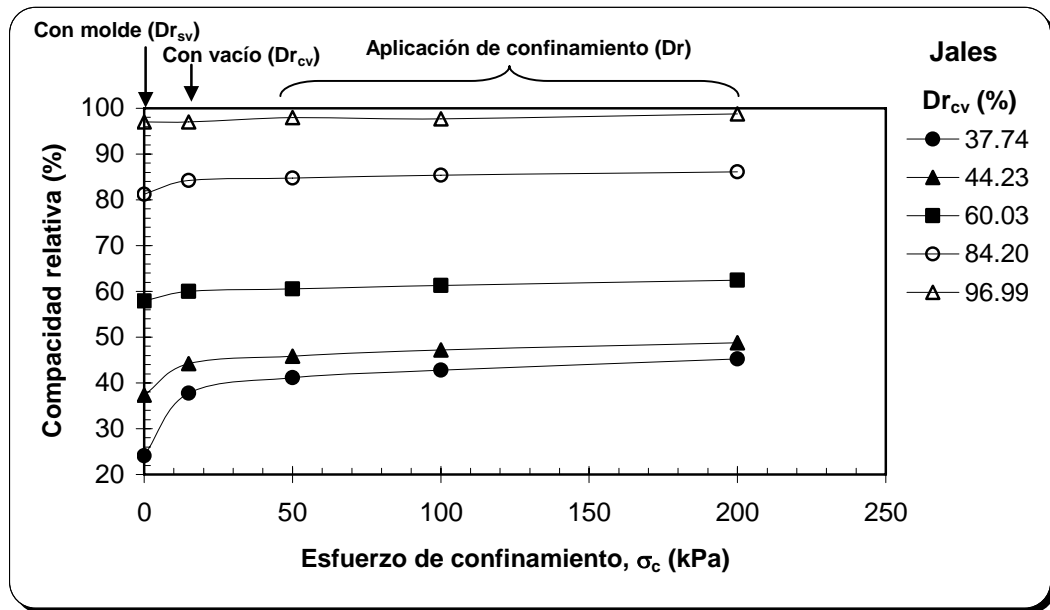
Para los materiales más sueltas, los jales tienen un incremento total en la Dr de 1.9 veces la compacidad relativa con la que se formó la probeta, mientras que para el material de La Parota el incremento es de 2.4 veces. Esta diferencia puede deberse, en parte, a que el material de La Parota presenta una distribución más uniforme de tamaños de partícula.

Los resultados mostrados en las figuras 4.9 y 4.10 indican que para el intervalo de esfuerzos de confinamiento considerado en este estudio, el mayor efecto en la densificación de las muestras se tiene al aplicar el vacío.

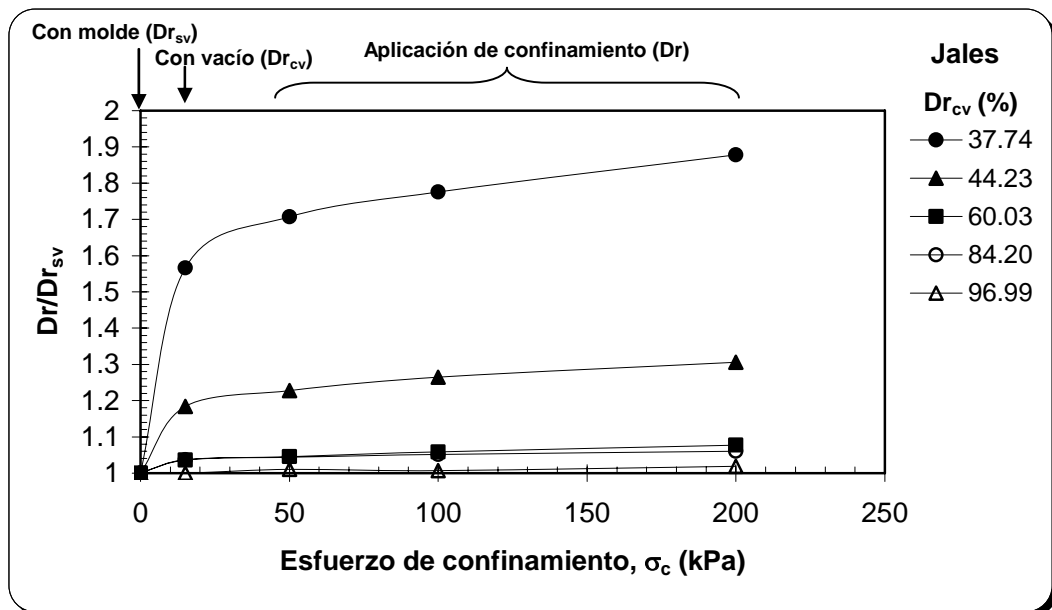
Durante la aplicación del esfuerzo desviador cíclico la probeta puede sufrir cambios en la compacidad relativa difíciles de cuantificar, porque aunque se cuenta con las lecturas de los sensores de desplazamiento radial y axial en el tercio central de la muestra, no se conoce la variación de la masa de suelo en esa franja durante la aplicación de la carga cíclica. Sin embargo, considerando los resultados antes mostrados, se puede argumentar que estos cambios son despreciables.

Las compacidades relativas que se utilizan subsecuentemente corresponden a las que resultan después de modificar el valor de las compacidades relativas al término de la formación de las probetas, conforme a los efectos de las diferentes etapas seguidas antes de ensayar los especímenes.



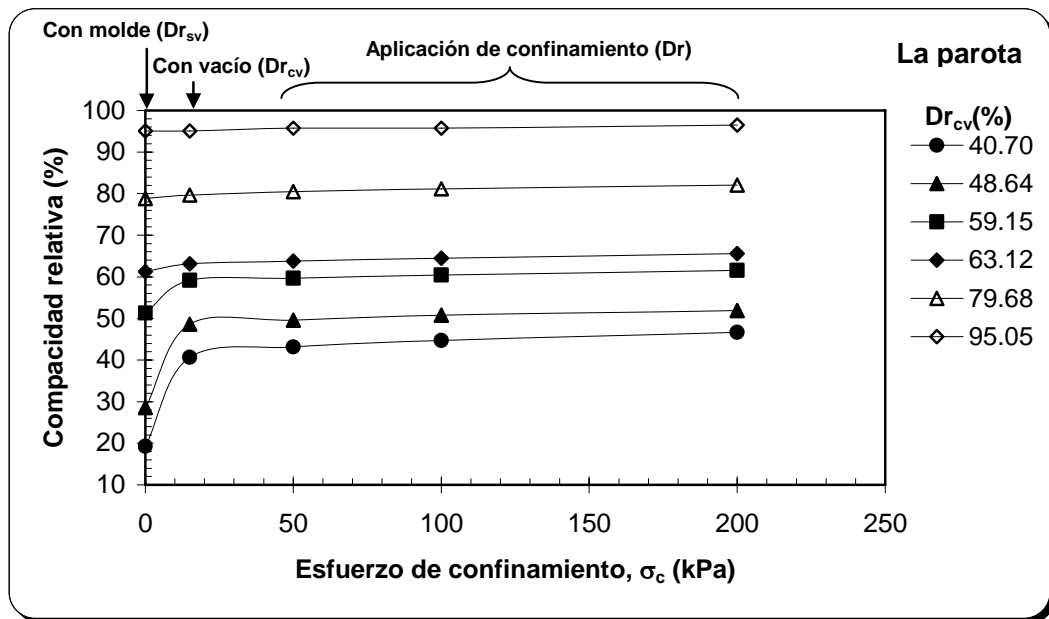


a) Historia de la compactación relativa en diferentes etapas del ensaye

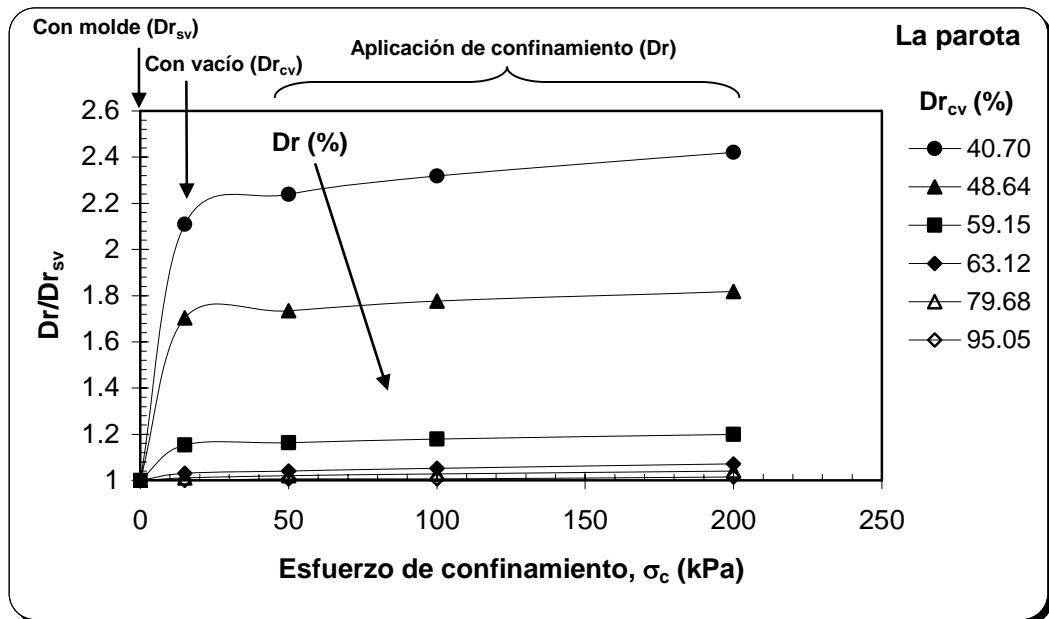


b) Cambio en la compactación relativa del espécimen en diferentes momentos, antes del ensaye

Figura 4.9 Historia de la variación de la compactación relativa en los residuos mineros



a) Historia de la compactación relativa en diferentes etapas del ensaye



b) Cambio en la compactación relativa del espécimen en diferentes momentos, antes del ensaye

Figura 4.10 Historia de la variación de la compactación relativa en el material de La Parota

### 4.3 Relación de Poisson

Al graficar los resultados experimentales de deformación unitaria radial y axial de cada semiamplitud se obtuvieron gráficos como el que se muestra en la figura 4.11. En este gráfico cada punto corresponde a las deformaciones axiales y radiales para una semiamplitud, conforme se incrementa ésta aumentan las deformaciones axiales y radiales. Se aprecia que la variación de las deformaciones axiales y radiales es prácticamente lineal, de tal forma que al obtener la línea de tendencia con mínimos cuadrados (ver ecuación en la figura 4.11), la pendiente de la línea corresponde a la relación de Poisson media del suelo para esas condiciones de esfuerzo, compacidad relativa y humedad. Debido a que algunos de los gráficos no tenían como ordenada el origen, se decidió hacer la corrección de ordenada, manteniendo constante la pendiente definida por los puntos, se corrigieron los valores de deformación unitaria radial para que la ordenada fuese cero o muy cercano a éste. Para el caso mostrado en la figura 4.11 la relación de Poisson dinámica es del orden de 0.26.

En el anexo A se muestran las gráficas de deformación radial vs deformación axial para todos los ensayos realizados, ordenados de tal forma que permiten ver la influencia de la compacidad relativa, el esfuerzo de confinamiento y el contenido de agua en la variación de la relación de Poisson.

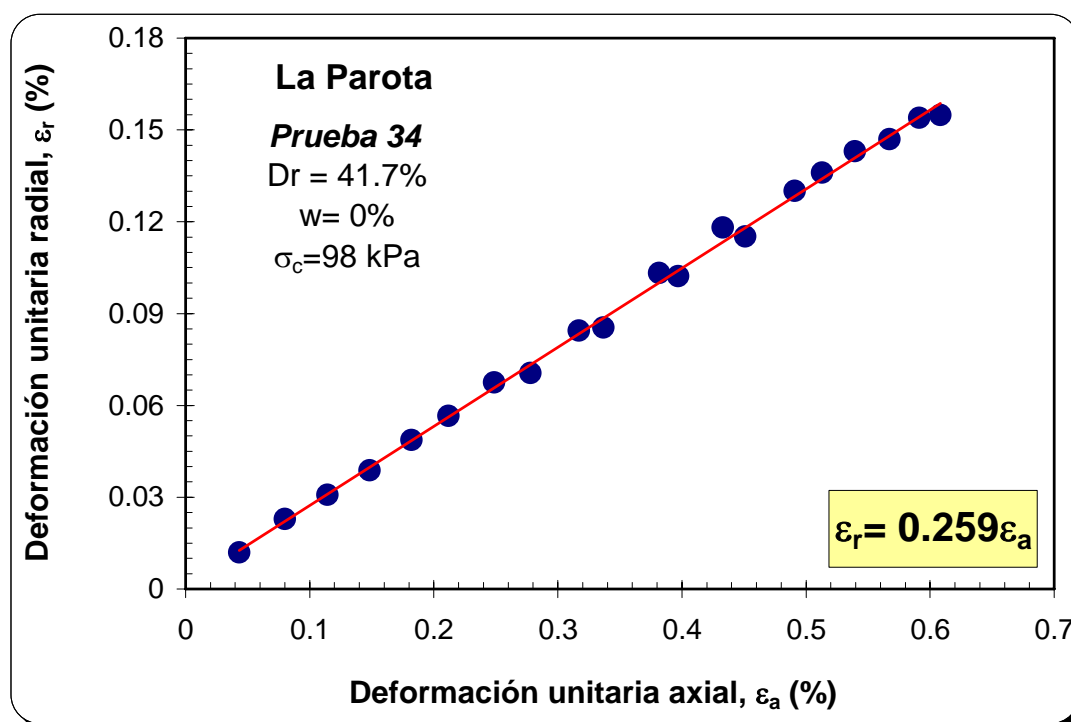
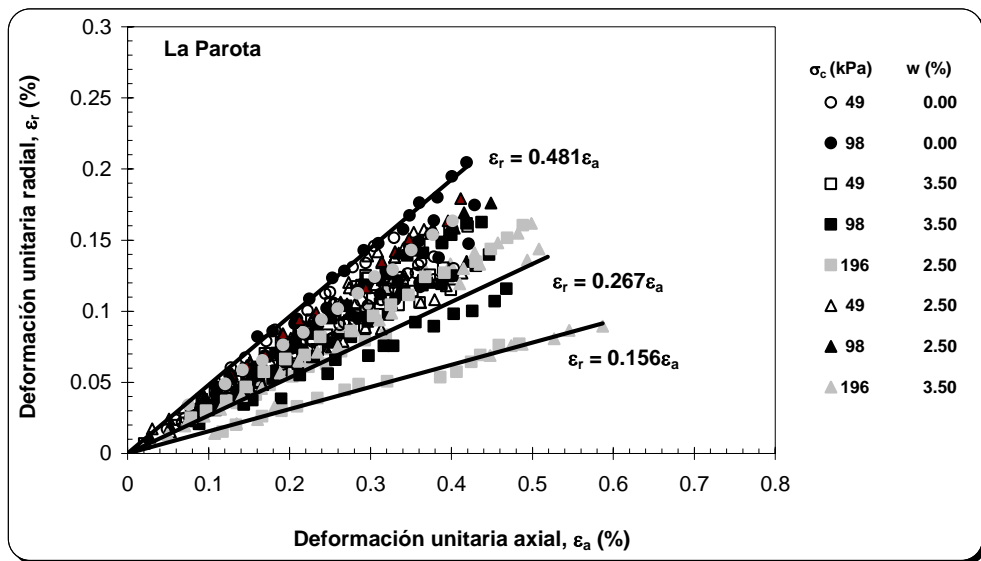
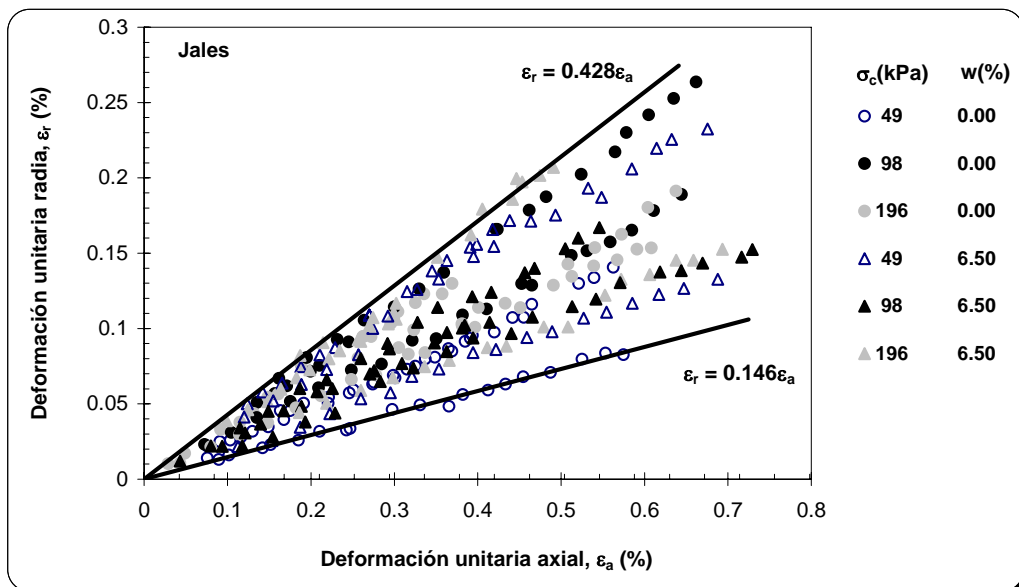


Figura 4.11 Determinación de la relación de Poisson dinámica

En la figura 4.12 se muestran las curvas de deformación radial versus deformación axial para los ensayos que se realizaron en los dos materiales estudiados. Al tener los gráficos juntos se puede observar el intervalo de variación de la relación de Poisson para cada suelo: Para el material de La Parota los valores de relación de Poisson mínimo y máximo son de 0.156 y 0.481, respectivamente, mientras que para los Jales son de 0.146 y 0.428. Para el material de La Parota, exceptuando los resultados de dos ensayos, el resto están dentro de un intervalo de 0.267 a 0.481.



a) La Parota



b) Jales

Figura 4.12 Resumen de las deformaciones unitarias axiales y radiales de los suelos ensayados

### 4.3.1 Material SP-Arena mal graduada (La Parota)

Se ensayaron 34 probetas, variando la compactación, el esfuerzo de confinamiento y el contenido de agua, con el objetivo de analizar la influencia de estos parámetros en la variación de la relación de Poisson dinámica y el módulo de rigidez al corte dinámico. Los intervalos en los que se variaron éstos fueron: la compactación, de 40.7 a 94.6 %; el esfuerzo de confinamiento, valores de 49, 98 y 196 kPa (0.50, 1 y 2 kg/cm<sup>2</sup>); y el contenido de agua, de 0, 2.5 y 3.5 %. Este último, de acuerdo con la figura 4.3a, cubre el contenido de agua correspondiente al óptimo.

En la tabla TA-1 del anexo A se presenta el programa de ensayos desarrollado, e incluye el diámetro, altura, peso, contenido de agua, peso volumétrico, y compacidad relativa después de aplicar confinamiento en cada probeta. Las muestras se ensayaron con el contenido de agua con el que se formaron, en condiciones UU.

Los resultados de los ensayos realizados se agruparon por contenido de agua, esfuerzo de confinamiento, y compacidad relativa, con el objetivo de identificar la influencia de cada uno de ellos en el comportamiento del suelo. En las figuras A-1 a A-9 del anexo A se muestran las curvas de deformación radial vs deformación axial, agrupadas de forma tal que se pueda identificar la influencia del confinamiento, la compacidad relativa y el contenido de agua en la variación de la relación de Poisson. Se determinan los valores de la relación de Poisson como la pendiente de la línea de regresión lineal de los resultados experimentales  $\epsilon_r$  vs  $\epsilon_a$ , los cuales se resumen en las próximas figuras que se muestran en este capítulo.

#### 4.3.1.1 Efecto de la Compacidad relativa

En la figura 4.13 se presenta la influencia de la compacidad relativa en la variación de la relación de Poisson, para los tres contenidos de agua y los tres esfuerzos de confinamiento utilizados. En la figura 4.13a se muestran los resultados para el material seco, donde se puede observar que, a pesar de la dispersión, la tendencia indica que en las muestras con esfuerzos de confinamiento entre 49 y 196 kPa (0.50 y 2 kg/cm<sup>2</sup>) la influencia de la compacidad relativa inicial y el esfuerzo de confinamiento son poco importantes en la variación de la relación de Poisson, ésta se mantiene entre 0.326 y 0.459; pero no se aprecia una tendencia clara a bajar o subir con la compacidad relativa.

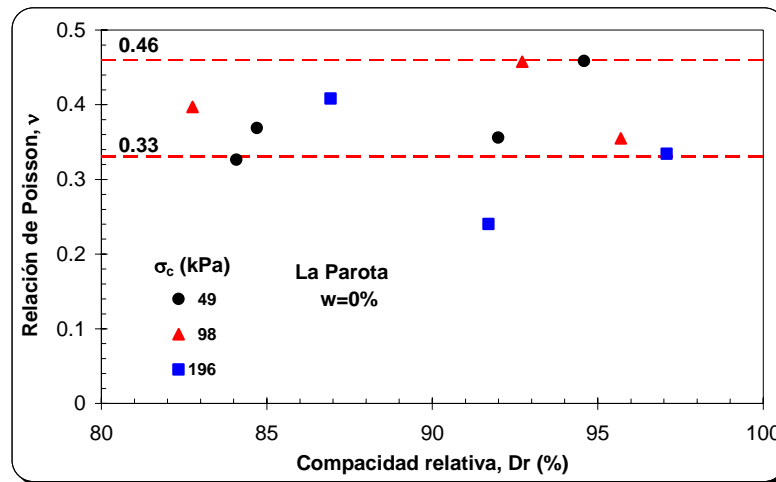
En las probetas sometidas a 98 kPa (1 kg/cm<sup>2</sup>) la relación de Poisson se encuentra entre 0.33 y 0.457 para compacidades relativas entre 82.76 % y 95.70 %, igualmente sin una tendencia clara al aumentar la compacidad relativa.

Las que se sometieron a un esfuerzo de confinamiento de 196 kPa (2 kg/cm<sup>2</sup>) la relación de Poisson varía en un intervalo de 0.24 y 0.40, con una diferencia de 0.16. Se puede apreciar que para los tres niveles de esfuerzos aplicados el intervalo de variación de la relaciones de Poisson está entre 0.10 y 0.16.

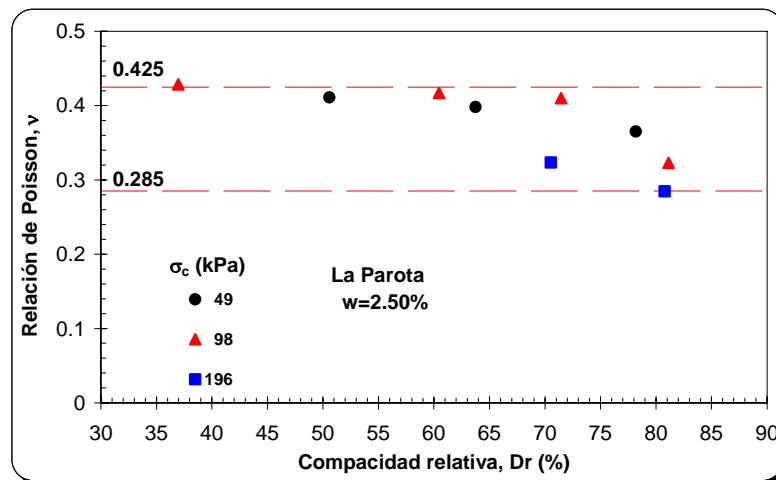
De acuerdo con estos resultados no se aprecia una tendencia clara de la influencia de la compacidad relativa en la relación de Poisson, pero sí se puede advertir que la diferencia entre los valores mayor y menor de  $\nu$  es cercano a 0.15.

Para el material con 2.5 % de contenido de agua (figura 4.13b) y un esfuerzo de confinamiento de 49 kPa (0.50 kg/cm<sup>2</sup>) la relación de Poisson tiende a bajar con el incremento de la compacidad relativa, inicia con un valor de 0.411 para una compacidad relativa de 50.58 % y llega a 0.365 para un valor de  $D_r$  de 78.18 %, es decir, una variación de 0.046. En las muestras ensayadas a 98 kPa (1 kg/cm<sup>2</sup>), la relación de Poisson va de 0.429 a 0.323 al aumentar la compacidad relativa de 36.97 a 81.12 %, lo cual representa una reducción de 0.106. Finalmente, para las muestras sometidas a un esfuerzo de 196 kPa (2 kg/cm<sup>2</sup>) la relación de Poisson cambia de 0.32 a 0.285 al aumentar la compacidad relativa de 70.53 a 80.78 %. Al igual que el material seco, la diferencia entre los valores mayores y menores de  $\nu$  no llega a 0.15.

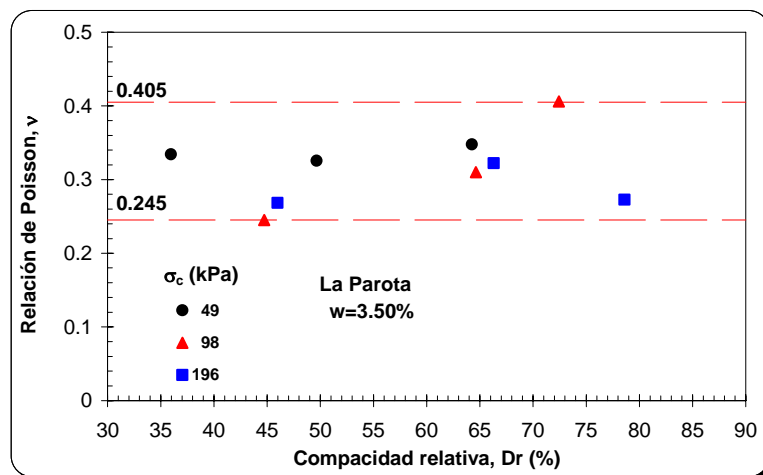
Para el material con contenido de agua de 3.50 % y confinado a 49 kPa (0.50 kg/cm<sup>2</sup>) que se muestra en la figura 4.13c, la relación de Poisson se mantiene prácticamente constante en un valor cercano a 0.33, para compacidades relativas entre 35.95 y 64.25 %. Para un confinamiento de 98 kPa (1 kg/cm<sup>2</sup>), la relación de Poisson que se obtiene está entre 0.245 y 0.406, para compacidades que van de 44.71 a 72.42 %, a diferencia de los ensayos anteriores  $\nu$  aumenta con el incremento de  $D_r$ . Al que se le aplicó un esfuerzo de confinamiento de 196 kPa (2 kg/cm<sup>2</sup>) se obtuvieron relaciones de Poisson entre 0.322 y 0.268, para compacidades relativas entre 45.97 y 78.60 %. Al igual que para el material seco, no se aprecia la influencia de la compacidad relativa en la variación de la relación de Poisson.



a)  $w=0\%$



b)  $w=2.50\%$



c)  $w=3.50\%$

Figura 4.13 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa para diferentes valores de contenido de agua.

Al presentar los resultados de los tres contenidos de agua y cómo cambia con la compacidad relativa (figura 4.14), se aprecia que el intervalo de variación de la relación de Poisson está entre 0.26 y 0.42, con un valor medio de 0.33, para las compacidades relativas que van de 35 a 97 %, para los diferentes contenidos de agua y esfuerzos de confinamiento. En general se esperaría que conforme se incremente la compacidad relativa del material, la relación de Poisson fuese menor, pero vemos que para los suelos secos cuyas compacidades relativas son las más altas, los valores de relación de Poisson son relativamente más altos que para los contenidos de agua de 2.5 y 3.5 %, tal como se indicó en el párrafo anterior.

