

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

---

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO  
DIRECCIÓN DE POSGRADO  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA U. Z.

## DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN DE POISSON DINÁMICA EN SUELOS GRANULARES

# T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

Maestro en Ciencias en  
Mecánica de Suelos

**PRESENTA:**

Ing. Gaspar Ruiz Orozco

**DIRECTORES:**

M. en I. Osvaldo Flores Castrellón  
M. en C. Carlos Roberto Torres Álvarez



**MÉXICO, D.F.**

**OCTUBRE DE 2011**









**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D.F el día 13 del mes de Octubre del año 2011, el (la) que suscribe **Ing. Gaspar Ruiz Orozco alumno** (a) del Programa de **Maestría en Ciencias en Mecánica de Suelos** con número de registro **A000672**, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U.Z., manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **M. en C. Carlos Roberto Torres Álvarez** y cede los derechos del trabajo intitulado **Determinación experimental de la relación de Poisson dinámica en suelos granulares**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **g\_ruor@hotmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

**Ing. Gaspar Ruiz Orozco**



A Graciela Vázquez Valencia  
por el amor que me has brindado y por  
todos los momentos agradables que hemos compartido.

A mis padres:  
Sr. Gaspar Ruiz Matus, Sra. Rosalba Orozco Martínez  
y hermanos: Rosalba, Esteban y José Miguel por sus consejos y apoyo incondicional.

Mis más sinceros agradecimientos a:

La Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, U. Z, del Instituto Politécnico Nacional, por brindarme la oportunidad de cursar y concluir los estudios de posgrado.

Al Dr. Miguel P. Romo Organista por permitirme iniciar y desarrollar este trabajo de investigación en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al Dr. Osvaldo Flores Castellón por la dedicación, dirección y consejos para desarrollar y concluir esta tesis.

Al M. en C. Carlos Roberto Torres Álvarez por su apoyo y dirección para presentar este trabajo en la sección de posgrado de la ESIA, UZ-IPN.

A los integrantes del jurado:

Dr. Norberto Domínguez Ramírez

Dr. Hector Aureliano Sánchez Sánchez

Dr. Esteban Flores Méndez, por sus enriquecedores comentarios y observaciones a este trabajo.

A mis compañeros de la maestría y del Instituto de Ingeniería de la UNAM:

Juan Carlos Martínez Rojas

Hiram González Márquez

Daniel Castillo Ramírez

Miguel Rufiar Jarquín

César Dorado Santana

Pánfilo Perez Perez, a todos ustedes muchas gracias por su compañerismo.



## RESUMEN

Con el propósito de determinar la relación de Poisson dinámica en el tercio central de probetas de suelo granular compactadas, se realizaron ensayos en una cámara triaxial cíclica, instrumentada y automatizada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM; en la cual es posible ensayar muestras de 10.14 cm de diámetro y 26 cm de altura, la instrumentación está constituida por sensores para determinar: carga, desplazamientos, presión y aceleración.

Se realizaron ensayos con dos tipos de arenas: la primera es de acuerdo con la clasificación SUCS una arena limosa, SM, "Los Jales" proveniente de la mina "Las Charcas", del estado de San Luis Potosí, México, la segunda es una arena mal graduada, SP, "La Parota", del estado de Guerrero, México. Las probetas de ensaye se formaron por compactación empleando el método propuesto por Flores en 1996, el cual consiste en la formación de la muestra en diez capas de igual espesor empleando un pisón de diámetro igual al radio del molde, con pesos de 0.5 a 6.0 kg.

Las pruebas realizadas en este estudio son triaxiales cíclicas a desplazamiento controlado, en las cuales se aplicaron semiamplitudes de 0.05 a 1 mm con una frecuencia de 1 hz y veinte ciclos. Se emplearon dos sensores radiales de no contacto, colocados en el tercio medio, TM, de la probeta, para medir la deformación radial, así como dos sensores axiales, LVDT, colocados, uno en el tercio medio superior, TMS, y el otro en el tercio medio inferior, TMI, de la probeta, para determinar la variación de la deformación axial, en cada uno de los puntos.

La relación de Poisson,  $\nu$ , se determinó dividiendo los valores de las deformaciones unitarias radiales contra las axiales, para esto se graficaron dichas deformaciones unitarias, se generó la línea de tendencia por regresión lineal y la pendiente de esta línea se consideró la relación de Poisson media para cada ensaye realizado. Finalmente, se determinó la influencia de las variables de análisis: Compacidad relativa, contenido de agua y esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson.

## ABSTRACT

In order to determine the dynamic Poisson's ratio in the central third of compacted samples of granular soils, tests were conducted in an cyclic triaxial camera, instrumented and automated in the Engineering Institute of UNAM, in which it is possible to test samples 10.14 cm in diameter and 26 cm in height, the instrumentation consists of sensors to determine: load, displacements, pressure and acceleration.

Tests were performed with two different sands: The first is according to USCS classification, a silty sand, SM, "Los Jales", from the mine "Las charcas", from the state of San Luis Potosí, México, the second is a poorly graded sand, SP, "La Parota", from the state of Guerrero, México. The test specimens were formed for compaction using the method proposed by Flores in 1996, which consists of the formation of the sample in ten layers of equal thickness using a rammer with a diameter equal to the radius of the mold, with weights of 0.5 to 6.0 kg.

Tests conducted in this study are cyclic triaxials controlled displacement, which were applied semi-amplitudes 0.05 to 1 mm with a frequency of 1 Hz and twenty cycles. Two non-contact radial sensors were used, placed in the middle third, TM, of the specimen to measure the radial deformation, and two axial sensors, LVDT, placed, one in the half superior third, TMS, and the other one in the half inferior third, TMI, of the specimen, to determine the variation of the axial strain, in each one of the points.

Poisson's ratio,  $\nu$ , was determined, by dividing the values of the radial unitary strain against the axial, for this, unitary deformations were plotted, the trend line was generated by linear regression and the slope of this line was considered the Poisson's ratio averaged for each trial. Finally, the influence of the analysis variables was determined: Relative density, water content, and confining stress in the Poisson's ratio.

## OBJETIVOS

En relación con la determinación de la relación de Poisson dinámica en suelos granulares, se plantea realizar un trabajo de investigación con el objetivo de complementar la información existente para tener un mejor conocimiento de los suelos granulares en condiciones dinámicas.

Para llevar a cabo este trabajo de investigación, la estrategia planteada es realizar ensayos en probetas de suelo granular compactadas en un equipo triaxial cíclico instrumentado y automatizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, considerando tres variables de análisis: Densidad relativa, contenido de agua y esfuerzo de confinamiento.

Considerando lo anterior se plantean los siguientes objetivos para este trabajo:

- Determinar la relación de Poisson dinámica en el tercio medio en probetas de suelo granular compactadas, midiendo desplazamientos radiales y axiales.
- Determinar la influencia de las variables de análisis: Densidad relativa, contenido de agua, y esfuerzo de confinamiento a este parámetro.



# ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT .....	ii
OBJETIVOS .....	iii
ÍNDICE.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABLAS .....	x
NOMENCLATURA.....	xi
<b>1.- INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Obtención de parámetros dinámicos en laboratorio.....	2
1.1.1 Transmisión de ondas .....	2
1.1.1.1 Elementos laminares y cristales piezoeléctricos .....	4
1.1.1.1.1 Elementos Bender .....	4
1.1.1.1.2 Cristales piezoeléctricos.....	6
1.1.2 Columna resonante.