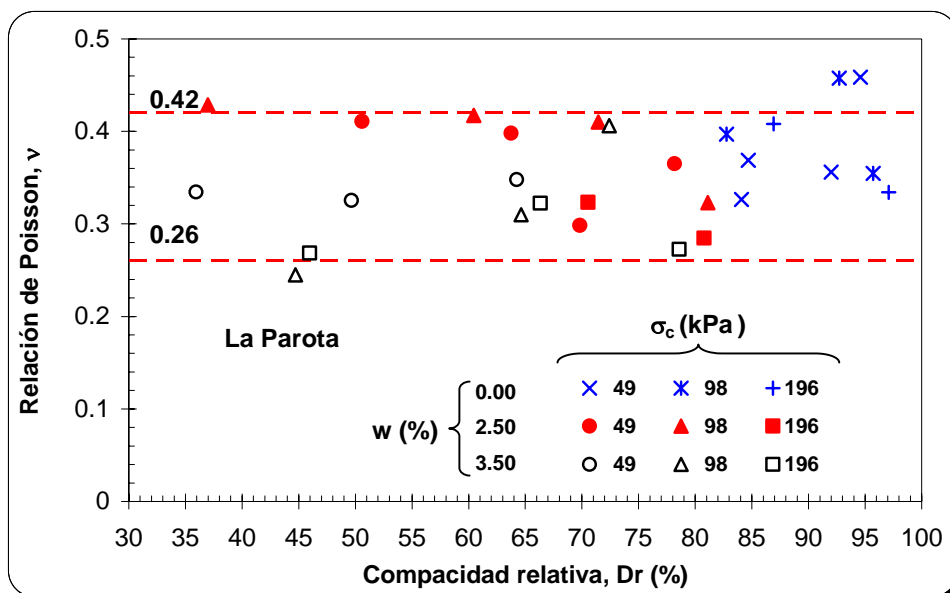


Figura 4.14 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y el contenido de agua, material La Parota

#### 4.3.1.2 Efecto del contenido de agua

Para analizar la influencia del contenido de agua en la variación de la relación de Poisson se seleccionaron cuatro intervalos de compacidad relativa, dos para una presión de confinamiento de 49 kPa (0.50 kg/cm<sup>2</sup>) y un intervalo de compacidad relativa para 98 y 196 kPa (1 y 2 kg/cm<sup>2</sup>), respectivamente, tal como se muestra en las figuras A-6 a A-8 del anexo A y se condensan en la figura 4.15. Se puede apreciar que al pasar de un material seco a otro con 2.5 % de agua, en todos los casos la relación de Poisson baja y posteriormente al aumentar a 3.5 % de agua, este parámetro sube nuevamente, prácticamente al mismo valor que cuando está seco. Se puede apreciar también que los juegos de puntos para cada intervalo de compacidad relativa son casi paralelos y los valores decrecen conforme se incrementa la presión de confinamiento de 49 a 196 kPa (0.50 y 2 kg/cm<sup>2</sup>). Aunque sí se aprecia influencia del agua en la variación de la relación de Poisson, por lo que se puede ver no es tan importante, para los suelos y condiciones de ensaye estudiados en esta tesis.

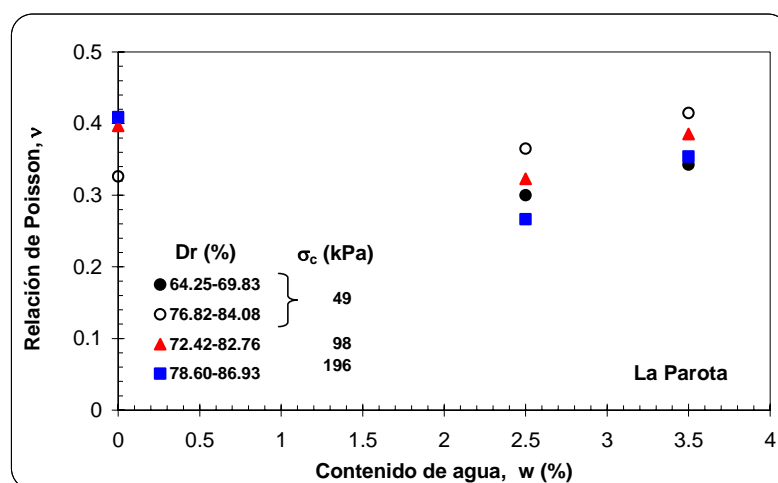


Figura 4.15 Influencia del contenido de agua en la relación de Poisson

#### 4.3.1.3 Efecto del esfuerzo de confinamiento

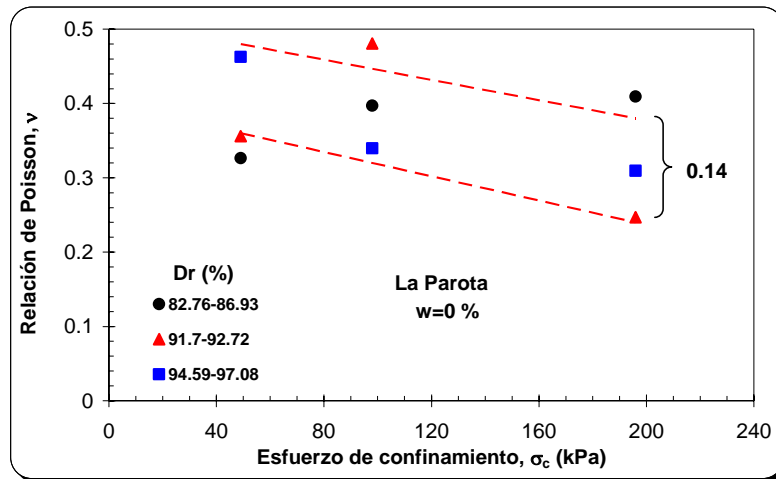
En la figura 4.16 se presenta la influencia del esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson. Se seleccionaron tres ensayos con compacidades relativas cercanas entre sí, variando entre cada uno de ellos el esfuerzo de confinamiento, de 49 a 196 kPa (0.50 y 2 kg/cm<sup>2</sup>).

En la figura 4.16a se muestra el material con 0 % de contenido de agua, para tres intervalos de compactación relativa, con valores de 82 a 97 %. Con líneas punteadas se muestran las fronteras inferior y superior de la franja en que varía la relación de Poisson. La tendencia de los resultados es que la relación de Poisson disminuya al incrementar el confinamiento, tal como lo indican las líneas punteadas, con una banda de dispersión de 0.14, aproximadamente. El material menos denso no sigue la regla de disminuir con el incremento del confinamiento, pero el valor de la relación de Poisson se mantiene prácticamente dentro de dicha banda de dispersión.

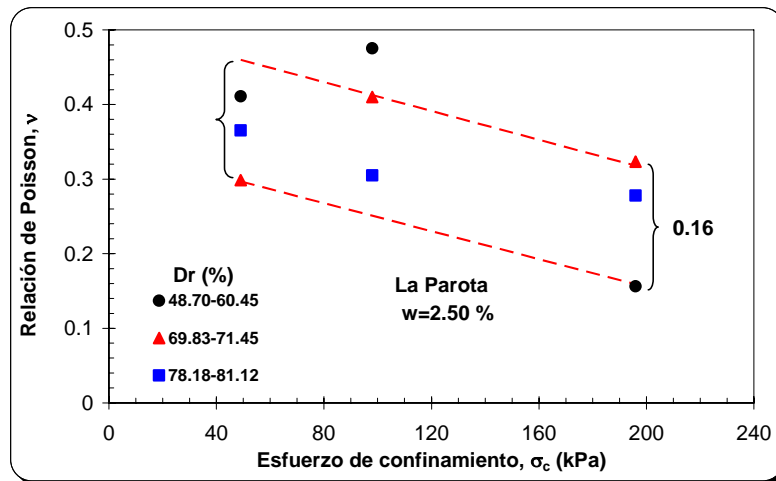
Para el material con 2.5 % de contenido de agua (figura 4.16b) se seleccionaron tres intervalos de compactación relativa, entre 78.18 y 81.12 %, la primera; 69.83 y 71.45 %, la segunda; y entre 48.70 y 60.45 %, la tercera. Al igual que en el material seco, se definieron fronteras con líneas punteadas que marcan los valores mínimos y máximos de relación de Poisson. Para el primer intervalo de compacidades relativas al incrementar el confinamiento, disminuye la relación de Poisson, de 0.37, 0.31 y 0.28 para los tres niveles de esfuerzo aplicados. Al segundo intervalo le corresponden relaciones de Poisson de 0.29, 0.41 y 0.32 para los tres niveles de esfuerzo. En este caso aunque  $v$  no disminuye con el confinamiento, se mantiene en el intervalo en el que definen las líneas punteadas; y en el tercer intervalo, de 48.70 a 60.45 %,  $v$  muestra un valor de 0.41 para el confinamiento más bajo, sube a 0.47 para el intermedio y baja a 0.16 para el más alto. Como se puede ver, la tendencia general es a que la relación de Poisson disminuya al incrementarse el confinamiento, con una banda de dispersión, para este caso, con un ancho de 0.16 aproximadamente.

Para el material con 3.50 % de contenido de agua (figura 4.16c) se presentan tres intervalos de compacidades relativas: de 72.42 a 78.60 %, el más denso; de 64.25 a 66.32 %, con densidad intermedia; y 44.71 a 49.65 %, el más suelto. En el primer intervalo la relación de Poisson disminuye con el incremento del esfuerzo de confinamiento, inicia con 0.42 para el confinamiento menor, 0.38 para el intermedio y 0.34 para el mayor. En el segundo intervalo de compactación relativa la relación de Poisson disminuye con el incremento del esfuerzo de confinamiento: 0.35 para el esfuerzo más pequeño, 0.31 para el intermedio y 0.28 para el más alto. Para el tercer intervalo las relaciones de Poisson que se obtienen son de 0.31 para el primer confinamiento, 0.244 para el segundo y 0.17 para el tercero. Es claro que para este material la tendencia es que, al incrementarse el confinamiento, disminuye la relación de Poisson, independientemente de la compactación relativa del material y del contenido de agua con el que se haya formado la probeta. Sin embargo, el ancho de la banda de dispersión tiende a incrementarse con el contenido de agua.

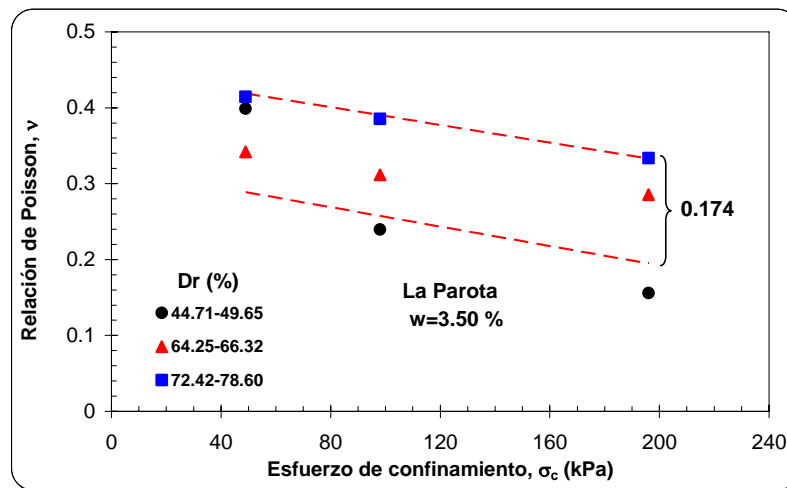




a)  $w=0\%$



b)  $w=2.50\%$



c)  $w=3.50\%$

Figura 4.16 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, por contenido de agua

En la figura 4.17 se muestra un resumen de la variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y el esfuerzo de confinamiento. Si se traza una línea que defina la tendencia de los valores más altos y otra para los más bajos, se obtienen líneas rectas prácticamente paralelas entre sí. Se puede observar que para cada esfuerzo de confinamiento existe una diferencia entre la relación de Poisson más baja y la más alta, cercana a 0.17. Luego de revisar la influencia de los tres parámetros que se consideraron en el trabajo, se concluye que el esfuerzo de confinamiento tiene un efecto mayor en la variación de la relación de Poisson.

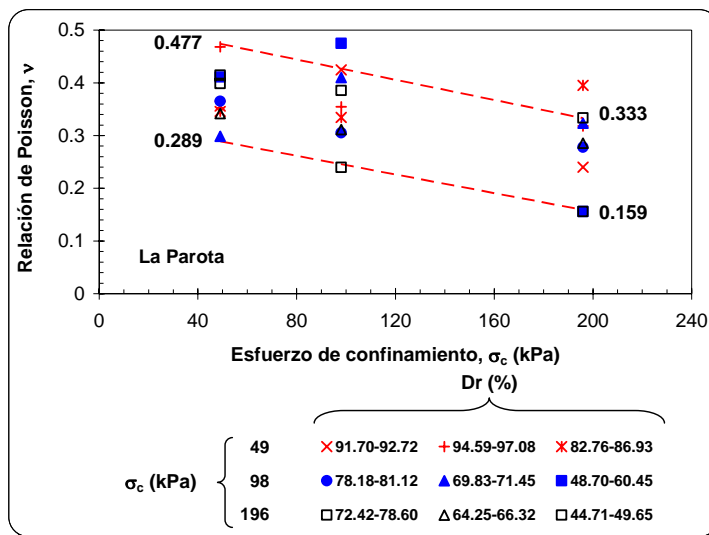


Figura 4.17 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento y contenido de agua

### 4.3.2 Relación de Poisson en material de La Parota, regresión lineal múltiple

Se realizó una regresión lineal múltiple tomando como variable dependiente la relación de Poisson y como variables independientes el contenido de agua (w), la compacidad relativa (Dr) y el valor de  $P_{n=\sigma_c}/P_a$ , correspondiente a la relación entre el esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , y la presión atmosférica,  $P_a$ . El contenido de agua y la compacidad relativa se manejaron en decimal y el esfuerzo de confinamiento y la presión atmosférica en kPa. Para hacer la regresión lineal se tomaron los datos de los 30 ensayos y con 4 se verificó la ecuación de regresión obtenida. La ecuación es la que se muestra enseguida.

$$\nu = 0.384 + 0.062 Dr - 0.407 w - 0.059 P_n$$

En la figura 4.18 se muestran los resultados obtenidos con la regresión lineal múltiple, incluyendo los cuatro datos que se consideraron para la verificación de la ecuación. Esta ecuación permite estimar la relación de Poisson con suficiente aproximación para aplicaciones prácticas.

### 4.3.3 Material SP-Arena limosa (Jales SLP)

De este material se ensayaron 18 probetas, variando el contenido de agua, la compacidad relativa y el esfuerzo de confinamiento. Los contenidos de agua a los que se ensayaron las muestras fueron 0 y 6.50 %; la compacidad relativa obtenida estuvo en un intervalo entre 31.11 y 96.99 %; y los esfuerzos de confinamiento fueron de 49, 98 y 196 kPa (0.50, 1 y 2 kg/cm<sup>2</sup>).

En la tabla A-2 se definen las características volumétricas y de esfuerzo de las probetas ensayadas, además en las figuras A-10 a A-13 se muestran las curvas  $\epsilon_r$  vs  $\epsilon_a$  en las que se evalúa la influencia de la compacidad relativa y el esfuerzo de confinamiento en la variación de la relación de Poisson.

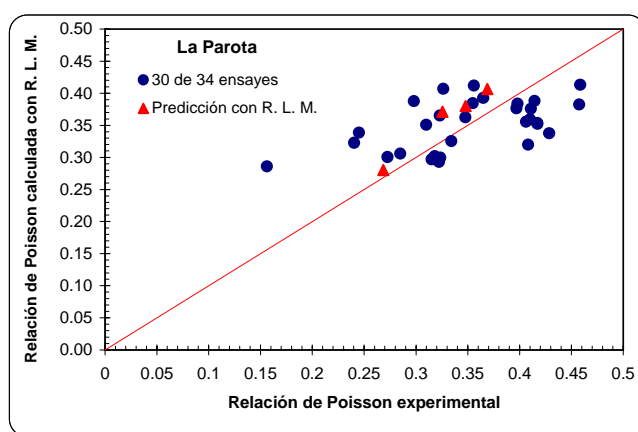


Figura 4.18 Valores de relación de Poisson obtenidas con la ecuación de regresión lineal, material La Parota

De las probetas ensayadas, al igual que para el material de La Parota, las compacidades relativas más altas se obtienen con el material seco. En este caso, como sólo se cuenta con dos contenidos de agua se aprecia claramente la influencia del contenido de agua en la densidad inicial de las probetas. Los materiales secos presentan las compacidades relativas mayores que oscilan entre 85 y 97 %, mientras que para el que tiene 6.50 % de agua está entre 34 y 60 %, lo cual indica que existe un intervalo entre el 60 y 85 % en el que no se formaron probetas.

Los resultados de los ensayos se ordenaron de la misma forma que en el caso del material de La Parota. Se analiza primero la influencia de la compacidad relativa y del esfuerzo de confinamiento, en ambos casos para los diferentes contenidos de agua.

#### 4.3.3.1 Efecto de la compacidad relativa

En la figura 4.19 se muestra la influencia de la compacidad relativa en la variación de la relación de Poisson, para esfuerzos de confinamiento de 49, 98 y 196 kPa (0.50, 1 y 2 kg/cm<sup>2</sup>), para el material seco y con 6.50 % de agua. En el material seco, para los tres niveles de esfuerzo, la relación de Poisson menor le corresponde a la probeta más densa, con compacidad relativa arriba de 97 %, mientras las relaciones de Poisson de las compacidades media y menor son muy cercanas entre sí, sobretodo para los confinamientos de 49 y 98 kPa (0.50 y 1 kg/cm<sup>2</sup>). La relación de Poisson está entre 0.15 y 0.39, sin presentar, de forma clara, la influencia de la compacidad relativa inicial en la variación de la relación de Poisson.

De igual forma, para el material con 6.50 % de agua tampoco se aprecia una tendencia clara en la variación de la relación de Poisson con el incremento de la compacidad relativa. La relación de Poisson varía en un intervalo definido de entre 0.21 y 0.39, para las muestras analizadas, tanto para el material seco cuya compacidad relativa oscila entre 84 y 98 % como el material con 6.5 % de contenido de agua cuyas compacidades relativas están entre 35 y 64 %.

Los resultados para los dos contenidos de agua se muestran juntos en la figura 4.20. Se observa que para ambos contenidos de agua, el intervalo de variación está entre 0.39 y 0.21, pero no se aprecia la influencia de la compacidad relativa en la forma en que varía la relación de Poisson.

#### 4.3.3.2 Efecto del contenido de agua

Como se utilizaron solamente dos contenidos de agua, las probetas que se lograron formar tienen compacidades relativas bajas para el material húmedo y muy altas para el seco, lo cual no permite tener probetas con diferente contenido de agua dentro de un mismo intervalo de compacidad relativa y por tanto no es posible analizar, para este material, la influencia de la humedad en la variación de la relación de Poisson.

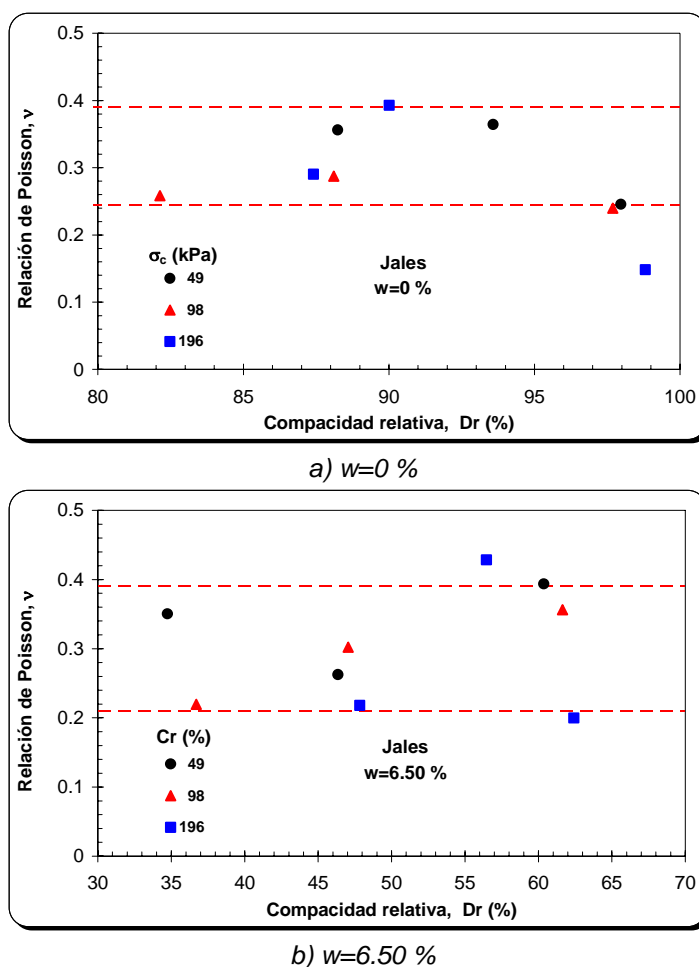


Figura 4.19 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento y la compacidad relativa, para 0 y 6.5 % de agua

### 4.3.3.3 Efecto del esfuerzo de confinamiento

En la figuras A-12 y A-13 del anexo A se presentan las curvas  $\epsilon_r$  vs  $\epsilon_a$  en donde se observa la influencia del esfuerzo de confinamiento en la variación de la relación de Poisson. Se toman tres intervalos de compacidad relativa por contenido de agua en el cual se analiza cómo varía la relación de Poisson al aumentar el esfuerzo de confinamiento aplicado entre 49 y 196 kPa (0.50 y 2 kg/cm<sup>2</sup>). Para los tres intervalos de compacidad relativa analizados por contenido de agua, la relación de Poisson tiende a disminuir al incrementar el esfuerzo de confinamiento (figura 4.21). Se aprecia que conforme aumenta el confinamiento de 49 a 196 kPa (0.50 a 2 kg/cm<sup>2</sup>) disminuye la relación de Poisson, definiendo una franja entre las fronteras de los valores de  $v$  mayores y menores con un ancho de entre 0.11 y 0.15 para  $w=0$  y 6.5 %, respectivamente. Para  $w=0$  %, la línea superior está definida por un valor de  $v$  de 0.36 para un esfuerzo de 49 kPa (0.50 kg/cm<sup>2</sup>) y 0.22 para el esfuerzo de 196 kPa (2 kg/cm<sup>2</sup>), mientras que la línea inferior por los valores de 0.25 y 0.13, para los valores de esfuerzos menor y mayor. Para el material con  $w=6.5$  % la línea superior está definida por los valores 0.40 y 0.24 y la inferior por 0.25 y 0.13, para los esfuerzos de 49 y 196 kPa (0.50 y 2 kg/cm<sup>2</sup>), respectivamente. Estos resultados se muestran en forma resumida con los dos contenidos de agua en la figura 4.22.

De los resultados mostrados se puede resumir que para estos dos materiales estudiados, los parámetros que mayor influencia tienen en la variación de la relación de Poisson son el contenido de agua inicial y el esfuerzo de confinamiento aplicado; el efecto de la compacidad relativa parece ser despreciable.

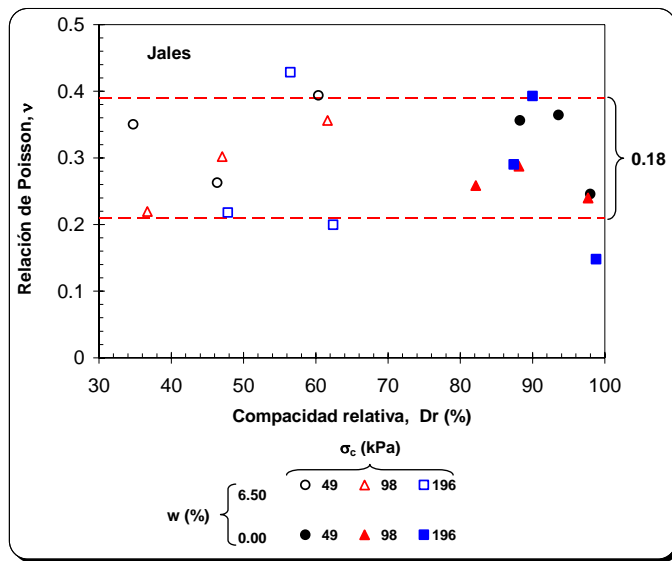
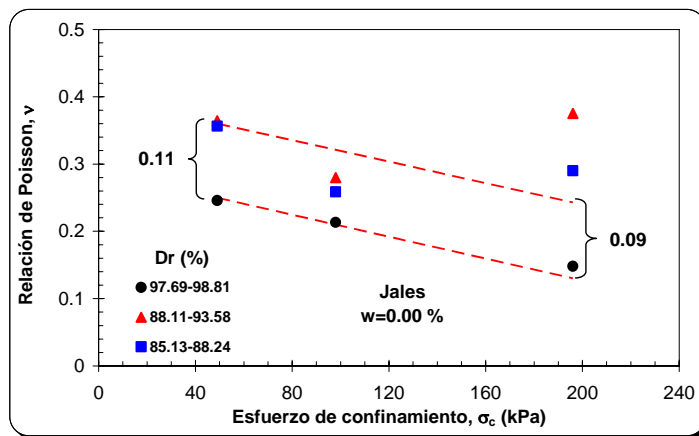
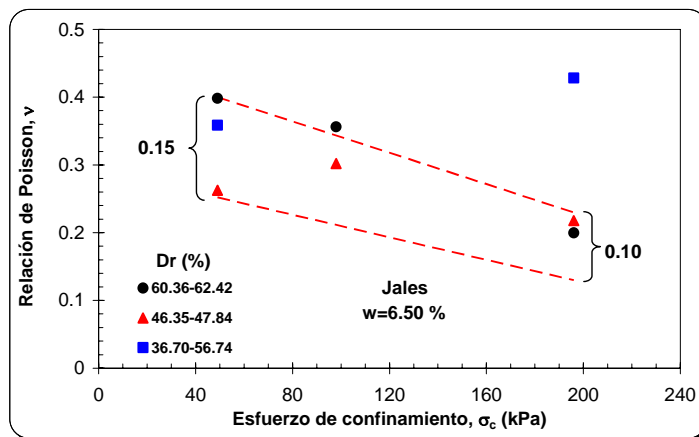


Figura 4.20 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento y la compacidad relativa, para 0 y 6.5 % de agua, resumen



a)  $w=0$  %



a)  $w=6.50$  %

Figura 4.21 Influencia del esfuerzo de de confinamiento en la variación de la relación de Poisson, para 0 y 6.5 % de agua

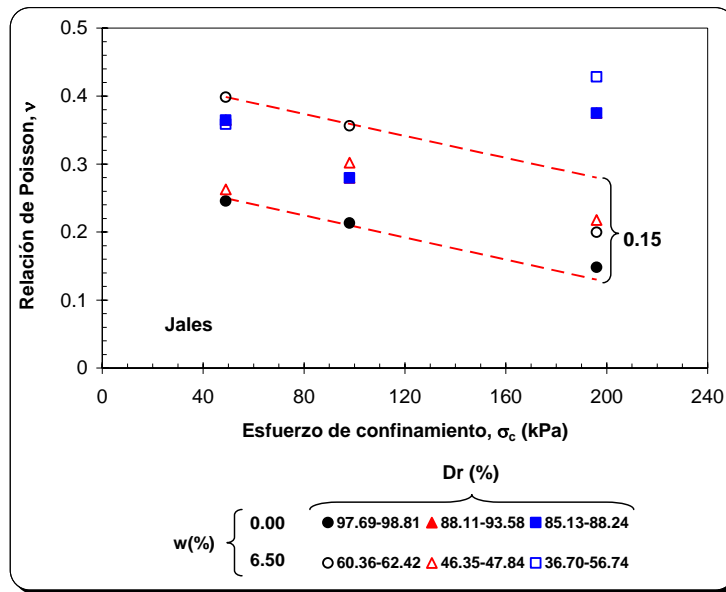


Figura 4.22 Influencia del esfuerzo  $\sigma_c$  en la variación de la relación de Poisson, para 0 y 6.5 % de agua (resumen)

#### 4.3.4 Relación de Poisson de los Jales, regresión lineal múltiple

Se realizó una regresión lineal múltiple a los resultados experimentales para calcular la relación de Poisson, tomando como variables de entrada el contenido de agua, la compactación relativa y el esfuerzo de confinamiento normalizado respecto a la presión atmosférica. Al utilizar para la regresión lineal múltiple los resultados de 14 de los 18 ensayos realizados, se obtuvo la ecuación siguiente (figura 4.23):

$$\nu = 0.281 + 0.066 Dr - 0.535 w - 0.054 P_n$$

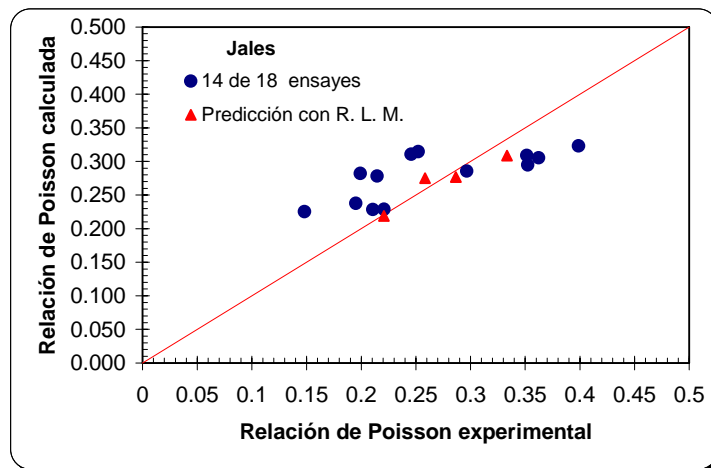


Figura 4.23 Valores de relación de Poisson obtenidas con la ecuación de regresión lineal, para jales

De acuerdo a los resultados obtenidos por algunos investigadores (Hoque *et al.*, 1996; Chaudhary *et al.*, 2003; Dong *et al.*, 1994; Yasuda *et al.*, 1994; Fioravante *et al.*, 1994; y Rivera, 1988), el nivel de distorsión angular al que se someta al espécimen no influye en la variación de la relación de Poisson, lo cual coincide con los resultados obtenidos en este trabajo y que se puede ver en las gráficas del anexo A. Las curvas que

se muestran son las que corresponden a las deformaciones unitarias axial y radial, desde valores muy pequeños hasta cerca de la falla, las cuales presentan un comportamiento prácticamente lineal.

De acuerdo con los resultados presentados por Tsukamoto *et al.* (2002), conforme se incrementa el grado de saturación aumenta la relación de Poisson, hasta llegar a valores cercanos a 0.50 para el material saturado, pero para cada grado de saturación existe una banda de variación, la cual va disminuyendo conforme se lleva al suelo a la saturación total (figura 1.18). En el intervalo de grado de saturación de 0 a 20 %, la relación de Poisson oscila entre 0.22 y 0.45, independiente de la compacidad relativa. Estos resultados coinciden con los que se obtuvieron en el trabajo realizado para esta tesis, ya que los grados de saturación del material está es del orden 0 a 20 % y la relación de Poisson está entre 0.16 y 0.48 para en material de La Parota y entre 0.15 y 0.43 para los jales (figura 4.12).

Respecto a la influencia de la compacidad relativa, un trabajo comparativo fue el realizado por Fioravante *et al.* (1994) en el que se aprecia que la relación de Poisson tiende a incrementarse conforme aumenta la relación de vacíos; es de decir, disminuir con el incremento de la densidad del material. El intervalo en el que varía este parámetro es entre 0.18 y 0.40, para un intervalo de relación de vacíos entre 0.76 y 1.05. Los resultados obtenidos en el trabajo desarrollado no muestran influencia clara de la compacidad relativa, pero el intervalo de variación de la relación de Poisson está entre 0.26 y 0.42, para la Parota y entre 0.21 y 0.39 para los jales, en compacidades relativas que van de 35 a 98%, lo cual muestra intervalos semejantes en ambos estudios.

Rivera (1988) y Talesnick *et al.*, 2000 no mostraron influencia del esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson, con un intervalo de variación en los resultados generales entre 0.10 y 0.30. Comparativamente, los resultados obtenidos en el estudio desarrollado para la tesis indican una disminución de la relación de Poisson conforme aumenta el confinamiento, cuya variación está entre 0.16 y 0.47 para la Parota y entre 0.15 y 0.40 para los jales. Aunque en los resultados experimentales obtenidos por otros investigadores no se aprecia disminución con el incremento del confinamiento, los intervalos de variación son muy parecidos.

#### 4.4 Módulo de rigidez

Durante la ejecución de los ensayos se aplicaron 20 ciclos a una frecuencia de excitación de 1 Hz, operando el equipo a desplazamiento controlado. Se aplicaron semiamplitudes de desplazamiento en el cabezal de 0.05 a 1 mm. Para cada grupo de ciclos aplicado se registró la señal de los sensores de desplazamiento axial colocados en el cabezal (CS), en los tercios superior (TMS) e inferior (TMI), los desplazamientos radiales en el tercio central (TM) y la señal de carga en la base de la muestra (ver capítulo 2).

De los veinte ciclos aplicados se seleccionó el ciclo diez para la determinación del módulo de rigidez al corte dinámico del suelo. El módulo de rigidez se obtuvo considerando la altura total de la probeta, con la señal de desplazamiento axial tomada en el cabezal y considerando el espesor del tercio central, con la señal de desplazamiento correspondiente a esta franja de suelo como la diferencia entre el TMS y TMI. Para ambos casos se utilizó la señal de carga registrada con la celda de carga interna colocada en la base de la muestra. Por tanto, se obtuvo una curva de degradación del módulo de rigidez para la señal obtenida en el cabezal y otra para el tercio medio, las cuales se presentan de forma conjunta para analizar la diferencia en los parámetros mecánicos con ambas señales.

En la figura 4.24 se muestran los desplazamientos axiales a lo largo de la probeta, con las señales obtenidas en el cabezal y los tercios medio superior (TMS) e inferior (TMI), considerando desplazamiento nulo en la base. Como se indicó en el párrafo anterior, este valor de desplazamiento corresponde a la semiamplitud indicada en el gráfico, para el ciclo diez. Debido a que el gráfico es ilustrativo, sólo se muestran resultados correspondientes a algunas de las semiamplitudes aplicadas. Se puede observar que los desplazamientos a lo largo de la probeta no siguen un patrón de variación lineal con la altura de la muestra (hipótesis adoptada cuando sólo se usan los desplazamientos del CS), lo cual indica que el módulo de rigidez que se obtenga con la señal de desplazamiento considerando la altura total de la muestra será diferente al que se obtenga en la franja del tercio central.

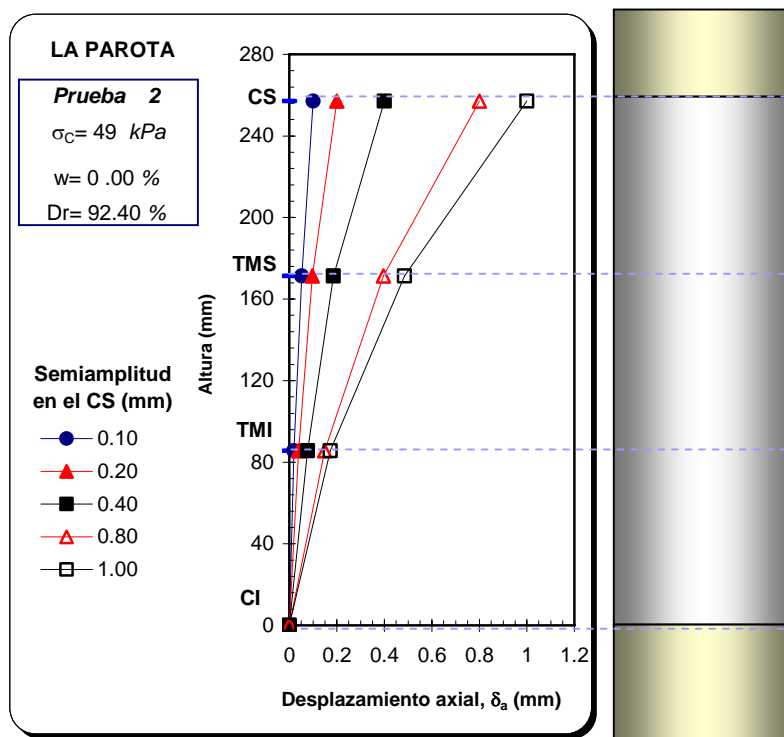


Figura 4.24 Desplazamientos a lo largo de la probeta

Partiendo de la observación anterior, se determinó el módulo de rigidez al cortante dinámico para el ciclo diez de los veinte aplicados, considerando el desplazamiento de toda la probeta y el correspondiente al tercio central de la muestra. Para el cálculo del módulo de rigidez se utilizó, para ambas señales de



desplazamiento, la señal de carga registrada en una celda interna colocada en la base de la muestra. Los resultados del módulo de rigidez se grafican respecto a la semiamplitud aplicada, en escala natural, con el objetivo de comparar punto a punto los valores obtenidos para cada uno de los dos casos. Estos resultados se muestran gráficamente en el anexo B, de la figura B-1 a B-30.

Ya que el objetivo es analizar la diferencia entre los módulos de rigidez calculados con las señales de desplazamiento de toda la probeta (CS) y las registradas en el tercio central (TM), este inciso se centrará en el estudio de la relación que existe entre el módulo de rigidez en el tercio central y el módulo correspondiente a toda la probeta ( $G_{TM}/G_{CS}$ ).

De la misma forma que se hizo con la presentación de resultados de la relación de Poisson, se procederá con la relación de módulos de rigidez. Se mostrarán los resultados por material estudiado y se analizarán para cada uno de ellos la influencia de la compacidad relativa, el contenido de agua y el esfuerzo de confinamiento.

En el anexo B, figuras B-1 a B-30, se muestran los resultados experimentales de los módulos de rigidez calculados con los desplazamientos del tercio central ( $G_{TM}$ ) y de la parte superior de la probeta ( $G_{CS}$ ), la relación  $G_{TM}/G_{CS}$  y cómo varían éstos con la semiamplitud de desplazamiento aplicada. En la parte **a)** de cada gráfico, mostrado del lado izquierdo de la hoja, aparecen con símbolos llenos los módulos de rigidez obtenidos con el desplazamiento en toda la probeta y los vacíos con los desplazamientos obtenidos en la franja del tercio central. En la parte **b)** del gráfico se presenta la variación de la relación de módulos de rigidez  $G_{TM}/G_{CS}$  con la semiamplitud de excitación. En los gráficos se muestra la influencia de la compacidad relativa, el esfuerzo de confinamiento y el contenido de agua en la variación del módulo de rigidez.

#### 4.4.1 Material SP-Arena mal graduada (La Parota)

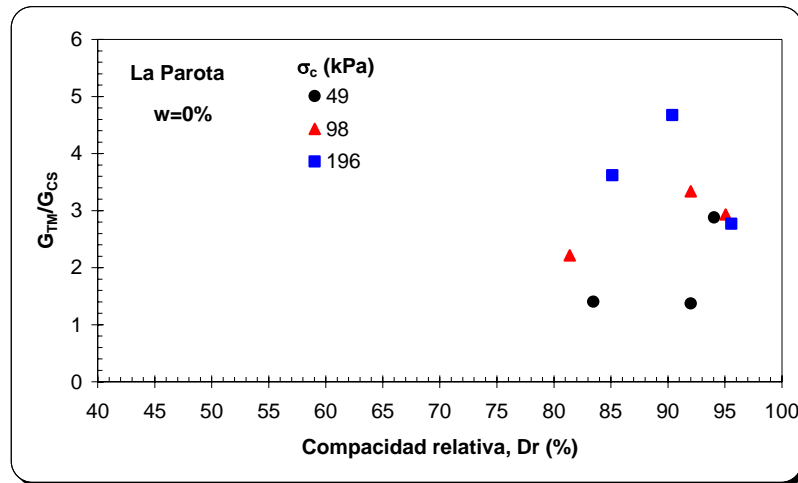
En este apartado se discuten y resumen los resultados mostrados en el anexo B, para determinar los módulos de rigidez con los desplazamientos medidos en el CS y TM, con los cuales se determina la relación  $G_{TM}/G_{CS}$ . En este capítulo sólo se presentan los resultados para la semiamplitud de 0.40 mm.

##### 4.4.1.1 Efecto de la compacidad relativa y contenido de agua

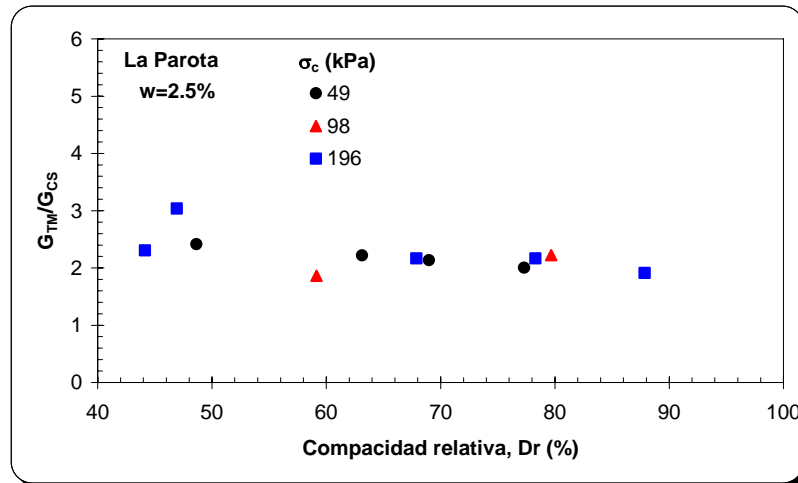
En la figura 4.25 se puede ver la variación de la relación de módulos con la compacidad relativa, para los tres contenidos de agua. En el material seco, cuyas compacidades se encuentran entre 80 y 96 % (figura 4.24a) la relación  $G_{TM}/G_{CS}$  está entre 1.37 para el material sometido a un esfuerzo de 49 kPa (0.50 kg/cm<sup>2</sup>) y 4.8 para el que se sometió a 198 kPa (2 kg/cm<sup>2</sup>). Estos resultados (y los del anexo B) muestran que la influencia de la compacidad, en términos generales, es que al aumentar ésta, la relación de módulos se incrementa.

Para las muestras ensayadas con contenidos de agua de 2.50 % (figura 4.25b), cuyas compacidades relativas van de 42 a 88 % y sometidas a 49 y 198 kPa (0.50 y 2 kg/cm<sup>2</sup>), la relación de módulos oscila entre 1.86 y 3. En este caso, al incrementarse la compacidad relativa, la relación de módulos no varía tanto como en el caso anterior, pero se mantiene en el intervalo antes mencionado, definiendo una franja prácticamente constante conforme se densifica el suelo.

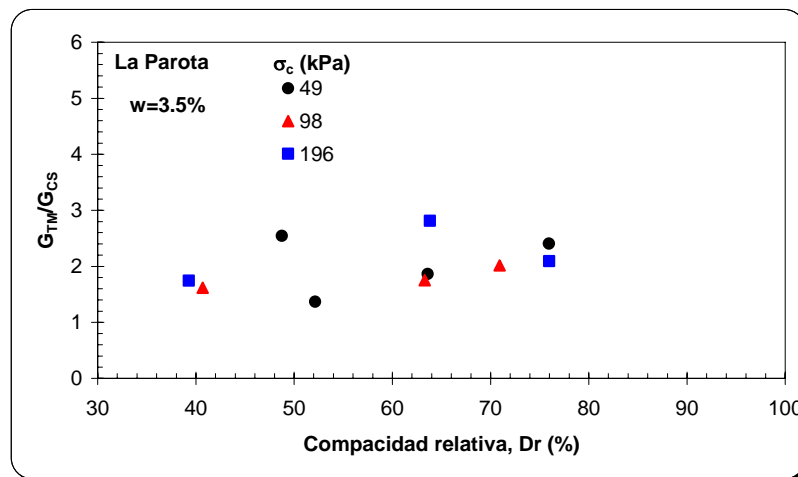
Para el material con 3.5 % de contenido de agua mostrado en la figura 4.25c, con compacidades relativas entre 40 y 76 %, la relación de módulos está entre 1.4 y 2.8. Para este contenido de agua y los esfuerzos de confinamiento utilizados, la relación de módulos se incrementa de manera suave con la compacidad relativa.



a)  $w=0\%$



b)  $w=2.50\%$



c)  $w=3.50\%$

Figura 4.25 Relación de módulos de rigidez para diferentes compacidades relativas

Al agrupar todos los resultados, tal como se muestra en la figura 4.26, se obtiene el comportamiento de esta relación de módulos en un intervalo de compacidad relativa de 40 a 96 %. Se puede apreciar que para compacidades relativas entre aproximadamente 30 y 80 %, que corresponden al material con 2.5 y 3.5 % de contenido de agua, la relación de módulos se mantiene en un intervalo entre 1.37 y 2.81. A partir de esta compacidad relativa la relación de módulos aumenta de manera importante al densificarse el material, hasta llegar a valores de 4.8 para el material sometido al esfuerzo más alto.

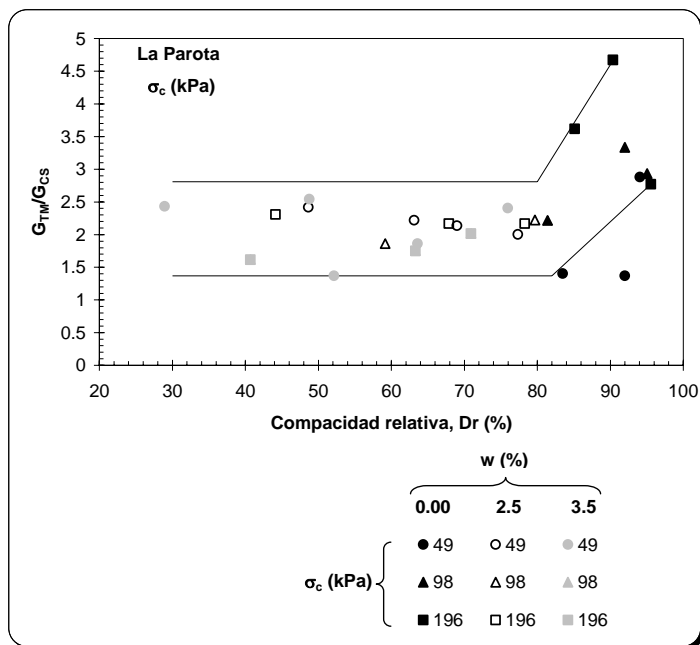


Figura 4.26 Resumen de relación de módulos de rigidez para diferentes compacidades relativas, para el material de La Parota

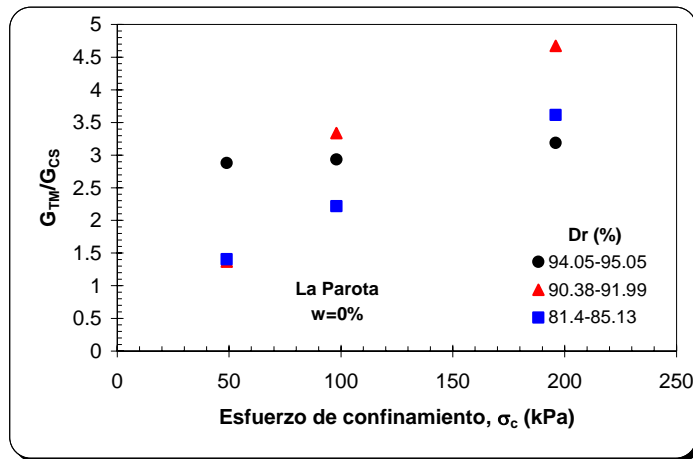
#### 4.4.1.2 Efecto del esfuerzo de confinamiento

En la figura 4.27 se graficó la relación de módulos respecto al esfuerzo de confinamiento aplicado, para los tres contenidos de agua. En el caso del material seco cuyos resultados se muestran en la figura 4.27a, se aprecia que conforme aumenta el confinamiento se incrementa la relación de los módulos para los tres intervalos de compacidad relativa que se analizan.

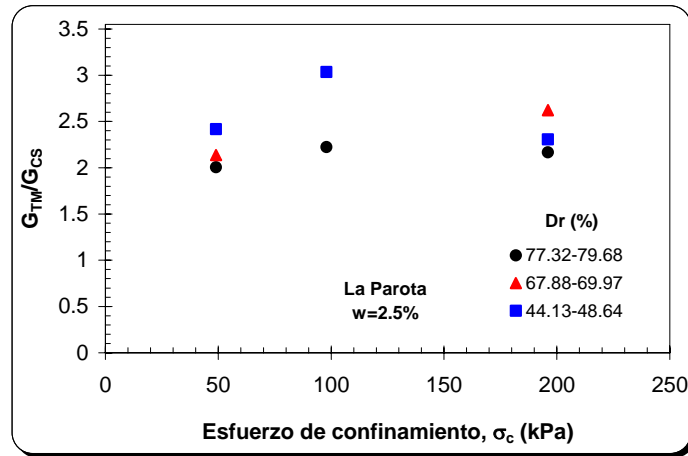
En el caso de los materiales con 2.5 y 3.5 % de agua (Figura 4.27b y c), la influencia del esfuerzo de confinamiento es en el mismo sentido que en el material seco, sólo que el incremento de la relación de módulos es menor.

De acuerdo a los resultados mostrados en las figuras 4.25 a 4.27, se puede establecer que para el material seco, de las variables analizadas, las dos que más influencia tienen en la variación de la relación de módulos son la compacidad relativa y el esfuerzo de confinamiento.

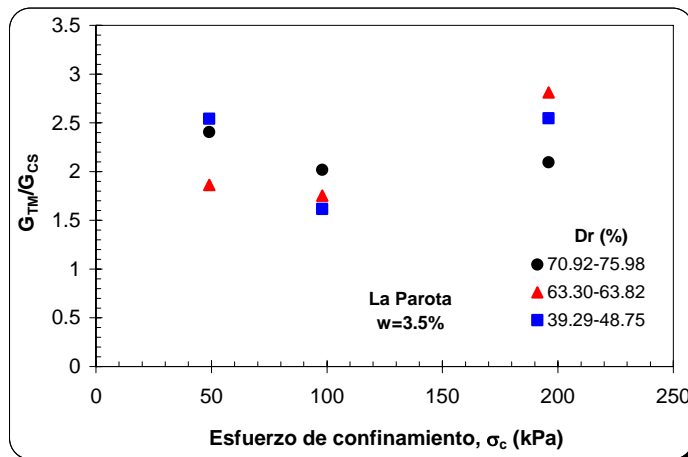
En la figura 4.28 se muestran en conjunto los resultados para los tres contenidos de agua. Se observa claramente que conforme se incrementa el confinamiento al que está sometida la muestra, aumenta la relación de módulos de rigidez. En todo el intervalo de esfuerzos de confinamiento existe una diferencia entre el valor máximo y mínimo de la relación de módulos cercana a 1.70.



a)  $w=0\%$



b)  $w=2.50\%$



c)  $w=3.50\%$

Figura 4.27 Relación de módulos para diferentes esfuerzos de confinamiento, para el material La Parota

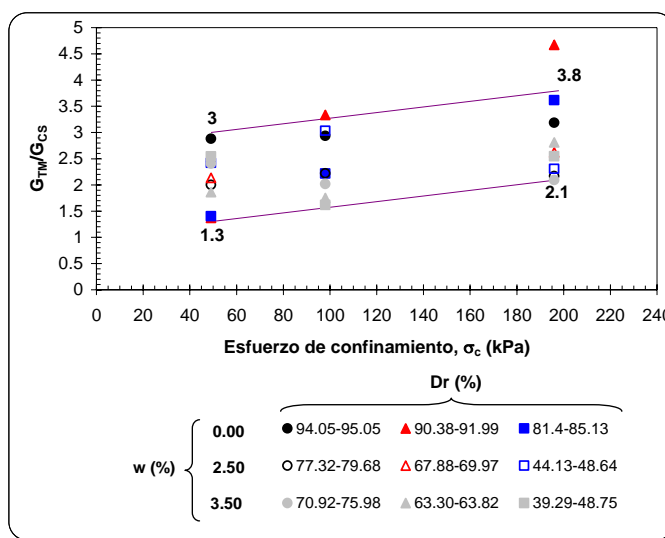


Figura 4.28 Resumen de relación de módulos para diferentes esfuerzos de confinamiento, para el material La Parota

#### 4.4.2 Módulo de rigidez en material La Parota, regresión lineal múltiple

Se aplicó una regresión lineal múltiple a 28 de los 34 ensayos efectuados con el material de La Parota en los que se obtuvo la ecuación de la regresión lineal para la relación de módulos, en función del contenido de agua, la compacidad relativa y el esfuerzo de confinamiento. Los valores restantes se utilizaron para evaluar la aproximación de la ecuación de regresión lineal obtenida. La ecuación resultante y su desviación estándar se incluyen en la figura 4.29.

En la figura 4.29 se graficaron las relaciones de los módulos obtenidas experimentalmente contra las que se calcularon con la ecuación de regresión lineal múltiple. Se muestran con círculo relleno los datos que se utilizaron para obtener la ecuación y con triángulo relleno los valores utilizados para predecir lo que se obtiene con la ecuación de regresión múltiple

$$G_{TM}/G_{CS} = 2.308 + 0.054 w - 0.135 Dr + 0.303 P_n$$

Con una desviación estándar de  $\pm 0.260$ . La comparación entre los valores calculados (triángulos sólidos) y la tendencia media dada por la ecuación, muestra que ésta da resultados con aproximación adecuada para estimaciones del módulo de rigidez cuando no se tengan resultados de experimentales.

#### 4.4.3 Material SP-Arena limosa (Jales SLP)

Al igual que en el material de La Parota, se registraron los desplazamiento axiales en el CS, TMS y TMI de la probeta, para las diferentes semiamplitudes aplicadas en el cabezal, como el ejemplo mostrado en la figura 4.30. Similarmente, los desplazamientos no son lineales a lo largo de la probeta, por tanto se esperaría que los valores de los módulos de rigidez calculados con los desplazamientos medidos en el CS y TM no sean iguales.

##### 4.4.3.1 Efecto de la compacidad relativa

Se obtuvieron las curvas de módulo de rigidez vs semiamplitud de desplazamiento para los ensayos realizados en los Jales, las cuales se muestran en el anexo B en las figuras B-19 a B-24. En un mismo gráfico se muestran las curvas de rigidez calculadas con la señal de desplazamiento en el cabezal y la

correspondiente al tercio medio y en un gráfico aparte se presenta la curva que muestra cómo varía la relación de módulos ( $G_{TM}/G_{CS}$ ) con la semiamplitud de desplazamiento axial.

Para los materiales secos se obtuvieron valores de rigidez máximos para una semiamplitud de 0.20 mm cercanos a 490 MPa, calculados con el desplazamiento registrado en el CS para un esfuerzo de confinamiento de 198 (2 kg/cm<sup>2</sup>) kPa y una compacidad relativa de 88 %, mientras que el módulo calculado con la señal en el TM llega a valores máximos de 1764 MPa; es decir, una relación entre módulos superior a 3.5.

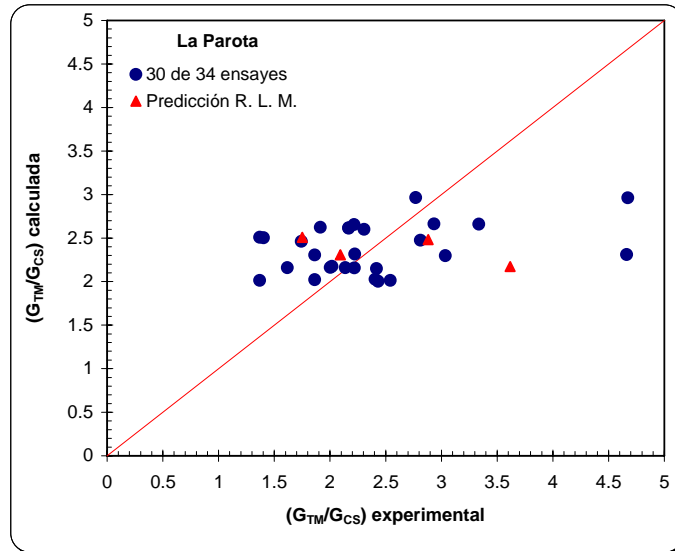


Figura 4.29 Regresión lineal para las relaciones de módulos del material La Parota

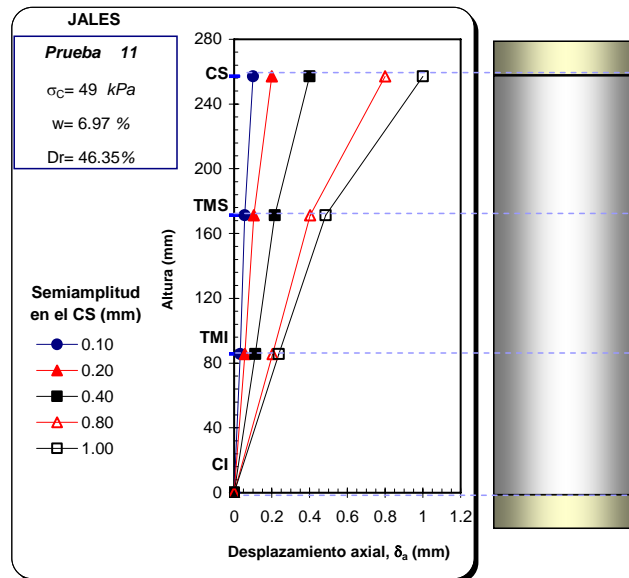
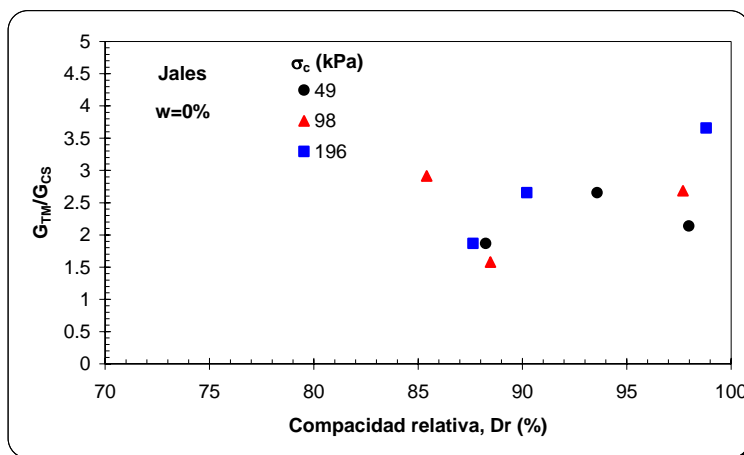


Figura 4.30 Desplazamientos axiales a lo largo de la probeta, para diferentes semiamplitudes

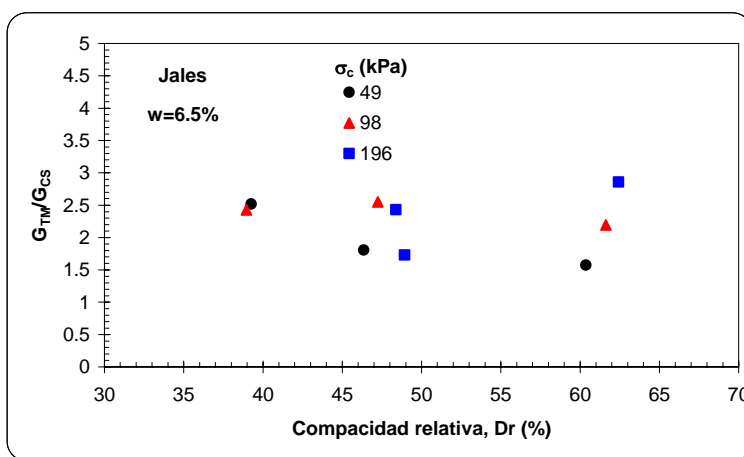
Para el suelo con 6.5 % de contenido de agua y una semiamplitud de 0.20 mm se obtuvieron módulos de rigidez máximos de 294 MPa con la señal de desplazamiento en el CS, una compacidad relativa de 62.4 % y un esfuerzo de confinamiento de 198 kPa (2 kg/cm<sup>2</sup>), mientras que con la señal de desplazamiento en el TM, el valor del módulo fue alrededor de 900; es decir, una relación de módulos cercana a 3.

Al tomar los valores del módulo de rigidez para una semi-amplitud de 0.40 mm y determinar la relación de los módulos se encuentra que para el material seco (figura 4.31a), con compacidades relativas entre 85 y 97 %, esta relación oscila entre 1.5 y 2.5 para compacidades relativas entre 85 y 90 % y arriba de esta última compacidad relativa, aumenta hasta llegar a valores entre 2.5 y 3.5.

En el caso de las muestras formadas con contenidos de agua de 6.5 % y compacidades relativas entre 39 y 62 % (figura 4.31b), la relación de módulos está entre 1.5 y 2.5. Se aprecia poca influencia de la compacidad relativa.



a)  $w=0\%$



b)  $w=6.5\%$

Figura 4.31 Relación de módulos de rigidez para jales

En la figura 4.32 se muestran las relaciones de los módulos para todas las compacidades relativas de las probetas ensayadas. Tal como se indica gráficamente con dos líneas paralelas, la relación de módulos varía en un intervalo de entre 1.65 y 2.90, para compacidades relativas que van de 39 a 90 %, sin una influencia clara de la compacidad relativa en este parámetro. Para compacidades relativas mayores a 90 % se puede ver que se mantiene aproximadamente la franja de variación de la relación del módulo, sólo que esta relación aumenta con el incremento de la compacidad relativa.

#### 4.4.3.2 Efecto del esfuerzo de confinamiento

En la figura 4.33 se muestran dos gráficos en los que se presenta la influencia del esfuerzo de confinamiento en la variación de la relación de los módulos. El primero de los gráficos, para el material seco (figura 4.33a), se puede ver que para las probetas confinadas a 49 kPa (0.50 kg/cm<sup>2</sup>) de presión las relaciones de módulos

oscilan entre 1.6 y 2.6, mientras que para las que se sometieron a 198 (2 kg/cm<sup>2</sup>) la relación de módulos está entre 2.7 y 3.9. Se aprecia claramente que conforme se incrementa el esfuerzo de confinamiento aumenta la relación de los módulos.

El segundo gráfico corresponde a las probetas formadas con 6.50 % de contenido de agua (figura 4.33b). Al igual que en el material seco, la relación de módulos incrementa con el esfuerzo de confinamiento, para el esfuerzo más bajo está entre 1.5 y 2.5 y para el más alto entre 2.4 y 3.

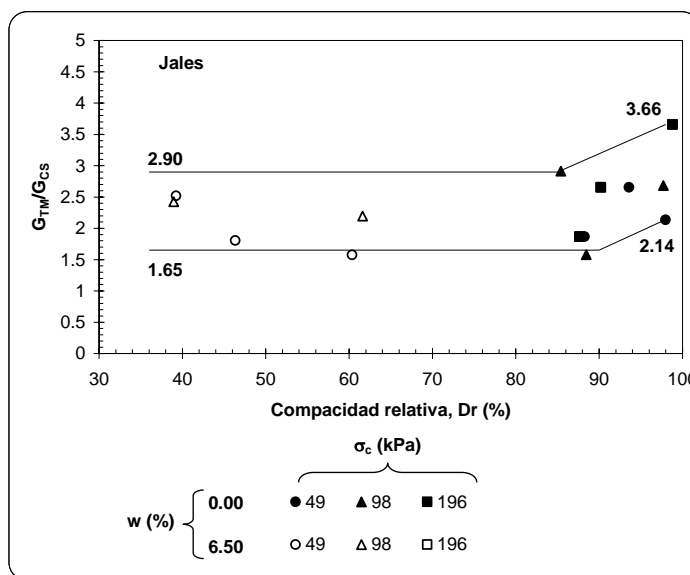


Figura 4.32 Relación de módulos de rigidez para jales, resumen

Al mostrar los resultados de los dos contenidos de agua juntos (figura 4.34), se puede ver y concluir que para este material es clara la influencia del esfuerzo de confinamiento en la variación de la relación de los módulos de rigidez, conforme aumenta el confinamiento  $\sigma_c$  se incrementa la relación de los módulos.

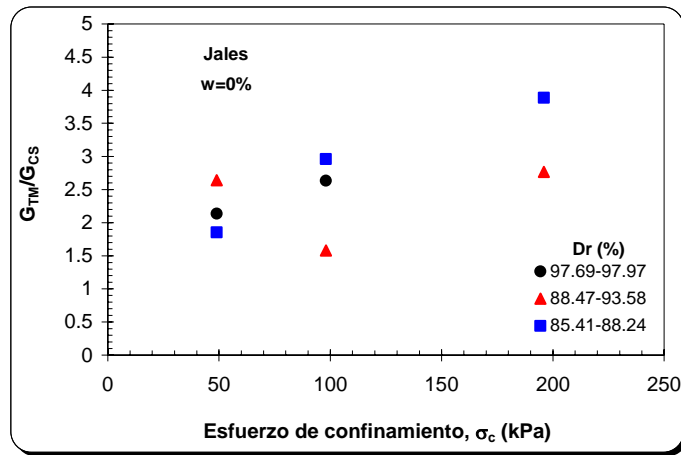
#### 4.4.4 Módulo de rigidez en los Jales, regresión lineal múltiple

De la misma forma que se hizo con la relación de Poisson, se aplicó una regresión lineal múltiple a los resultados experimentales, donde se obtuvo la ecuación de regresión (y desviación estándar) para determinar la relación de módulos ( $G_{TM}/G_{CS}$ ) en función de la compactación relativa, el contenido de agua y el esfuerzo de confinamiento. De los 18 ensayos experimentales se utilizaron 14 para la regresión y se dejaron 4 para evaluar la capacidad predictiva de la ecuación. En la figura 4.35 se grafican los resultados experimentales contra los calculados con la ecuación de regresión, con círculo lleno se muestran los datos con los que se obtuvo la ecuación y con triángulo lleno los que se dejaron para validar la ecuación. La ecuación, producto de la regresión lineal múltiple es la siguiente

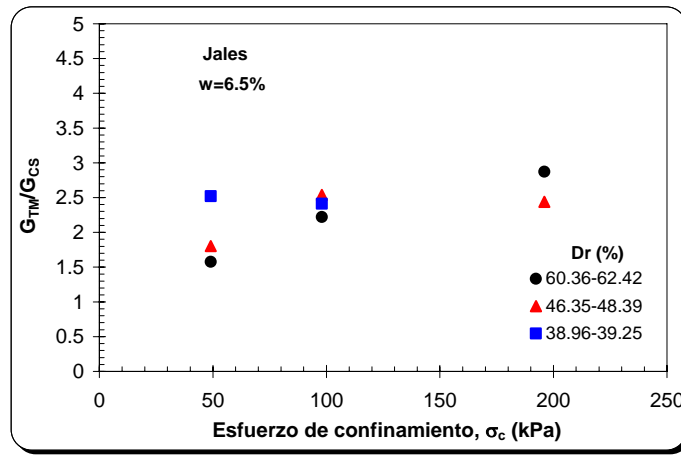
$$G_{TM}/G_{CS} = -0.199 + 2.953 Dr - 0.139 w + 0.041 P_n$$

Con una desviación estándar de  $\pm 0.252$ . Las diferencias obtenidas en los valores experimentales con los calculados con la ecuación están entre 0.07 para la diferencia más pequeña y 0.93 para la más alta para los 14 datos que se utilizaron para obtener la ecuación de regresión y de 0.04 y 0.58 para los 4 datos que se utilizaron para evaluar la capacidad de predicción de la ecuación. La diferencia de 0.93 resulta ser alta si se considera que la relación de módulos varía experimentalmente entre 1.2 y 3.9, es decir en un intervalo de 2.7, lo que significa que la diferencia de 0.93 representa un 30 % de error en la determinación.





a) w=0 %



b) w=6.50 %

Figura 4.33 Relación de módulos con el esfuerzo de confinamiento para jales

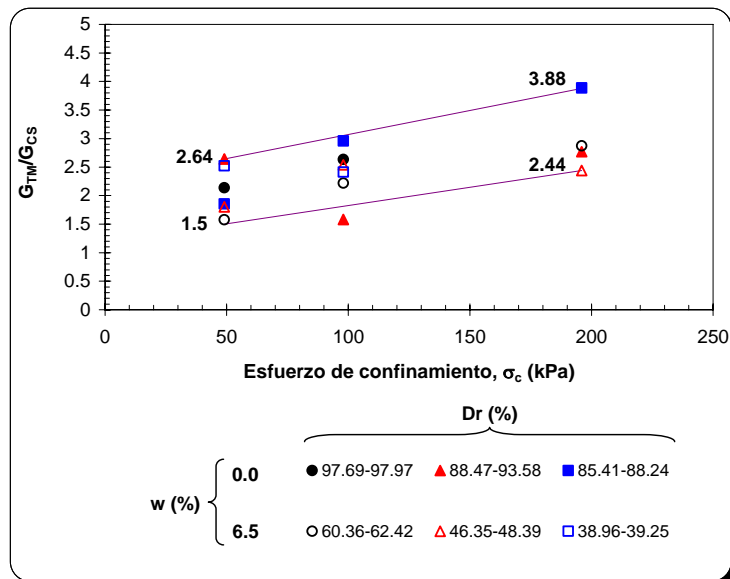


Figura 4.34 Relación de módulos con el esfuerzo de confinamiento para jales, resumen

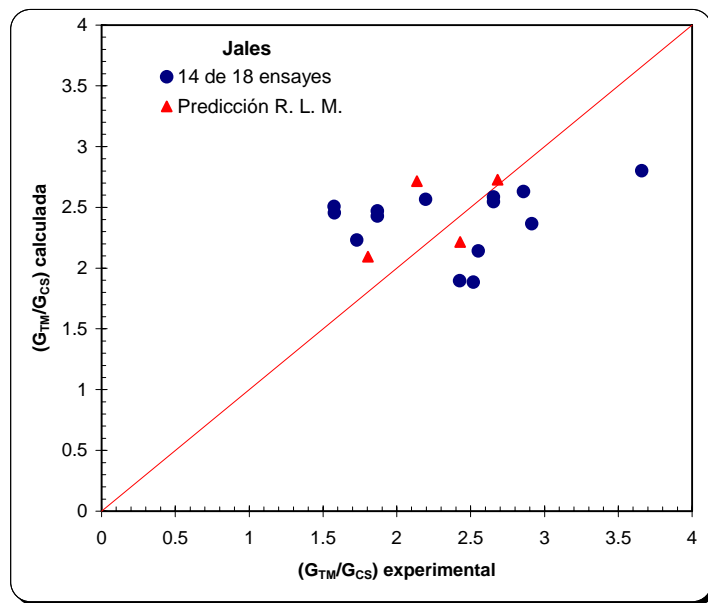


Figura 4.35 Relación de módulos con el esfuerzo de confinamiento, material de Jales

---

## **CAPÍTULO 5**

CONCLUSIONES

---

## 5 Conclusiones

El trabajo se dividió en dos partes, la primera corresponde a la determinación de la relación de Poisson dinámica en el tercio central de la probeta y la segunda a la obtención del módulo de rigidez al corte dinámico, considerando, en esta última, tanto las deformaciones del tercio medio de la probeta (tercio central) como las deformaciones de toda la muestra.

Para el desarrollo del trabajo experimental fue necesario instrumentar y automatizar el equipo triaxial que se utilizó. El equipo permite ensayar probetas de 10.14 cm de diámetro por 26 cm de altura, en condiciones de carga o desplazamiento controlado, con señales de excitación monotónica y periódica senoidal.

Se formaron muestras reconstituidas de suelos granulares que se ensayaron en condiciones parcialmente saturadas con excitación dinámica, a desplazamiento controlado, en el equipo triaxial cíclico. Se midieron los desplazamientos axiales en la parte superior, y en los tercios medios superior e inferior del espécimen, el desplazamiento radial en el tercio central de la muestra y la carga axial en la base.

Del trabajo desarrollado se pueden derivar las siguientes conclusiones principales:

### INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO

- a) El uso de un equipo hidráulico para generar señales de desplazamiento axial cíclico permitió obtener valores de semi-amplitud de 0.05 mm, lo cual implica que para probetas como las que se ensayaron de 260 mm de altura, corresponde a deformaciones unitarias axiales del orden de 0.02 %. Esto trajo como resultado la posibilidad de determinar los parámetros dinámicos para niveles de distorsión más pequeños que en probetas de 9 cm de altura en equipos con pistón neumático, donde la semi-amplitud de deformación axial más pequeña es del orden de 1.2 mm.
- b) En una nueva etapa sería conveniente instalar sensores para registrar velocidades de onda de cortante y compresión (elementos laminares y cristales piezoeléctricos), con el objetivo de poder determinar a muy bajas deformaciones el módulo de rigidez, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson y posteriormente ensayar cíclicamente el espécimen.

### FORMACIÓN DE LA PROBETA

- c) Aunque se utilizó un solo método para determinar las relaciones de vacíos máxima y mínima, que fue con el que se formaron las muestras, los resultados que se reportan coinciden con los reportados por Kubrinovsky e Ishihara (2002), quienes obtuvieron estos parámetros para más de 300 arenas, utilizando varios métodos de formación de probetas.
- d) Debido a que se formaron las probetas en capas, se tenía la incertidumbre sobre la distribución de la compacidad relativa a lo largo del espécimen. Se midió la influencia de la colocación de cada capa en las subsecuentes y se concluyó que la influencia más importante se da en las tres primeras capas y en las posteriores es casi nula.
- e) Al concentrar la atención en las capas del tercio central, la compacidad relativa no tiene variación importante en cada capa con la aplicación de las capas subsecuentes, por lo cual, como se mostró en el inciso 4.1, la compacidad relativa del tercio medio de la probeta es prácticamente uniforme.
- f) No fue posible cuantificar la variación de la compacidad relativa en forma radial en cada una de las capas, pero aunque esta exista, debido principalmente a la concentración del esfuerzo en el centro del espécimen, no influye en las conclusiones de esta investigación ya que éstas se basan en la comparación de los comportamientos de muestras formadas con idénticos procedimientos.

- g) Para probetas sueltas que se formaron con compacidades relativas cercanas a 20 %, al aplicarles el vacío regulado se densificaron hasta valores cercanos al 40 %. Conforme se incrementa la compacidad relativa en la etapa de formación, el efecto del vacío regulado es menor, hasta llegar a una compacidad del 60 %, a partir de la cual el efecto del vacío en la densificación es prácticamente nulo. Después de formada la probeta y de aplicar vacío regulado para retirar el molde partido, se procede a bajar la cámara de acrílico, colocar la instrumentación y aplicar el esfuerzo de confinamiento con el que se ensayará la probeta. En esta etapa el material sufre otra densificación, que en general es mucho menor que la de la etapa de aplicación de vacío, entre el 1 y 30 %.

#### ENSAYE DE LA MUESTRA

- h) De los resultados experimentales, para cada ensaye se obtuvieron las curvas de deformación unitaria radial contra deformación unitaria axial, correspondiente a los desplazamientos radiales y axiales registrados en el ciclo diez de cada semi-amplitud aplicada. A los puntos experimentales se hizo un ajuste a una recta con mínimos cuadrados y la pendiente de ésta corresponde a la relación de Poisson de la probeta ensayada. Se pudo apreciar que en general los puntos experimentales definen una línea recta, lo cual indica que no existe variación apreciable de la relación de Poisson con el nivel de distorsión al que se somete el espécimen, lo cual coincide con los resultados obtenidos por varios grupos de investigadores y que se comentan en el primer capítulo.
- i) En el caso del efecto de la compacidad relativa, se define una franja de 0.20 de ancho donde se distribuyen todos los resultados de los ensayes, sólo que no se define de manera clara su influencia.
- j) Respecto a la influencia del contenido de agua, los valores de relación de Poisson varían entre 0.2 y 0.3, sin mostrar una variación importante al aumentar la humedad en la masa de suelo.
- k) Se encontró que, en general, la relación de Poisson baja conforme se rigidiza el suelo por efecto del incremento del esfuerzo efectivo. Los resultados de los ensayes realizados permitieron definir una franja con un ancho prácticamente constante entre 0.15 y 0.17, donde los valores de la relación de Poisson decrecen al aumentar el confinamiento.
- l) Para el cálculo del módulo de rigidez se determinaron, para el ciclo diez, los desplazamientos axiales en el CS, TMS y TMI y se consideró que en la base el desplazamiento es nulo. Al graficar estos desplazamientos con la altura de la probeta para cada semi-amplitud aplicada se encontró que la deformada de la probeta no sigue una tendencia lineal respecto a la altura de la muestra, lo cual implica que si se determinan los parámetros dinámicos en alguna franja de la probeta, éstos serán distintos a los que se obtienen considerando la altura total del espécimen.
- m) Respecto a la compacidad relativa, se encontró que para los materiales húmedos no existe una influencia aparente de  $D_r$  en la relación de módulos, pero para el material seco, cuyas compacidades relativas son las más altas,  $G_{TM}/G_{CS}$  aumenta al incrementarse  $D_r$ .
- n) Respecto a la influencia del esfuerzo de confinamiento se encontró que en todos los casos analizados, conforme se incrementa el confinamiento aumenta la relación  $G_{TM}/G_{CS}$ , aunque se define una franja de variación con una diferencia entre las fronteras superior e inferior de 2.70 para La Parota y 1.4 para los jales.
- o) Los resultados de la investigación experimental incluidos en esta tesis muestran que la determinación del módulo de rigidez usando los desplazamientos de todo el espécimen conduce a valores inferiores que los obtenidos para el tercio medio. Esto permite argumentar que, considerando la práctica común de utilizar el primer procedimiento para estimar la rigidez de los suelos y utilizarla en el análisis dinámico de obras geotécnicas, éstas se han supuesto más flexibles de lo que posiblemente son, lo cual puede tener consecuencias negativas ya que estimaciones erróneas de los periodos de vibración de la estructura térrea pueden conducir a diseños inadecuados para las características del sismo crítico.



## REFERENCIAS

- Bates C. R.** (1989) "Dynamic soil property measurements during triaxial testing", *Geotechnique* 39, No. 4, 721-726.
- Bésuelle, P. y Desrues, J.** (2001) "An internal instrumentation for axial and radial measurements in triaxial tests", *Geotechnical Testing Journal, JTJODJ*, Vol 24, No. 2, June 2001, pp 193-199.
- Bishop, A. H. y Hight, D. H. J.** (1977) "The value of Poisson's ratio in saturated soils and rocks stressed under undrained conditions", *Geotechnique* 27, No. 3, December 1977, pp 369-384.
- Blangy, J. P., Strandenes, S., Moos, D., y Nur, A.** (1993) "Ultrasonic velocities in sands-revisited", *Geophysics*, 58, pp 344-356.
- Bowles**, (1988) "*Foundation analysis and design*", Mc. Graw-Hill, Singapore.
- Brignoli, E. G. M., Gotti, M., y Stokoe, K. H.** (1996) "Measurement of shear waves in laboratory specimens by mean of piezoelectric transducers", *Geotechnical Testing Journal, JTJODJ*, Vol 19, No. 4, December 1996, pp 384-397.
- Chaudhary, K. S., Kiwano, J., y Hayano, Y.** (2003) "Measurement of quasi-elastic stiffness parameters of dense Toyoura sand in hollow cylinder apparatus and triaxial apparatus with bender elements" *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 1, December, pp 23-35.
- Cubrinovski, M., e Ishihara, K.** (2002) "Maximum and minimum void ratio characteristics", *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 6, December, pp. 65-78.
- Cuccovillo T. y Coop R.** (1997) "The measurement of local axial strains in triaxial tests using LVDTs", *Geotechnique* 47, No. 1, 167-171.
- De Alba P. y Baldwin K.C.** (1991) "Use of bender elements in soil dynamics experiments. Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics". *Geotechnical Special Publication No. 29*, ASCE, pp. 86-101.
- Domenmico, S. N.** (1984) "Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated reservoir", *Geophysics*, Vol 41, pp 882-894.
- Dong, J., Nakamura, K., Tatsuoka, F., y Kohata, Y.** (1994) "Deformation characteristics of gravels in triaxial compression tests and cyclic triaxial tests", *International Symposium of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Vol. 1, pp 17-23.
- D'Onofrio, A. Silvestri, F. y Vinale, F.** (1999) "A new torsional shear device", *Geotechnical Testing Journal, JTJODJ*, Vol 22, No. 2, June 1999, pp 101-111.
- Drenevich, V.P. y Richart, F. E. Jr.** (1970) "Dynamic prestraining of dry sand". *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol 96, No. SM2, Mar., pp. 453-469.
- Dvorkin, J., Nur, A.** (1996) "Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets", *Geophysics*, Vol 61, No. 5, September 1996, pp 1363-1370.
- Dvorkin, J., Moos, D., Packwood, J., y Nur, A.** (1996) "Identifying patchy saturation from well logs", *Department of Geophysics, Stanford University*, pp 1-10.
- Fawaz, A., Boulon, M., y Flavigny, E.** (2002) "Parameters deduced from the pressuremeter test". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, November 2002, pp 1333-1340.

- Fioravante, V.** (2000) "Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands for seismic wave propagation measured in triaxial testing", *Soils and Foundations*, Japan Geotechnical Society, Vol. 40, No. 4, pp 129-142.
- Fioravante, V., Capoferri, R., Hameury, O. y Jamiolkowski, M.** (1994) "Deformational characteristics of uncemented carbonate Quiou sand", *International Symposium of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Vol. 1, pp 55-61.
- Flores, O., Rosas, E., Romo, M. P., y Flores, R.** (2002) "Instrumentación y automatización del equipo triaxial cíclico MTS", XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Santiago de Querétaro, Méx., Noviembre.
- Flores, O., Rosas, E., y Romo, M. P.** (2002) "Automatización del equipo triaxial dinámico de columna resonante", XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Santiago de Querétaro, Méx., Noviembre.
- Gazetas, G.** (1991) "Foundation vibrations", *Foundations Engineering Handbook*, Ch. 15, H. Y. Fang, Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, NY, pp 553-593.
- Guillaume, M. y Yves, G.** (1998) "What does control  $V_p/V_s$  in granular rocks", *Geophysical research letters*, Vol. 25, No. 3 February.
- Gokhan Inci, Mazli Yesiller, y Takaaki Kagawa** (2001) "Experimental investigation of dynamic response of compacted clayey soils", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.26, No. 2, May 2003, pp 125-141.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y-S., y Soto, Y.** (1991) "A Simple gauge for local small strain measurement in the laboratory", *Soils and Foundations*, Vol 31, No. 1, pp 169-180.
- Han, D. H.** (1986) "Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments", Ph. D. thesis, Stanford University.
- Hardin, B. O. y Richart, F. E.** (1963) "Elastic clayey wave velocities in granular soils". *Journal of ASCE*, Vol. 89, pp 33-65.
- Hardin, B. O.** (1965) "The nature of damping in sands", *Proc. of ASCE*, Vol. 91, SM1, pp 63-97.
- Hardin, B. O. y Black, W. L.** (1969) "Closure to vibration of normally consolidated clay". *Proc. of ASCE*, Vol. 95, SM6, pp 1531-1537.
- Hardin, B. O. y Drnevich, V. P.** (1972a) "Shear modulus and damping in soils I, measurements and parameters effects". *Journal of SMF Div., Proc., ASCE*, Vol. 98, No. SM 6, pp 603-624.
- Hardin, B. O. y Drenevich, V. P.** (1972b) "Shear modulus and damping in soils II, design equation and curves". *Journal of SMF Div., Proc., ASCE*, Vol 98, No. SM 7, July, pp 667-692.
- Hoque, E., Tatsuoka, F. y Sato, T.** (1996) "Measuring anisotropic elastic properties of sand a large triaxial specimen". *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol 19, No. 4, 1996, pp 411-420.
- Hoque, E. y Tatsuoka, F.** (2004) "Triaxial testing system for measuring loading-rate effects during cyclic tests of sand", *Geotechnical Testing Journal*, GTJ11941, Vol 27, No. 5, 2004, pp 1-13.
- Iida, K.**, (1938) "The velocity of elastic waves in sand". *Bulletin, Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University*, Vol. 16, pp 131-144.
- Ishibashi, I., Kawamura, M. y Bhatia, S.** (1985) "Effect of initial shear on cyclic behavior of sand". *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111, No. 12, December, pp 1395-1410.
- Ishihara K.** (1996) "Soil behavior in earthquake geotechnics", Oxford University Press.



- James, W. S., Michael, E. C., y Thompson, D. D.** (1994) "Frame moduli of unconsolidated sands and sandstones", *Geophysics*, Vol 59, No. 9, September 1994, pp 1352-1361.
- Jun Yang** (2001) "A note on Rayleigh", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 130, No. 6, June 1, 2004, pp 621-629.
- Jovicic, V. y Coop M. R.** (1998) "The measurement of stiffness anisotropy in clays with bender elements tests in the triaxial apparatus", *Geotechnical Testing Journal, JTJODJ*, Vol 21, No. 1, March 1998, pp 3-10.
- Koefoed, O., Oosterveld, M. M., y Alons, I. J. G.** (1995) "A laboratory investigation into the elastic properties of limestone", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol 18, No. 2, June 1995, pp 137-156.
- Kokusho, T.** (1980) "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range". *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 20, No. 2. June., pp 45-60.
- Lambe, T. W., y Whitman, R. V.** (1969) *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, NY.
- Labudović, V.** (1984) "The effect of Poisson's ratio on fracture height", *Journal of Petroleum Technology*, February 1984, pp 287-290.
- LeQuang AnhDan, Junichi Koseki, y Takeshi Sato** (2002) "Comparison of Young's moduli of dense sand and gravel measured by dynamic and static methods", *Geotechnical Testing Journal*, Vol 25, No. 4, December 2002, pp 1-20.
- Lo Presti, D. C. F., Pallara, O., y Puci, I.** (1995) "A modified commercial triaxial testing system for small strain measurement: preliminary results on Pisa clay", *Geotechnical Testing Journal*, Vol 18, No. 1, March 1995, pp 15-31.
- Meyer, Z. y Kozlowski, T.** (1998) "Poisson coefficient analysis for organic soil", *Ground Improvement*, No. 2, pp 157-163.
- Mulilis, P. Mori, K., Seed, B., y Chan, C.** (1976) "Resistance to liquefaction due to sustained pressure". *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol 103, No. GT7, July, 1977.
- Nakagawa, K., Soga, K., y Mitchell, J. K.** (1996) "Pulse transmission system for measuring wave propagation in soils", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 4, pp 302-308.
- Nakagawa, K., Soga, K., y Mitchell, J. K.** (1997) "Observation of Biot compressional wave of the second kind on granular soils", *Géotechnique* 47, No. 1, pp 133-147.
- Rivera, R.** (1988) "Détermination des propriétés mécaniques des sables et des argiles en régime dynamique et cyclique aux faibles déformations". Tesis doctoral, Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Francia.
- Romo, M. P. y Taboada, V.** (1988) "Comportamiento cíclico de arcilla normalmente consolidada de la ciudad de México". Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Salem, H. S.** (2000) "Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments, determined from seismic compressional and shear wave velocities", *Geotechnique* 50, No. 4, 2000, pp 461-463.
- Scholey, G. K., Frost, J. D., Lo Presti, D. C. D., y Jamiolkowski, M.** (1995) "A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol 18, No. 2, June 1995, pp 137-156.
- Seed, H. B. e Idriss, I. M.** (1969) "The influence of soil conditions on ground motions during earthquakes". *J. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 94, No. SM1, pp 99-137, January.

- Sheeran, D. E., Baker, W. H., y Krizek, R. J.** (1967) "Experimental study of pulse velocities in compacted soils", Highway Research Record No. 177, Highway Research Board, pp 226-238.
- Spencer, J. W., Cates, M. E., y Thompson, D. D.** (1994) "Frame moduli of unconsolidated sands and sandstones", Geophysics, Vol 59, No. 9, pp 1352-1361.
- Stephenson, R. W.** (1978) "Ultrasonic testing for determining dynamic soil moduli", Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp 179-195.
- Stephenson, R. W.** (1978) "Ultrasonic testing for determining dynamic soil moduli", Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, 1978, pp 179-195.
- Strandenes, S.** (1991) "Rock physics analysis of the brent group reservoir in the Oseberg field: Stanford rock physics and borehole", Geophysics project.
- Sushil, K. C., Jiro, K. y Yutaka, H.** (2004) "Measurement of quasi-elastic stiffness parameters of dense Toyoura sand in hollow cylinder apparatus and triaxial apparatus with bender elements", Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, No. 1, 2004, pp 23-35.
- Takeji K., Tadashi H. y Ryouzuke H.** (2004) "Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 130, No. 6, June 1, 2004, pp 621-629.
- Talesnick, M. L., Kats, A., y Ringel, M.** (2000) "An investigation of the elastic stress-strain behavior of a bender sandstone and a sandstone-like material", Geotechnical Testing Journal, Vol 23, No. 3, September 2000, pp 257-273.
- Tatsuoka, F., Iwasaki, T. y Takagi, Y.** (1978) "Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus". Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 18, No. 2. June., pp 26-40.
- Tatsuoka, F.** (1988) "Some recent developments in triaxial testing systems for cohesionless soils", Advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP 977, American society for testing and materials, West Conshohocken, PA, pp 7-67.
- Tatsuoka, F., y Kohata, Y.** (1995) "Stiffness of hard soils and soft soils in engineering applications", Report of the Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Vol. 38, Serial No. 242, pp. 135-274.
- Troncoso, J.** (1995) "Design and behavior of tailings dams under seismic conditions", Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Abril, Vol 2, pp 1517-1522.
- Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., y Huang, Y.** (2002) "Resistance partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities" Soils and Foundations, Vol. 42, No. 6, December, pp 93-104.
- Yasuda, N., Nakamura, A., Ohta, N.** (1994) "Deformation characteristics of undisturbed riverbed gravel by in situ freezing sampling method", International Symposium of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 1, pp 17-23.
- Yin, H.** (1993) "Acoustic velocities and attenuation of rocks: Isotropy, intrinsic anisotropy, and stress induced anisotropy", Ph. D. thesis, Stanford University.
- Zeng, X. y Ni, B.** (1998) "Application of bender elements in measuring  $G_{max}$  of sand under  $K_0$  condition", Geotechnical Testing Journal, JTJODJ, Vol 21, No. 3, September 1998, pp 251-263.

---

## **ANEXO A**

RESULTADOS EXPERIMENTALES, RELACIÓN DE POISSON

---

En las tablas A-1 y A-2 se muestran las características volumétricas y de esfuerzo de las probetas ensayadas, para los materiales de La Parota y los Jales. La simbología utilizada corresponde a los siguientes parámetros:

<b>D<sub>m</sub></b>	Diámetro de la probeta, en cm
<b>L<sub>0</sub></b>	Altura de la probeta, en cm
<b>W<sub>m</sub></b>	Peso de la muestra, en g
<b>w</b>	Contenido de agua, en %
<b>A<sub>0</sub></b>	Área inicial de la muestra, en cm <sup>2</sup>
<b>γ<sub>m</sub></b>	Peso volumétrico del suelo, en g/cm <sup>3</sup>
<b>Dr</b>	Compacidad relativa de la probeta de suelo, en %
<b>σ<sub>c</sub></b>	Esfuerzo de confinamiento, en kPa

La compacidad relativa que se reporta corresponde a la que tiene la probeta antes de aplicar el esfuerzo de confinamiento.

En las figuras A-1, A-2 y A-3 se muestran, para el material de La Parota, los resultados experimentales para los tres contenidos de agua: 0.0, 2.5 y 3.5 %. Para cada contenido de agua se presentan tres gráficos, cada uno de ellos para una condición de esfuerzo de confinamiento aplicado: 49, 98 y 196 kPa y para cada una de estas condiciones de esfuerzo se presentan resultados de dos a cuatro muestras con diferente compacidad relativa.

Con el mismo esquema de presentación se muestran resultados, también para La Parota, en las figuras A-4, A-5 y A-6; es decir, para cada contenido de agua se muestran tres gráficos, cada uno de ellos para un intervalo definido de compacidad relativa, y en este caso la variable que se analiza es el incremento del esfuerzo de confinamiento.

En las figuras A-7, A-8 y A-9 se muestra, para La Parota, los resultados para cada uno de los esfuerzos de confinamiento, para un intervalo definido de compacidad relativa, donde se analiza la influencia del contenido de agua en la variación de la relación de Poisson.

Para el material de Jales, en las figuras A-10 y A-11 se muestran los resultados experimentales para los dos contenidos de agua: 0.0, y 6.5 %. Para cada contenido de agua se presentan tres gráficos, cada uno de ellos para una condición de esfuerzo de confinamiento aplicado: 49, 98 y 196 kPa (0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>) y para cada una de estas condiciones de esfuerzo se presentan resultados de dos a cuatro muestras con diferente compacidad relativa.

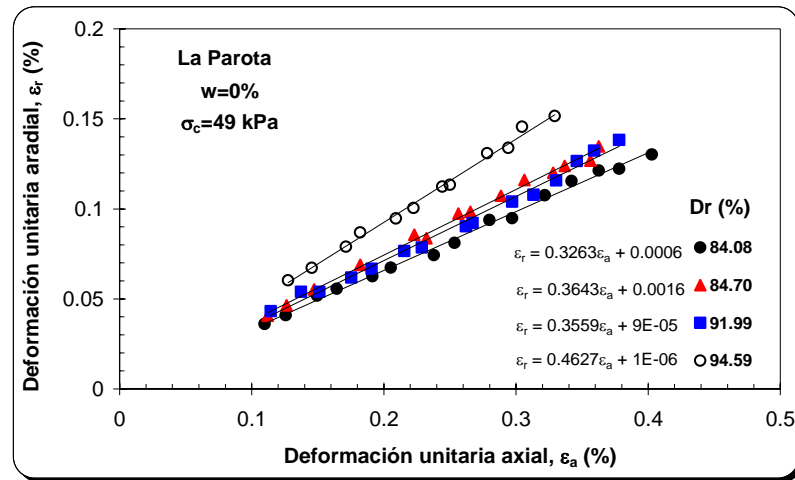
Con el mismo esquema de presentación, en las figuras A-12 y A-13 se presentan resultados para Jales; es decir, para cada contenido de agua se muestran tres gráficos, cada uno de ellos para un intervalo definido de compacidad relativa, y en este caso la variable que se analiza es el incremento del esfuerzo de confinamiento.

Tabla TA-1 Programa de ensayos realizados en el material de La Parota

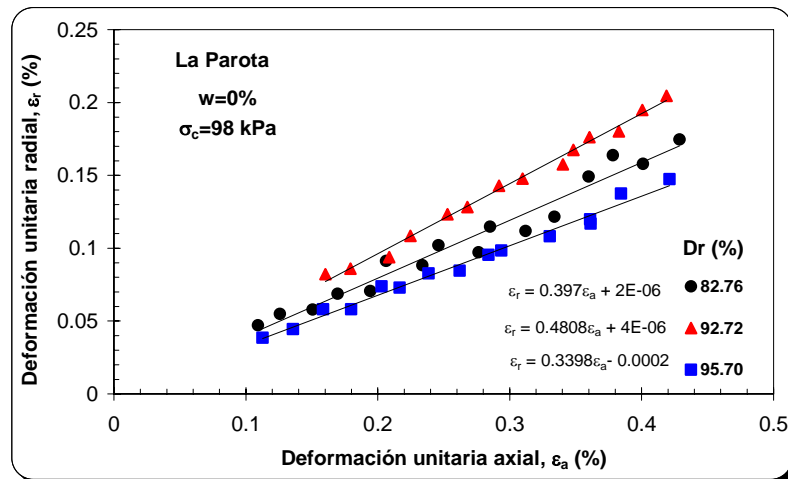
DATOS DE LA PROBETA								
No.	D <sub>m</sub> cm	L <sub>0</sub> cm	W <sub>m</sub> g	w %	A <sub>0</sub> cm <sup>2</sup>	γ <sub>m</sub> g/cm <sup>3</sup>	Dr %	σ <sub>c</sub> kPa
1	10.14	25.80	3861.39	0.00	80.75	1.853	94.59	49
2	10.14	25.80	3841.79	0.00	80.75	1.844	92.40	49
3	10.14	25.80	3768.60	0.00	80.75	1.809	84.70	49
4	10.14	25.80	3762.63	0.00	80.75	1.806	84.08	49
5	10.15	25.60	3800.00	3.43	80.91	1.835	76.82	49
6	10.15	25.80	3720.00	3.41	80.91	1.782	64.25	49
7	10.15	25.70	3621.40	3.73	80.91	1.741	52.76	49
8	10.11	25.80	3575.43	3.61	80.28	1.726	49.65	49
9	10.15	25.70	3863.60	0.00	80.91	1.858	95.70	98
10	10.12	25.75	3819.26	0.00	80.44	1.844	92.72	98
11	10.15	25.75	3744.06	0.00	80.91	1.797	82.76	98
12	10.13	25.80	3779.80	2.17	80.58	1.818	78.18	49
13	10.15	25.80	3734.40	2.52	80.91	1.789	69.83	49
14	10.13	25.70	3645.16	2.28	80.56	1.761	67.75	49
15	9.93	25.70	3404.20	2.68	77.44	1.710	50.58	49
16	10.12	25.80	3800.00	2.32	80.44	1.831	81.12	98
17	10.13	25.75	3709.20	2.28	80.53	1.789	71.45	98
18	10.06	25.70	3545.30	1.75	79.49	1.736	60.45	98
19	10.16	25.75	3788.90	3.55	81.07	1.815	72.42	98
20	10.14	25.75	3712.90	3.77	80.69	1.787	64.63	98
21	9.92	25.70	3363.59	3.46	77.29	1.693	44.71	98
22	10.14	25.80	3866.70	0.00	80.75	1.856	96.00	196
23	10.15	25.75	3826.70	0.00	80.91	1.837	91.70	196
24	10.13	25.75	3763.10	0.00	80.60	1.813	86.93	196
25	10.15	25.75	3797.75	2.19	80.91	1.823	80.78	196
26	10.15	25.75	3719.00	2.56	80.91	1.785	70.53	196
27	10.00	25.65	3405.39	2.50	78.54	1.690	48.70	196
28	10.12	25.75	3808.50	3.70	80.40	1.839	78.60	196
29	10.12	25.75	3692.00	3.39	80.44	1.783	66.32	196
30	9.96	25.65	3377.37	3.57	77.91	1.690	45.97	196
31	10.13	25.70	3853.24	0.00	80.60	1.860	97.08	196
32	10.15	25.75	3803.10	0.00	80.91	1.825	89.36	196
33	10.02	25.75	3437.90	2.03	78.85	1.693	49.34	98

Tabla TA-2 Programa de ensayos realizados en el material de Jales SLP

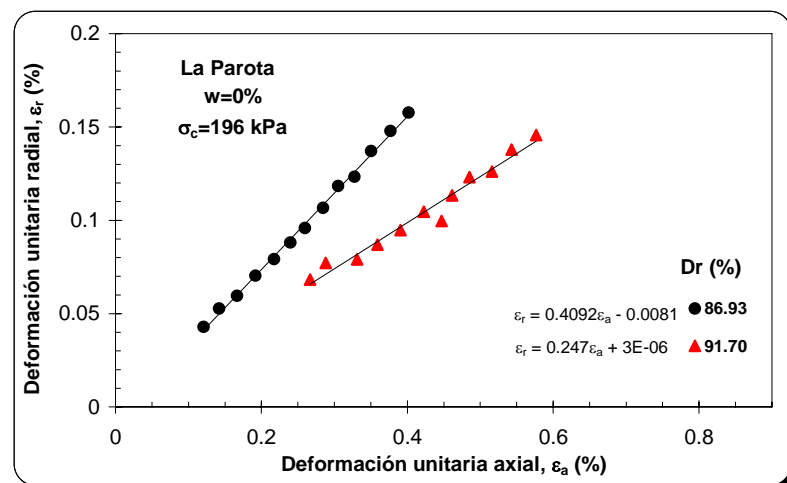
DATOS DE LA PROBETA								
No.	D <sub>m</sub> cm	L <sub>0</sub> cm	W <sub>m</sub> g	w %	A <sub>0</sub> cm <sup>2</sup>	γ <sub>m</sub> g/cm <sup>3</sup>	Dr %	σ <sub>c</sub> kPa
1	10.14	25.80	3865.00	0.00	80.75	1.86	96.99	49
2	10.13	25.75	3766.40	0.00	80.60	1.81	93.11	49
3	10.14	25.70	3658.28	0.00	80.75	1.76	87.82	49
4	10.14	25.80	3865.00	0.00	80.75	1.86	96.99	98
5	10.12	25.65	3630.00	0.00	80.44	1.76	87.48	98
6	10.07	25.70	3538.46	0.00	79.64	1.73	84.20	98
7	10.14	25.80	3865.00	0.00	80.75	1.86	96.99	196
8	10.12	25.70	3663.00	0.00	80.44	1.77	88.78	196
9	10.09	25.70	3585.60	0.00	79.96	1.74	85.93	196
10	10.15	25.75	3377.30	5.93	80.91	1.62	59.83	49
11	10.03	25.75	3110.84	6.97	79.01	1.53	44.86	49
12	9.52	25.75	2677.80	6.76	71.18	1.46	34.74	49
13	10.14	25.75	3395.51	6.46	80.75	1.63	60.33	98
14	10.00	25.70	3063.92	6.49	78.54	1.52	44.23	98
15	9.49	25.70	2598.82	6.07	70.73	1.43	31.11	98
16	10.09	25.75	3365.50	6.72	79.96	1.63	60.03	196
17	10.04	25.75	3091.80	6.67	79.17	1.52	43.65	196
18	9.37	25.60	2682.50	6.48	68.96	1.52	44.50	196



a)  $\sigma_c=49 \text{ kPa}$  ( $0.50 \text{ kg/cm}^2$ )

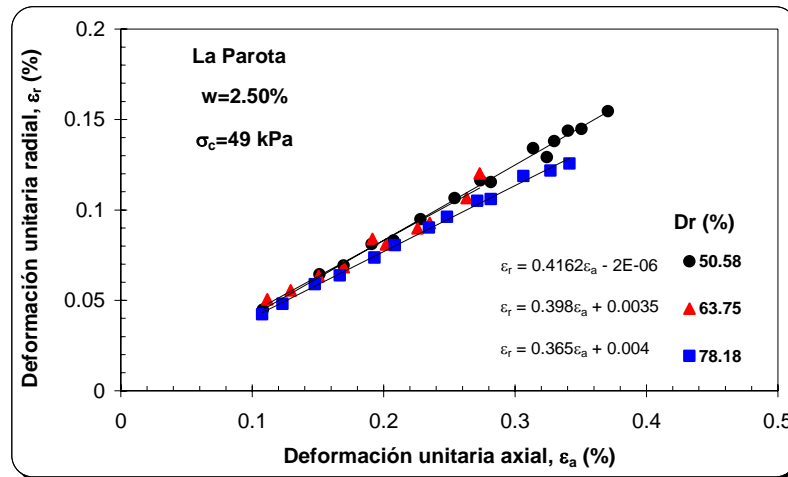


b)  $\sigma_c=98 \text{ kPa}$  ( $1 \text{ kg/cm}^2$ )

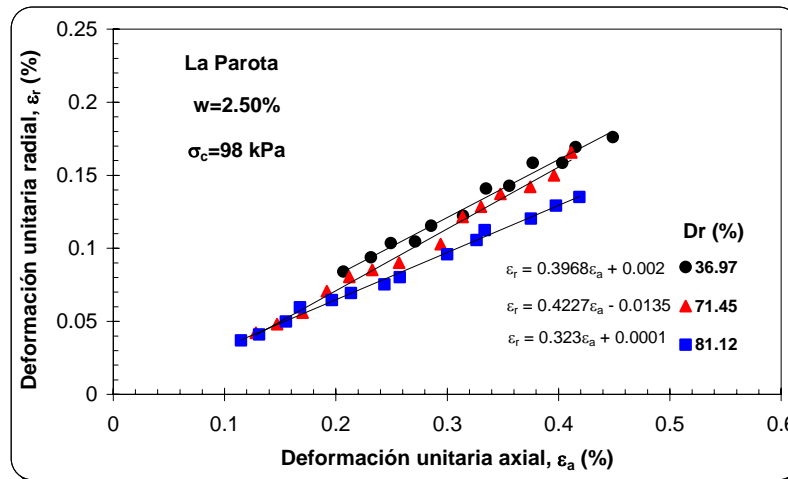


c)  $\sigma_c=196 \text{ kPa}$  ( $2 \text{ kg/cm}^2$ )

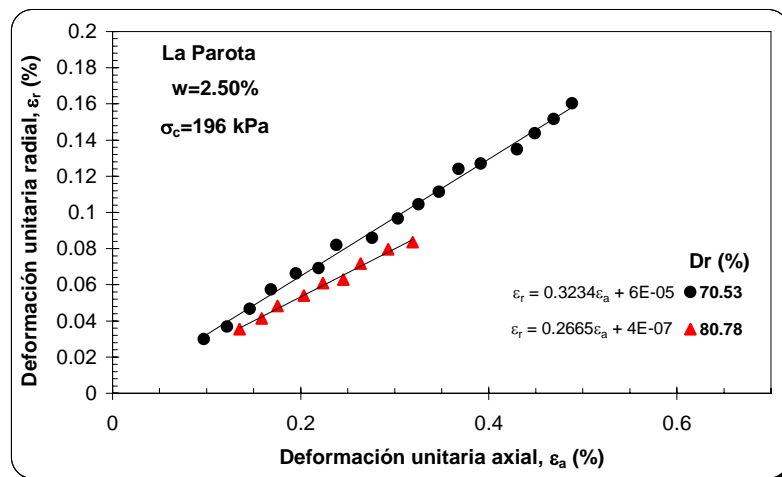
Figura A-1 Variación de la Relación de Poisson con la compacidad relativa, para  $w=0 \%$



a)  $\sigma_c=49$  kPa ( $0.50$  kg/cm<sup>2</sup>)

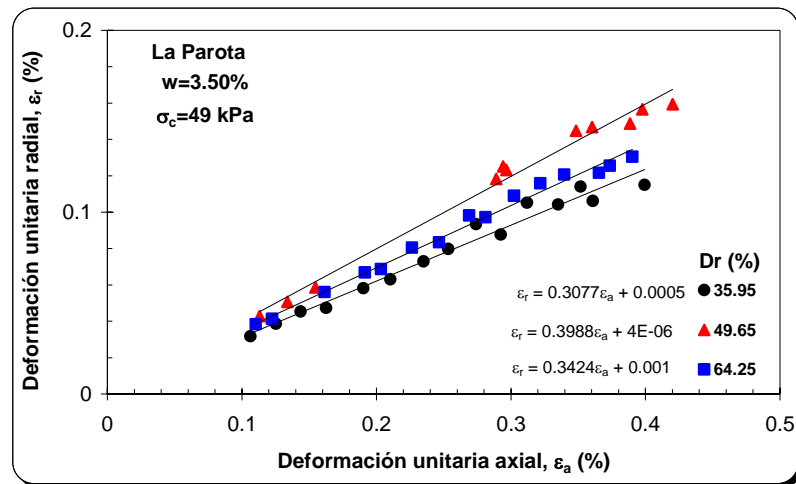


b)  $\sigma_c=98$  kPa ( $1$  kg/cm<sup>2</sup>)

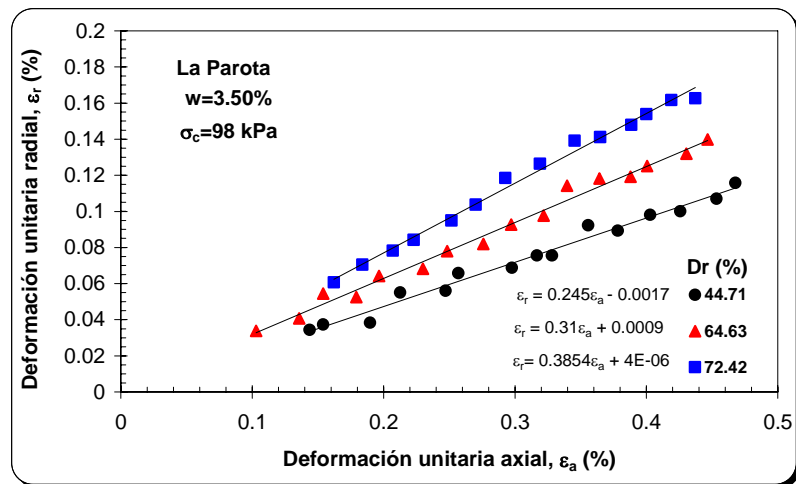


c)  $\sigma_c=196$  kPa ( $2$  kg/cm<sup>2</sup>)

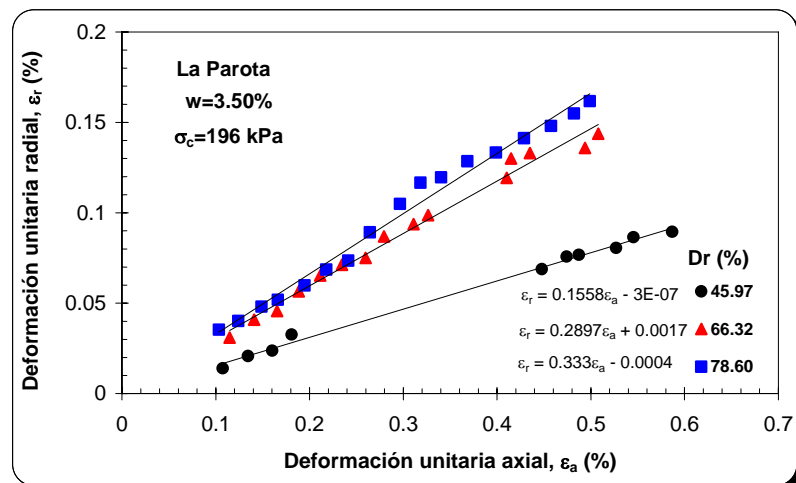
Figura A-2 Variación de la Relación de Poisson con la compacidad relativa, para w=2.5 %



a)  $\sigma_c=49$  kPa ( $0.50$  kg/cm<sup>2</sup>)



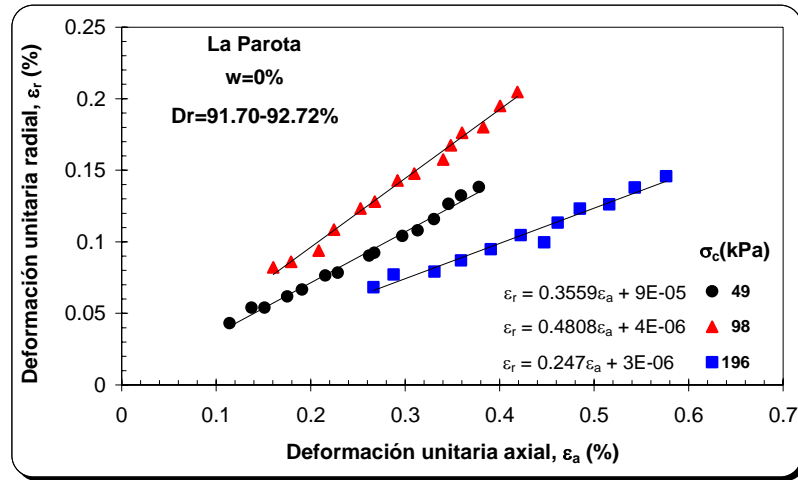
b)  $\sigma_c=98$  kPa ( $1$  kg/cm<sup>2</sup>)



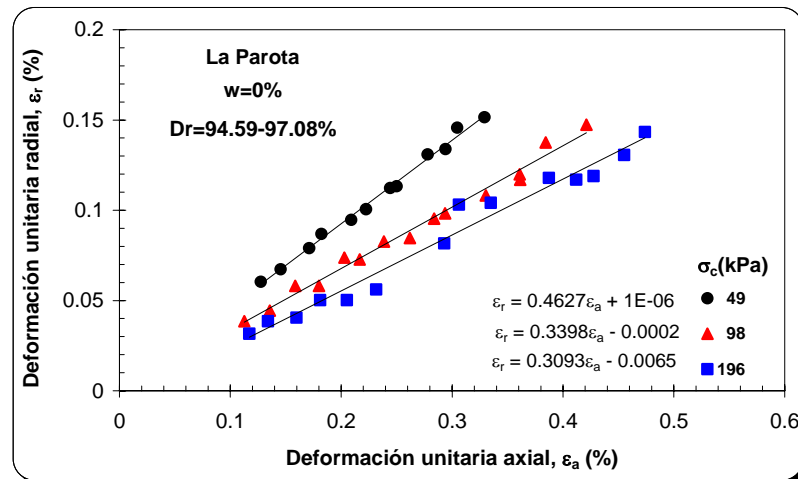
c)  $\sigma_c=196$  kPa ( $2$  kg/cm<sup>2</sup>)

Figura A-3 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa, para w=3.50 %

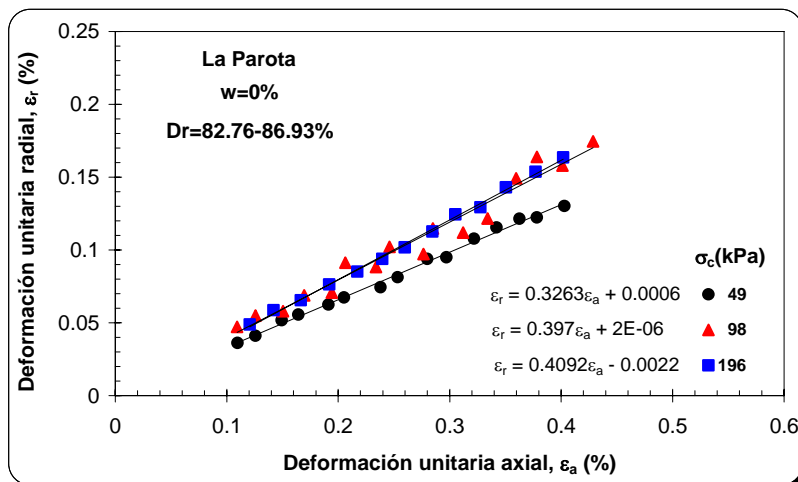




a)  $Dr = 91.99-94.60\%$

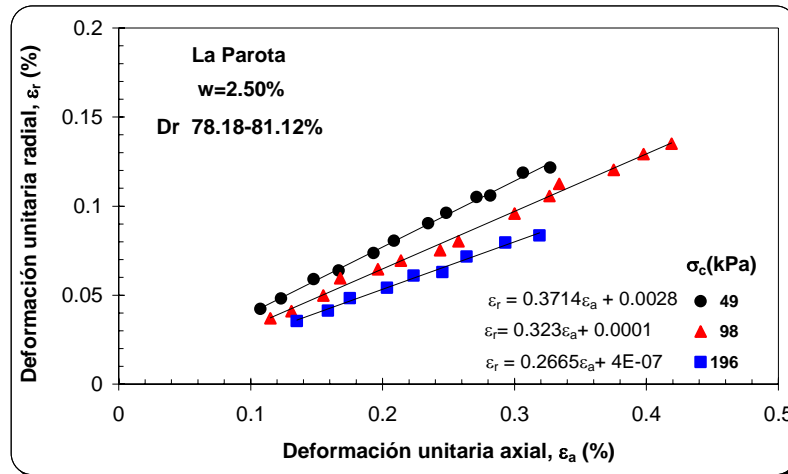


b)  $Dr = 94.05-95.05\%$

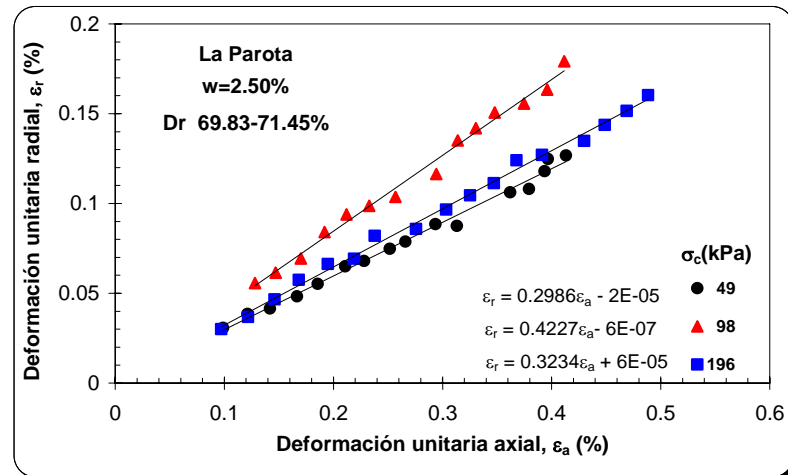


c)  $Dr = 91.40-85.13\%$

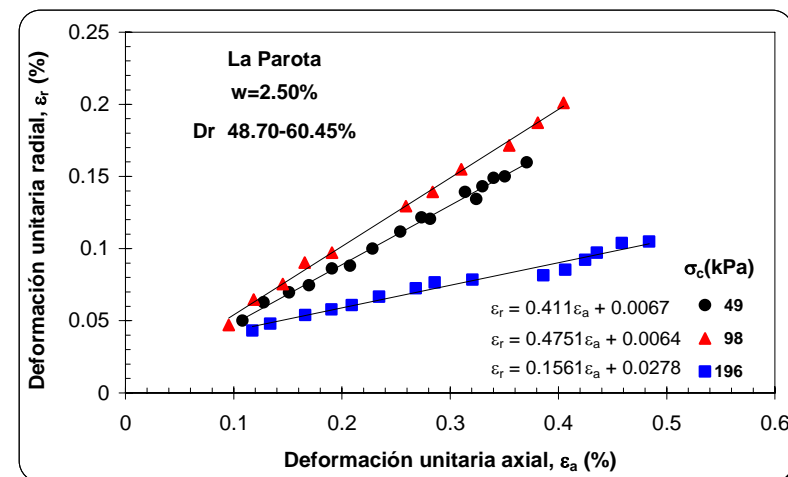
Figura A-4 Variación de la Relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para w=0.00 %



a)  $Dr=77.32-79.68\%$

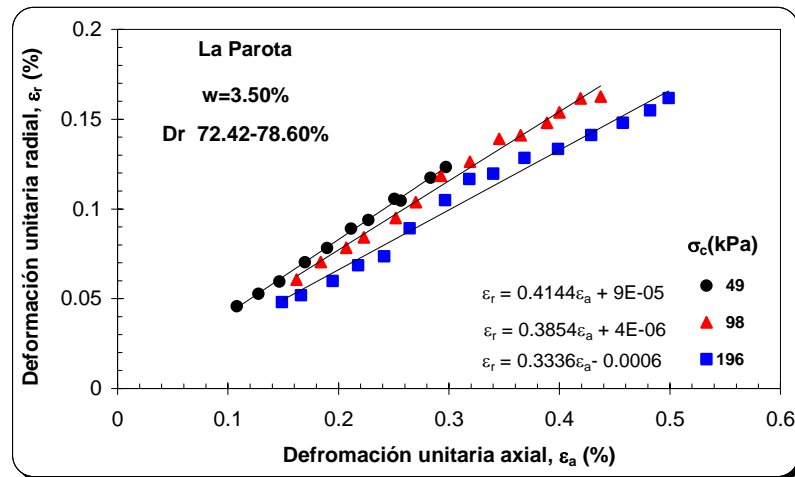


b)  $Dr=67.88-69.97\%$

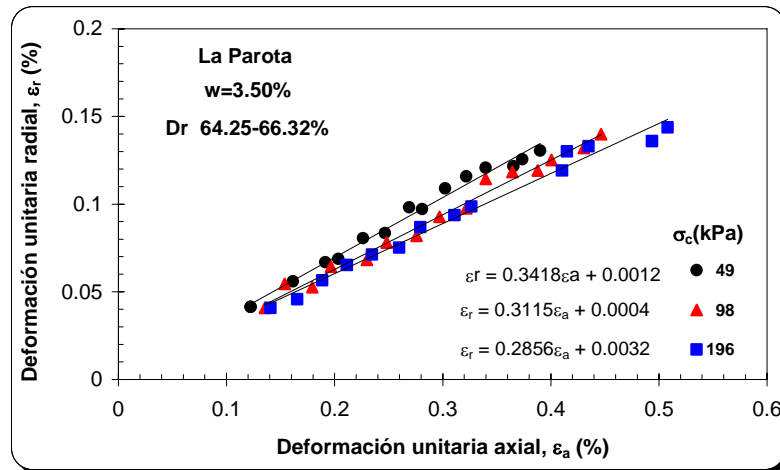


c)  $Dr=44.13-59.15\%$

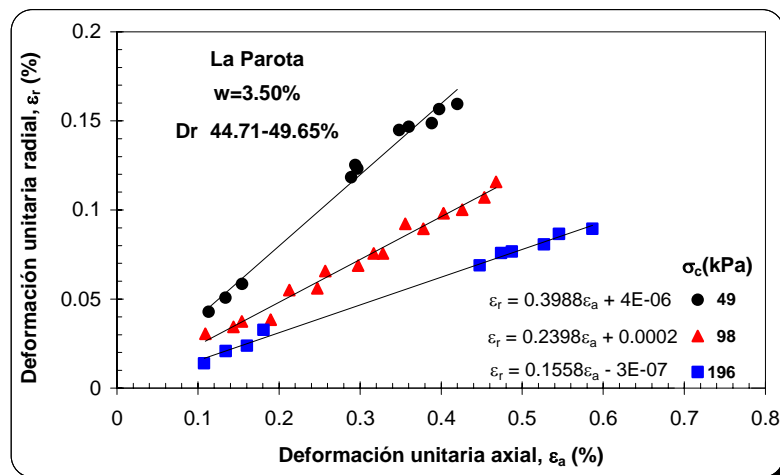
Figura A-5 Variación de la Relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para w=2.50 %



a)  $Dr = 70.92-75.98\%$



b)  $Dr = 67.88-69.97\%$



c)  $Dr = 39.29-48.75\%$

Figura A-6 Variación de la Relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para w=3.50 %

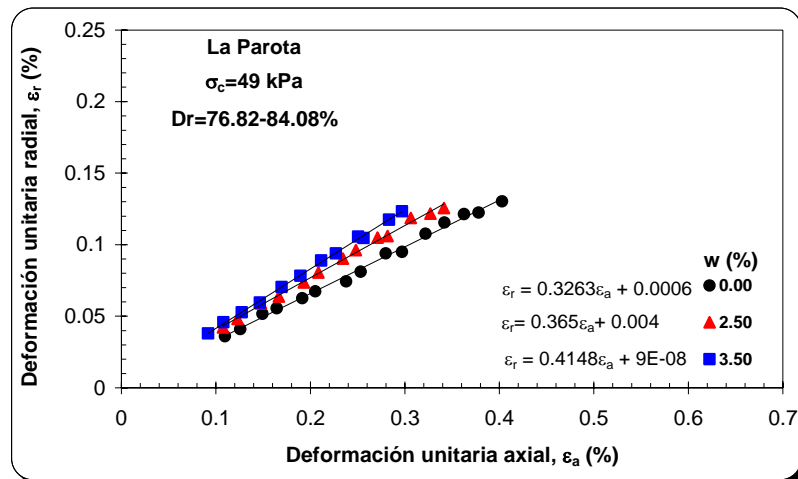


Figura A-7 Variación de la Relación de Poisson con el contenido de agua, para  $\sigma_c = 49 \text{ kPa}$  ( $0.50 \text{ kg/cm}^2$ )

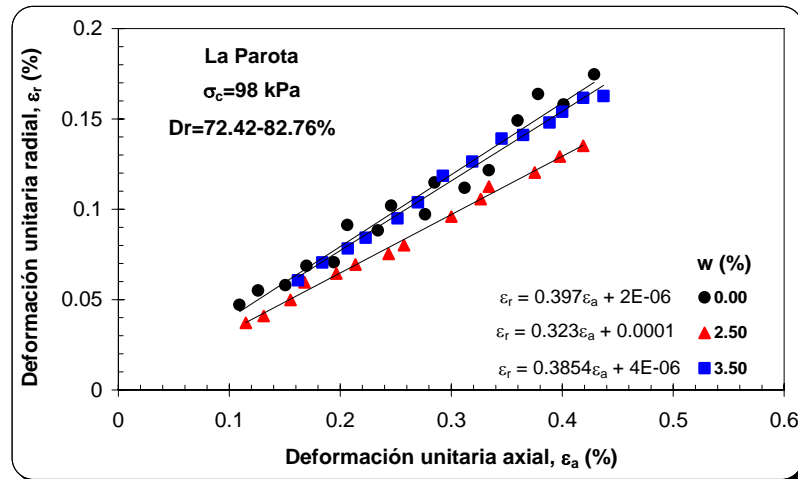


Figura A-8 Variación de la Relación de Poisson con el contenido de agua, para  $\sigma_c = 98 \text{ kPa}$  ( $1 \text{ kg/cm}^2$ )

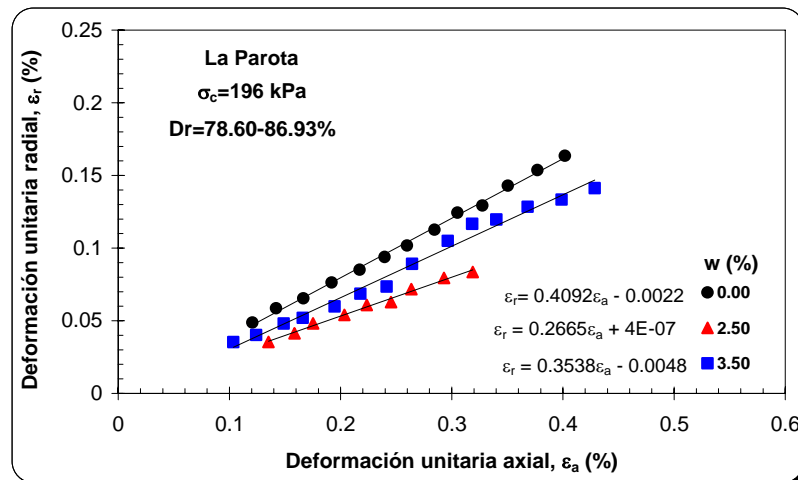
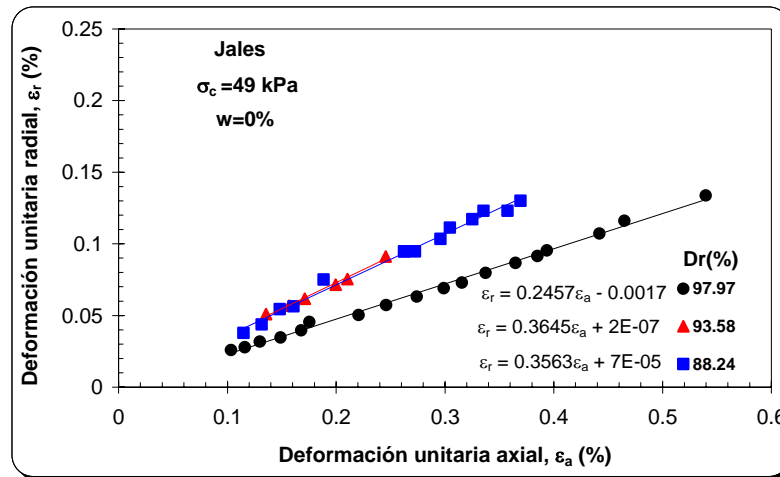
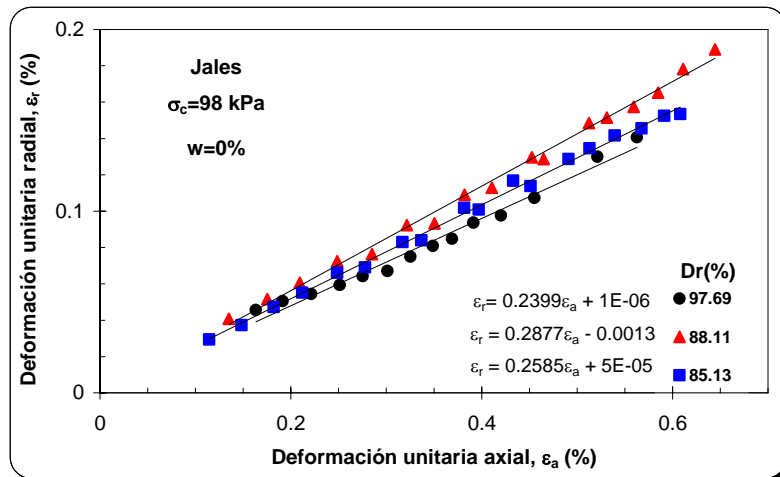


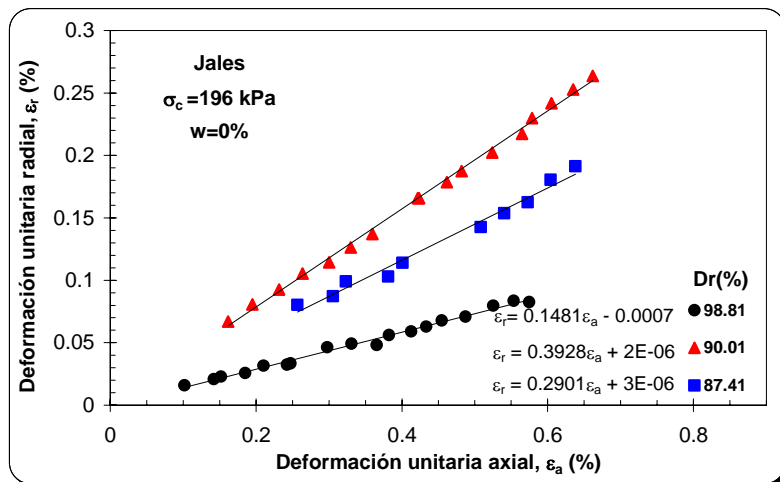
Figura A-9 Variación de la Relación de Poisson con el contenido de agua, para  $\sigma_c = 196 \text{ kPa}$  ( $2 \text{ kg/cm}^2$ )



a)  $\sigma_c = 49 \text{ kPa}$  ( $0.50 \text{ kg/cm}^2$ )

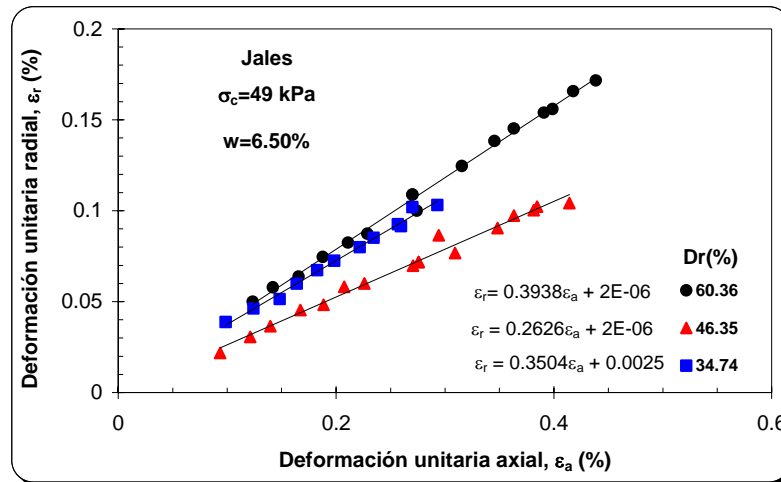


b)  $\sigma_c = 98 \text{ kPa}$  ( $1 \text{ kg/cm}^2$ )

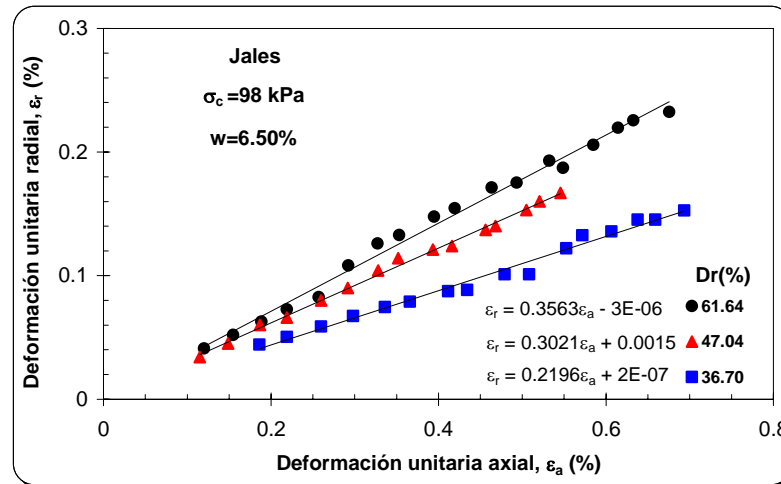


c)  $\sigma_c = 196 \text{ kPa}$  ( $2 \text{ kg/cm}^2$ )

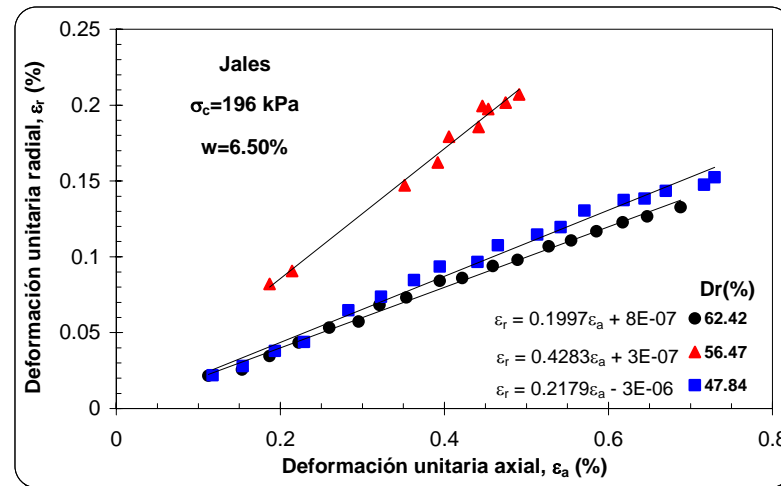
Figura A-10 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa, para  $w = 0\%$



a)  $\sigma_c = 49 \text{ kPa}$  ( $0.50 \text{ kg/cm}^2$ )

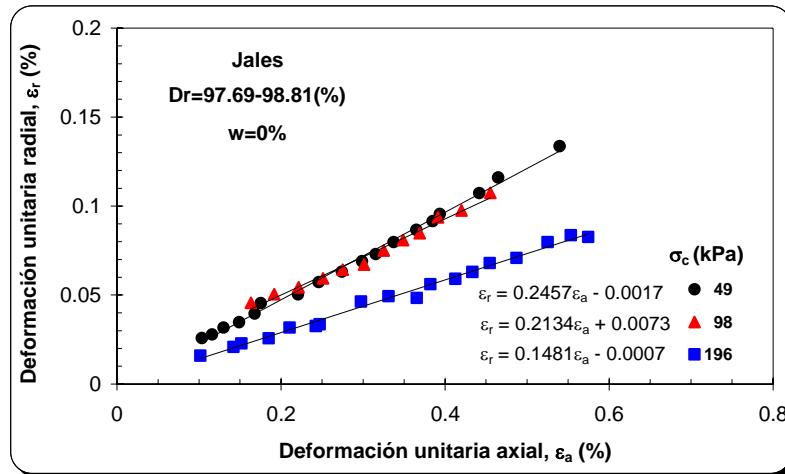


b)  $\sigma_c = 98 \text{ kPa}$  ( $1 \text{ kg/cm}^2$ )

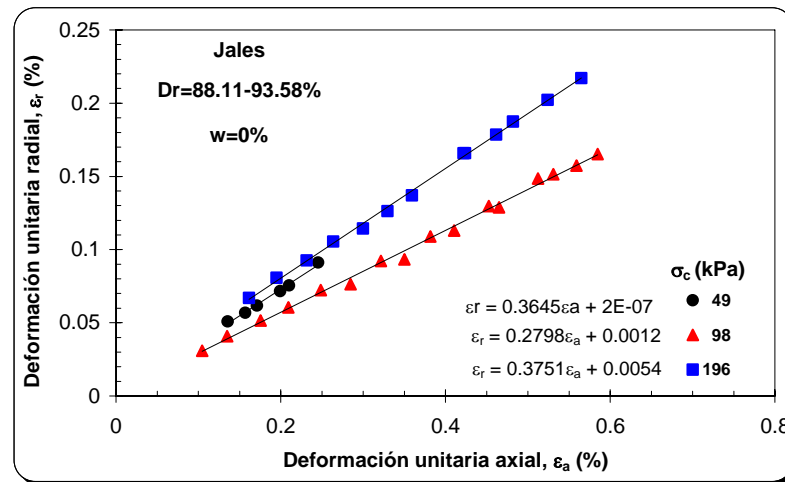


c)  $\sigma_c = 196 \text{ kPa}$  ( $2 \text{ kg/cm}^2$ )

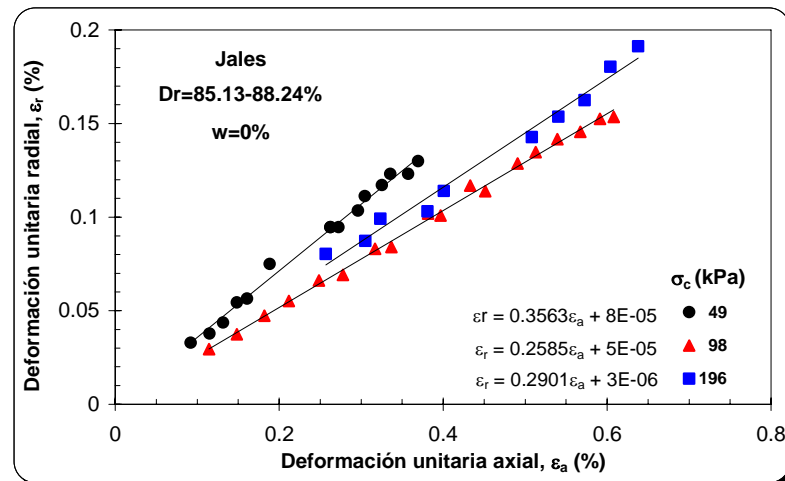
Figura A-11 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa, para  $w = 6.50\%$



a)  $Dr=97.69-98.81$  %

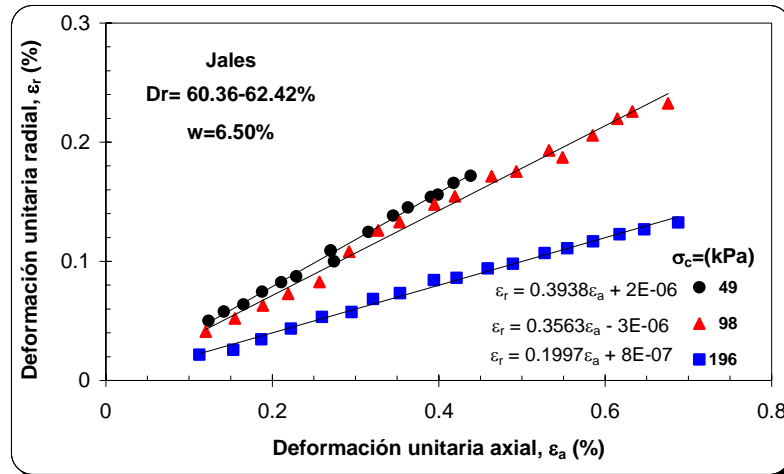


b)  $Dr=88.11-93.58$  %

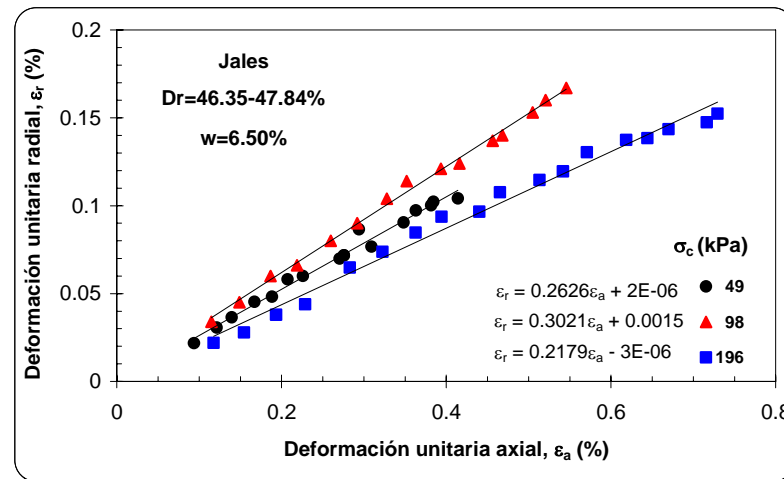


c)  $Dr=85.13-88.24$  %

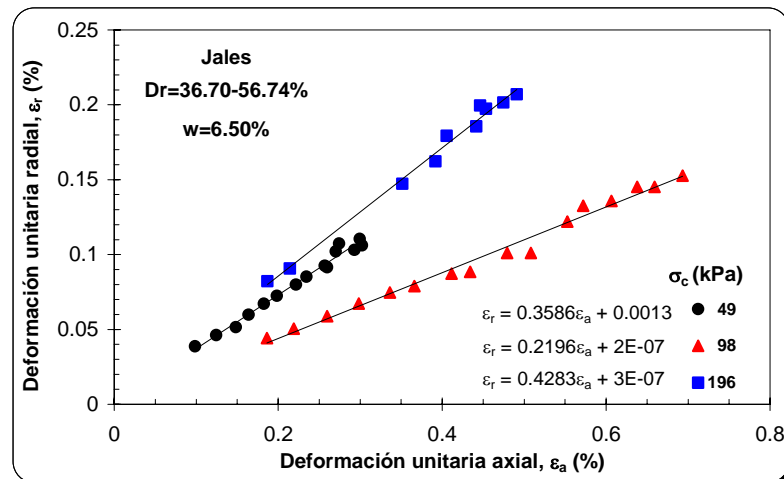
Figura A-12 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para  $w=0$  %



a)  $Dr=60.36-62.42$  %



b)  $Dr=46.35-47.84$  %



c)  $Dr=36.70-56.74$  %

Figura A-13 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, para  $w=6.50$  %



---

## **ANEXO B**

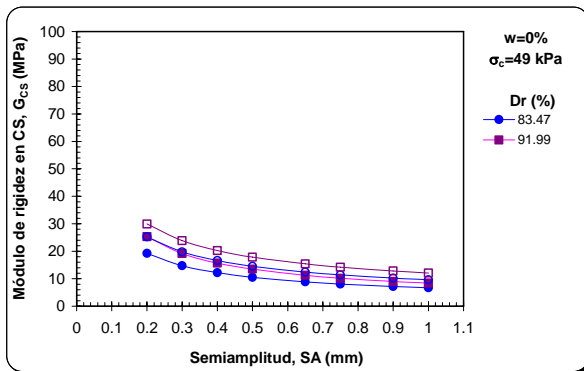
RESULTADOS EXPERIMENTALES, MÓDULO DE RIGIDEZ

---

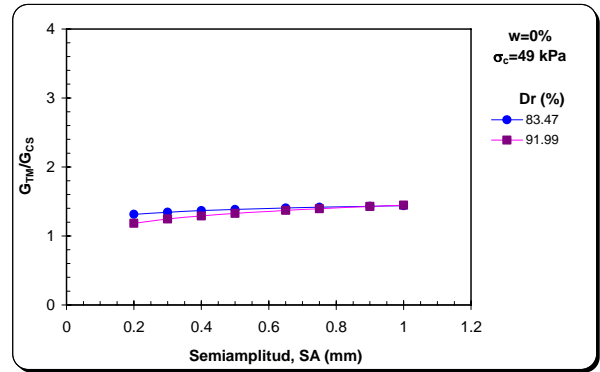
En este anexo se muestran los resultados que fueron analizados en el capítulo 5. En cada figura se presentan dos gráficos, en el del lado izquierdo la curva del módulo de rigidez vs semiapertura aplicada y en el lado derecho la curva  $G_{TM}/G_{CS}$  vs semiapertura. Los gráficos con símbolos llenos fueron calculados con el desplazamiento registrado en el cabezal superior (CS) y corresponden a la altura total de la muestra y con símbolos vacíos se calcularon con la señal de desplazamiento en el tercio medio de la probeta (TM) y se tomó como altura el espesor de esta franja de suelo.

Se resumen los resultados experimentales para mostrar la influencia de la compactación relativa, el esfuerzo de confinamiento y el contenido de agua en la relación de módulos, para los materiales de La Parota y los Jales.

La razón de graficar el módulo de rigidez con la semiapertura y no contra la distorsión angular es debido a que las distorsiones obtenidas en el TM son menores que para el CS, de tal forma que al colocar las dos gráficas en una misma figura será difícil distinguir punto a punto la diferencia entre ambas ya que el gráfico para el CS estaría corrido hacia la derecha respecto al del TM.

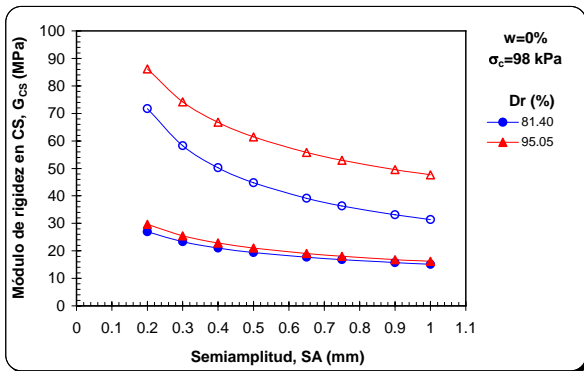


a) Módulo de rigidez en CS y TM

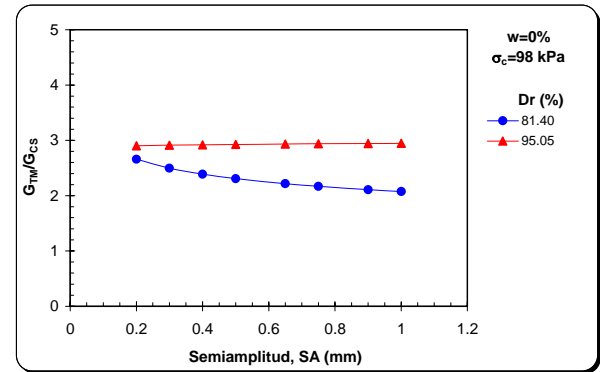


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-1 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0\%$ ,  $\sigma_c=49\text{ kPa}$  ( $0.50\text{ kg/cm}^2$ ), La Parota

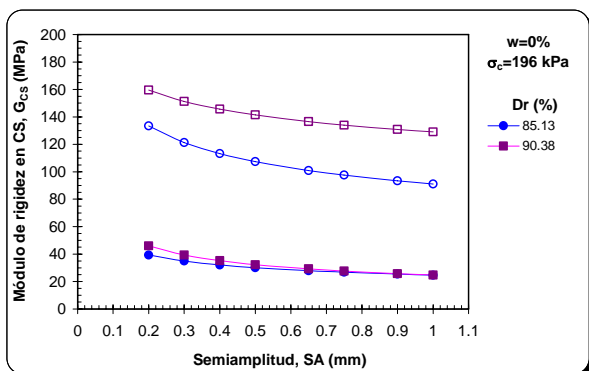


a) Módulo de rigidez en CS y TM

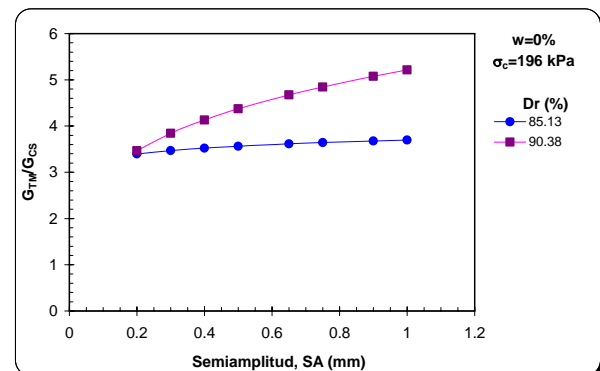


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-2 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0\%$ ,  $\sigma_c=98\text{ kPa}$  ( $1\text{ kg/cm}^2$ ), La Parota

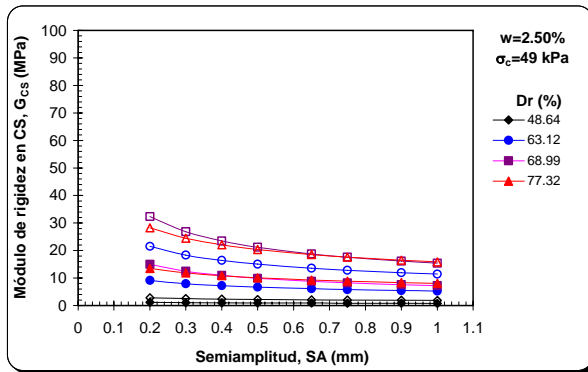


a) Módulo de rigidez en CS y TM

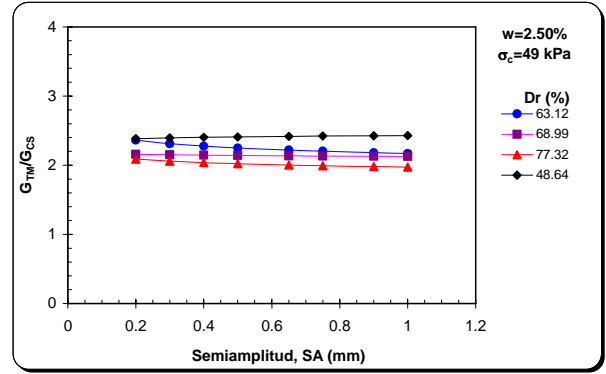


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-3 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0\%$ ,  $\sigma_c=196\text{ kPa}$  ( $2\text{ kg/cm}^2$ ), La Parota

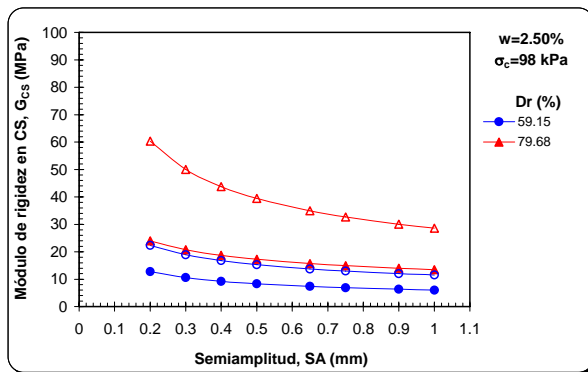


a) Módulo de rigidez en CS y TM

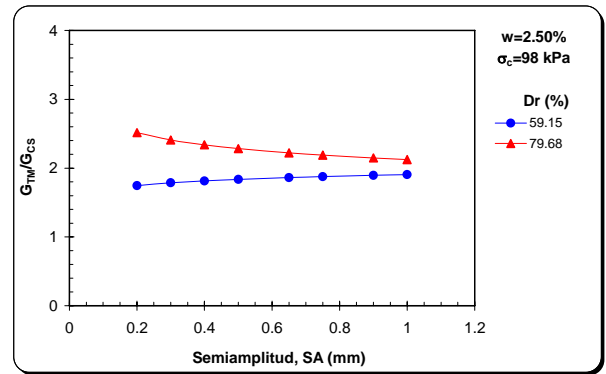


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-4 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.50\%$ ,  $\sigma_c=49\text{ kPa}$  ( $0.50\text{ kg/cm}^2$ ), La Parota

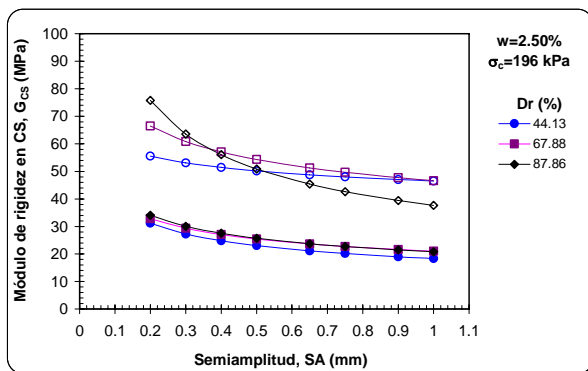


a) Módulo de rigidez en CS y TM

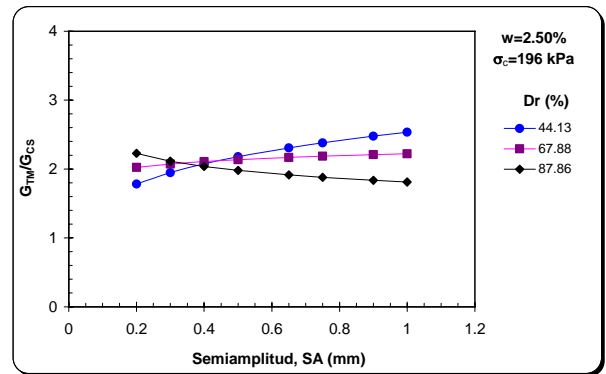


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-5 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.50\%$ ,  $\sigma_c=98\text{ kPa}$  ( $1\text{ kg/cm}^2$ ), La Parota

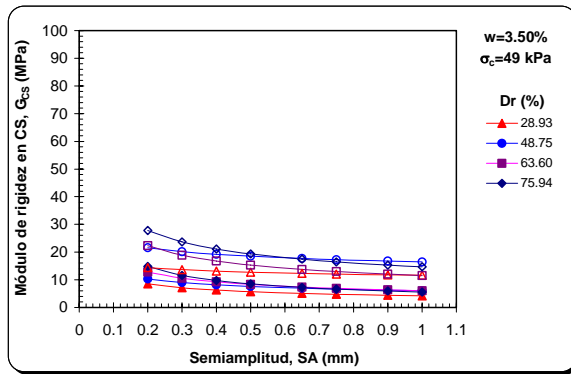


a) Módulo de rigidez en CS y TM

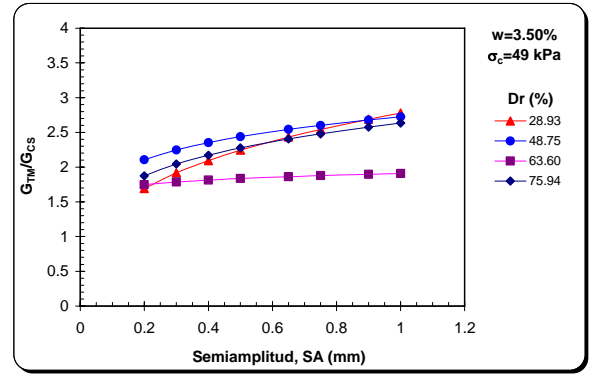


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-6 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.50\%$ ,  $\sigma_c=196\text{ kPa}$  ( $2\text{ kg/cm}^2$ ), La Parota

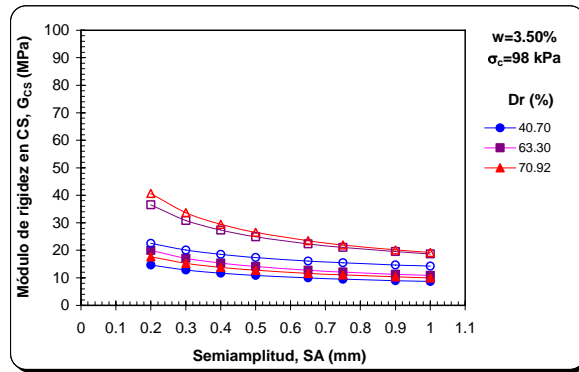


a) Módulo de rigidez en CS y TM

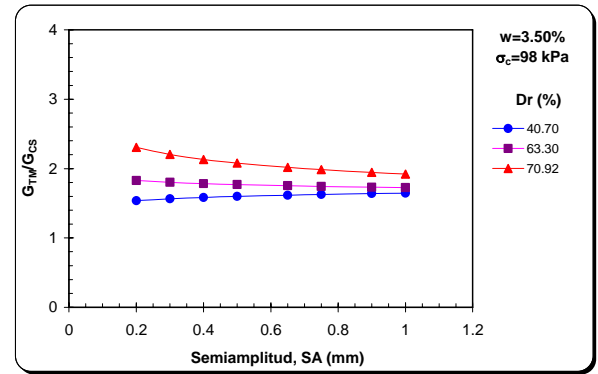


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-7 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.50\%$ ,  $\sigma_c=49$  kPa ( $0.50$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota

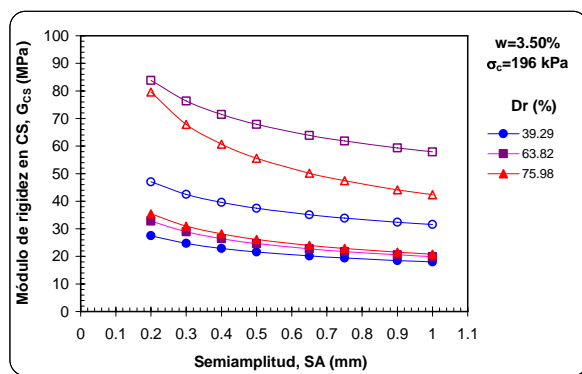


a) Módulo de rigidez en CS y TM

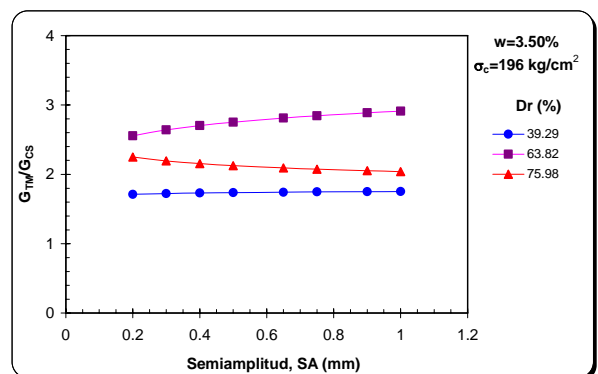


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-8 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.50\%$ ,  $\sigma_c=98$  kPa ( $1$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota



a) Módulo de rigidez en CS y TM



b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-9 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.50\%$ ,  $\sigma_c=196$  kPa ( $2$  kg/cm<sup>2</sup>), La Parota

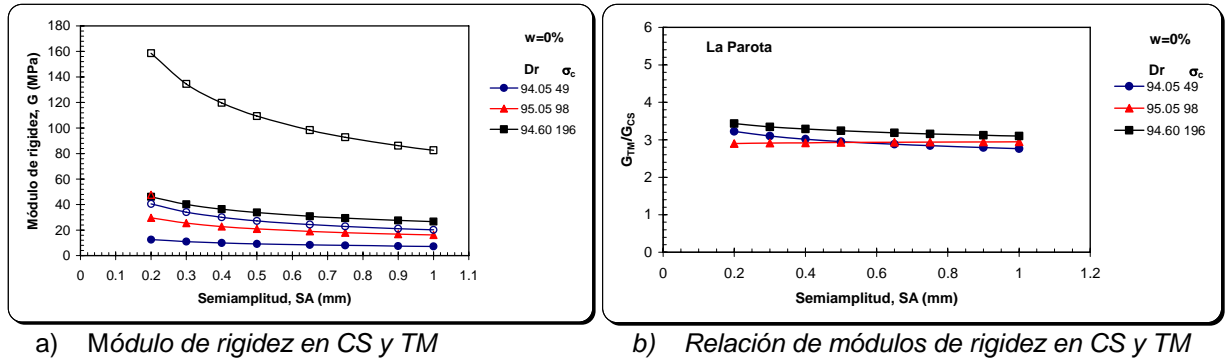


Figura B-10 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$ ,  $D_r$  entre 94.05-94.60 %, La Parota

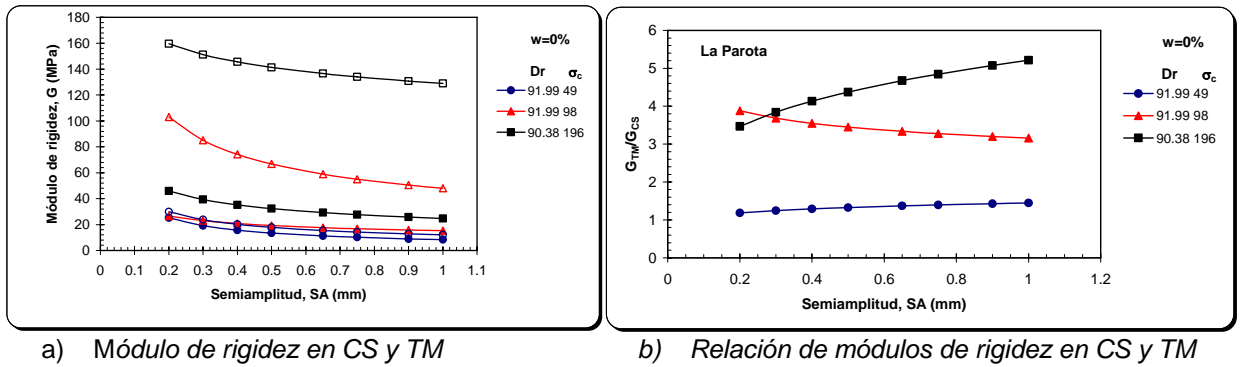


Figura B-11 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$ ,  $D_r$  entre 90.38-91.99 %, La Parota

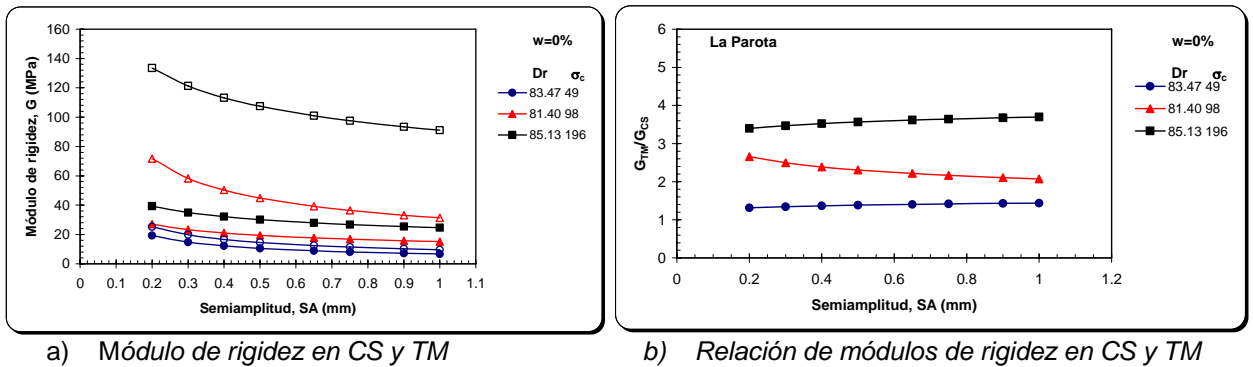
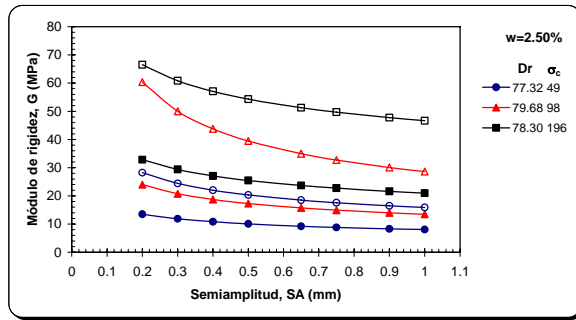
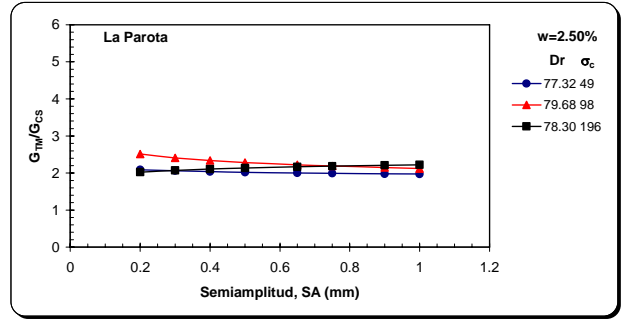


Figura B-12 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$ ,  $D_r$  entre 81.40-85.13 %, La Parota

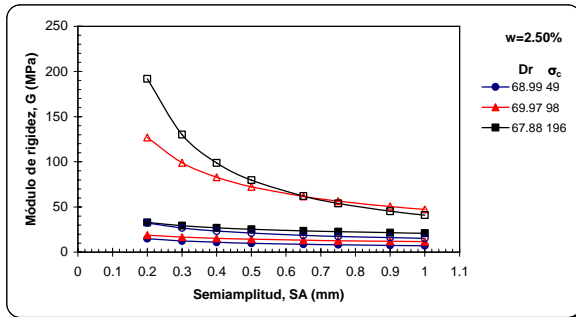


a) Módulo de rigidez en CS y TM

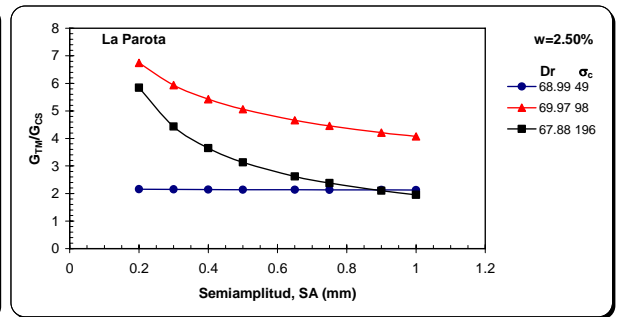


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-13 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.50\%$ ,  $Dr$  entre 77.62-79.68 %, La Parota

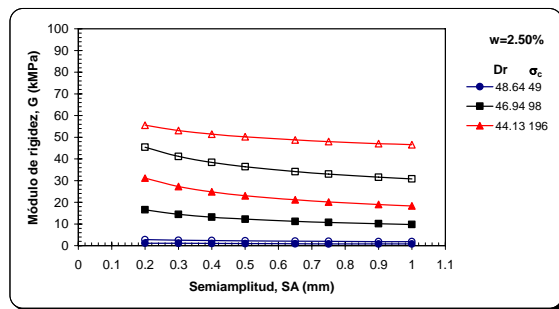


a) Módulo de rigidez en CS y TM

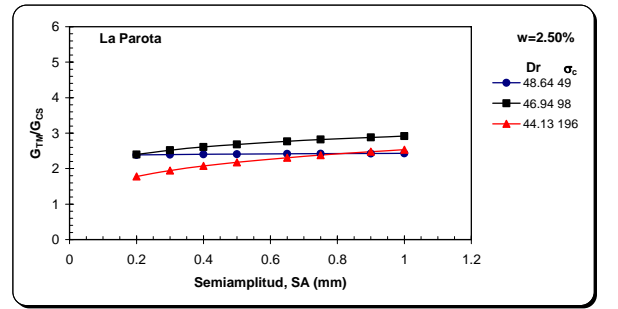


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-14 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.50\%$ ,  $Dr$  entre 67.88-68.99 %, La Parota

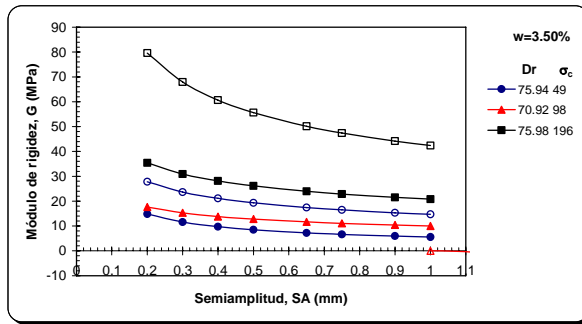


a) Módulo de rigidez en CS y TM

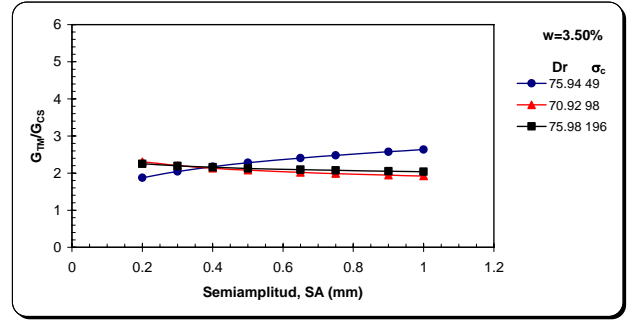


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-15 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=2.50\%$ ,  $Dr$  entre 44.13-48.64 %, La Parota

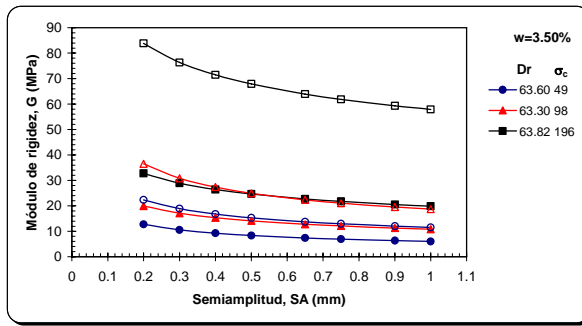


a) Módulo de rigidez en CS y TM

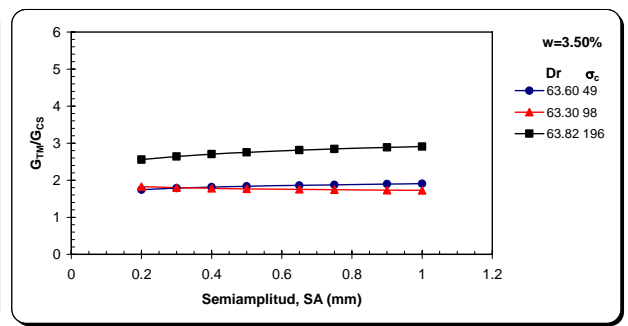


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-16 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.50\%$ ,  $Dr$  entre 70.92-75.98 %, La Parota

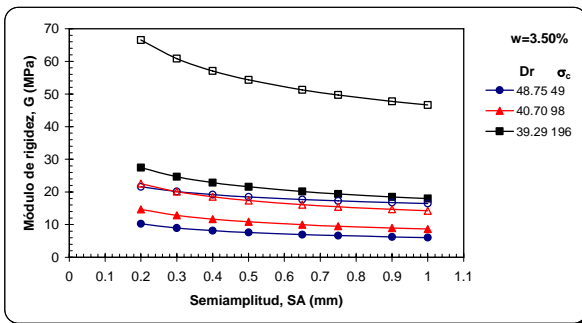


a) Módulo de rigidez en CS y TM

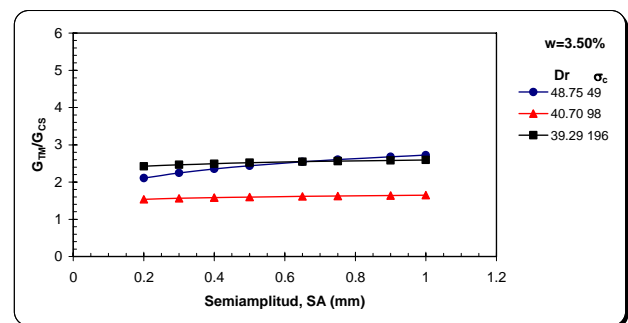


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-17 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.50\%$ ,  $Dr$  entre 63.30-63.82 %, La Parota



a) Módulo de rigidez en CS y TM



b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-18 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=3.50\%$ ,  $Dr$  entre 39.29-48.75 %, La Parota



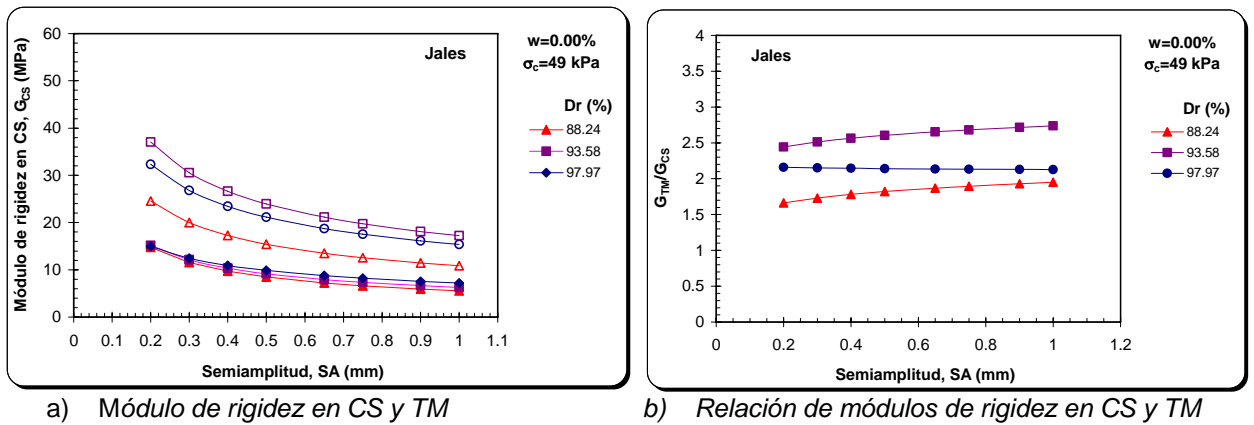


Figura B-19 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$  y  $\sigma_c=49\text{ kPa}$  ( $0.50\text{ kg/cm}^2$ ), Jales

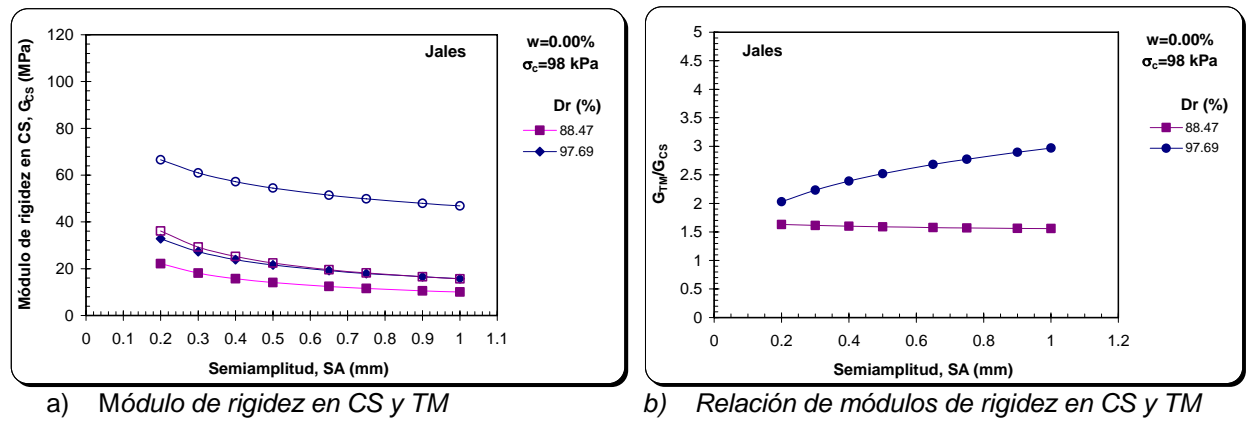


Figura B-20 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$  y  $\sigma_c=98\text{ kPa}$  ( $1\text{ kg/cm}^2$ ), Jales

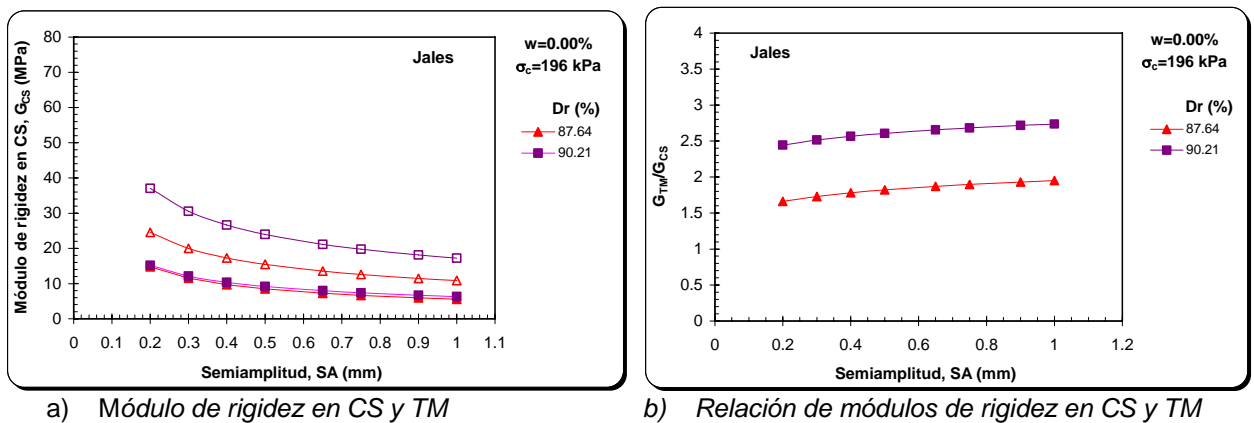


Figura B-21 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$  y  $\sigma_c=196\text{ kPa}$  ( $2\text{ kg/cm}^2$ ), Jales

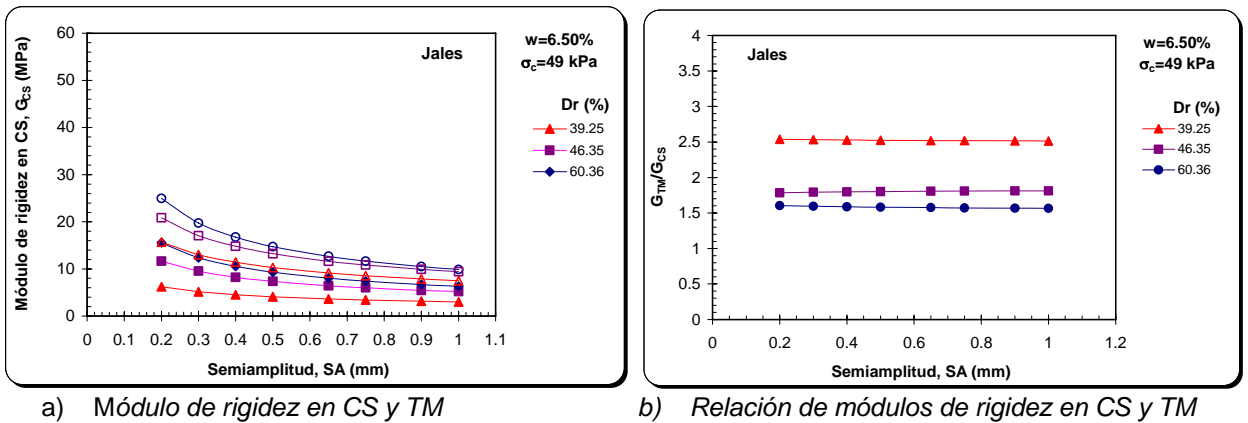


Figura B-22 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=6.50\%$  y  $\sigma_c=49\text{ kPa}$  ( $0.50\text{ kg/cm}^2$ ), Jales

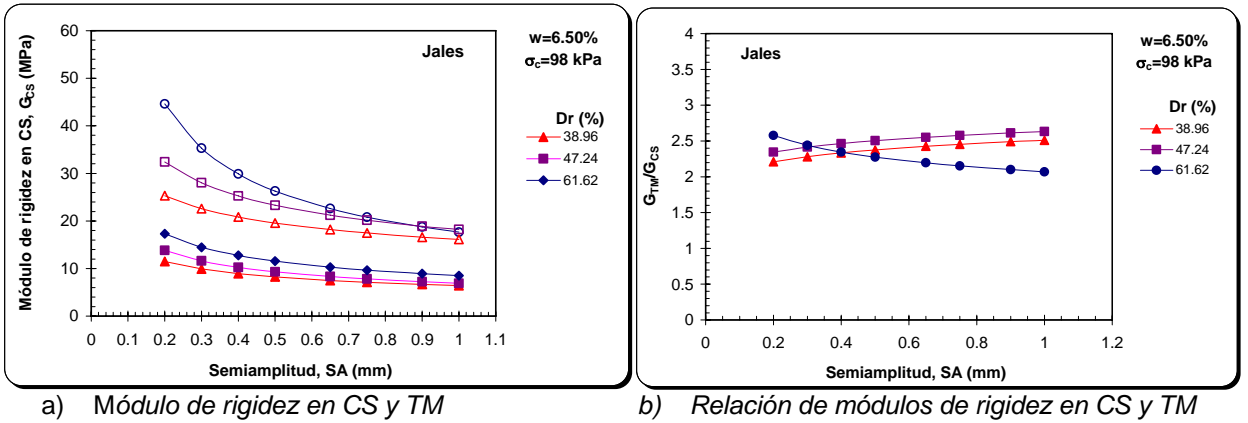


Figura B-23 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=6.50\%$  y  $\sigma_c=98\text{ kPa}$  ( $1\text{ kg/cm}^2$ ), Jales

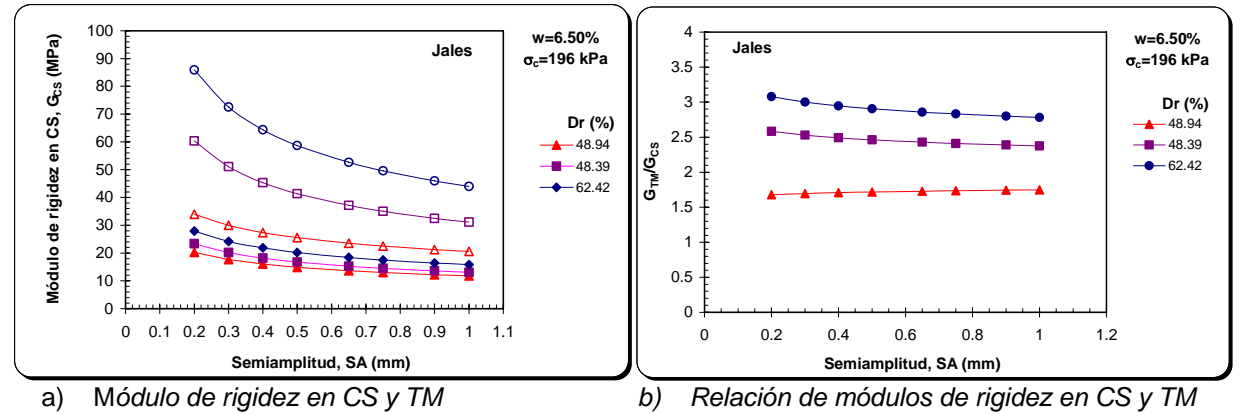
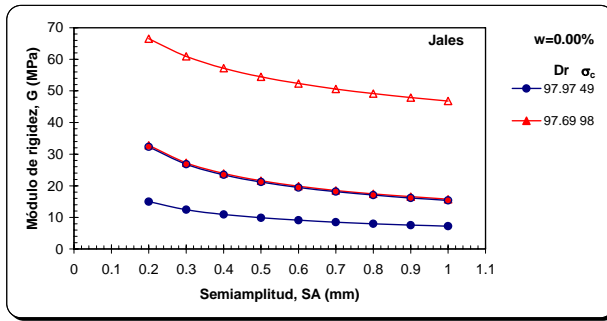
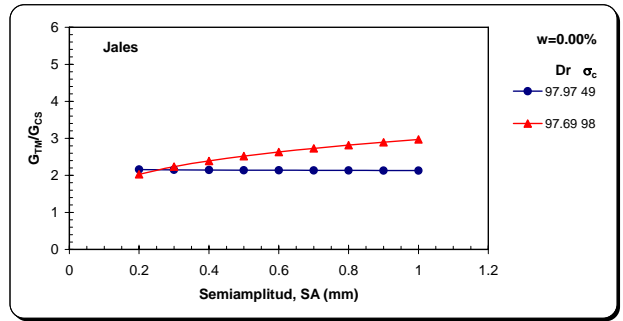


Figura B-24 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=6.50\%$  y  $\sigma_c=196\text{ kPa}$  ( $2\text{ kg/cm}^2$ ), Jales

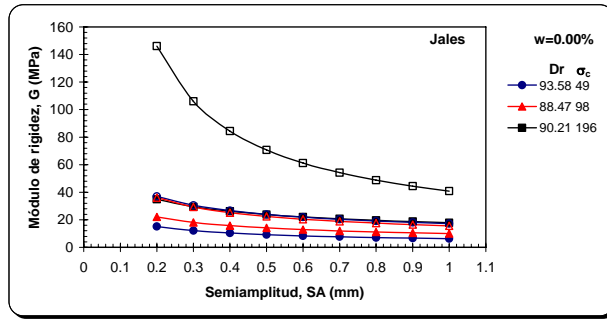


a) Módulo de rigidez en CS y TM

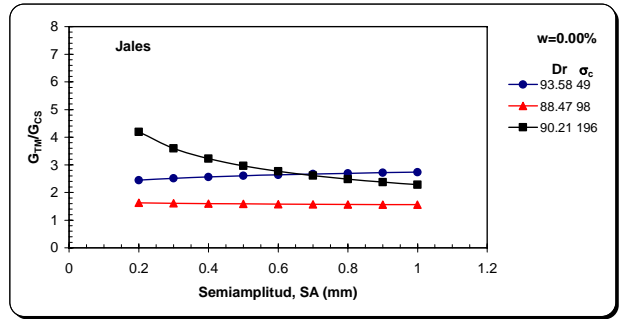


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-25 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$  y  $Dr$  entre 97.69-97.97 %, Jales

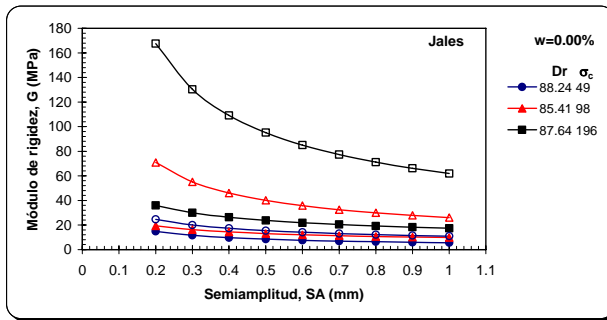


a) Módulo de rigidez en CS y TM

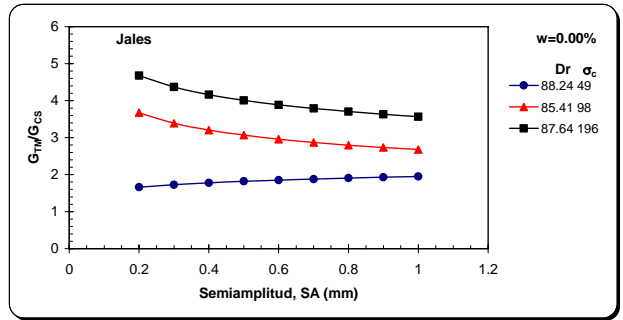


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-26 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$  y  $Dr$  entre 88.47-93.58 %, Jales

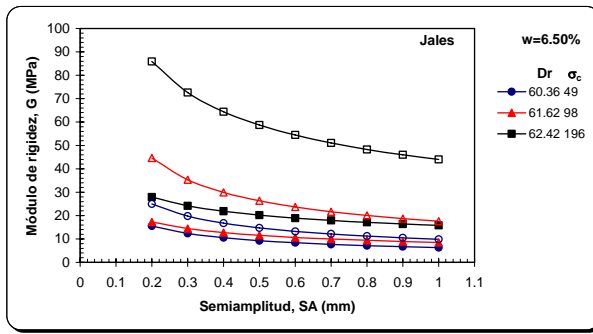


a) Módulo de rigidez en CS y TM

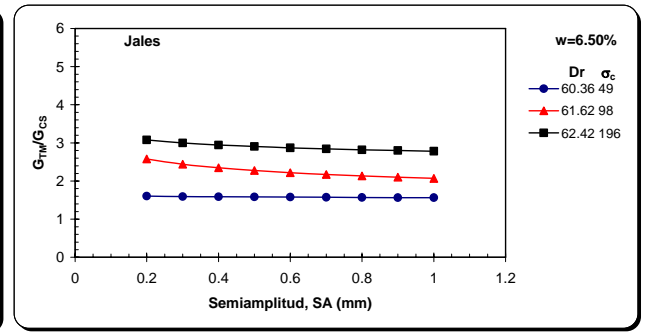


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-27 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para  $w=0.00\%$  y  $Dr$  entre 85.41-88.24 %, Jales

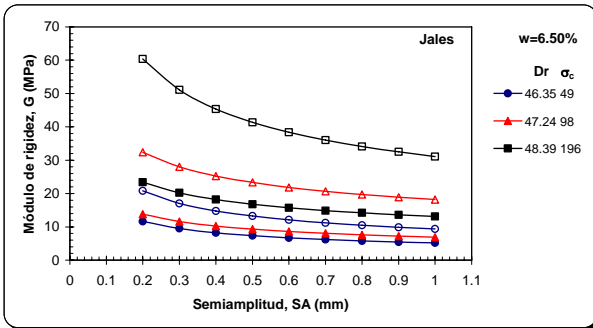


a) Módulo de rigidez en CS y TM

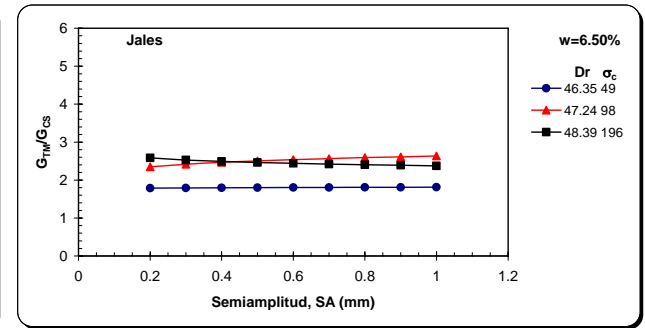


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-28 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para w=6.50 % y Dr entre 60.38-62.42 %, Jales

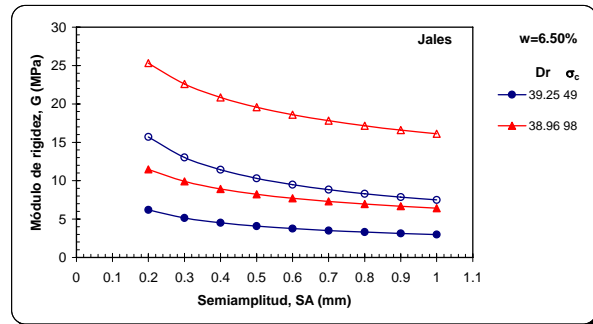


a) Módulo de rigidez en CS y TM

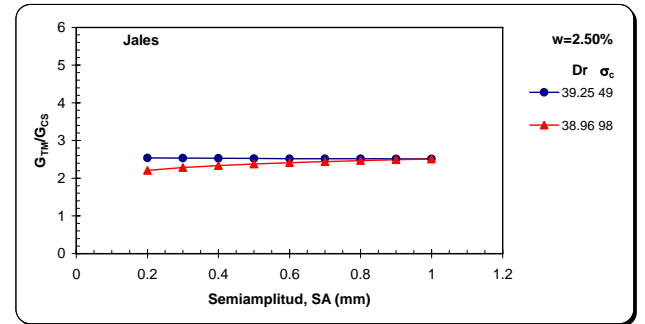


b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-29 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para w=6.50 % y Dr entre 46.35-48.39 %, Jales



a) Módulo de rigidez en CS y TM



b) Relación de módulos de rigidez en CS y TM

Figura B-30 Módulos de rigidez y relación entre módulos, para w=6.50 % y Dr entre 38.96-39.25 %, Jales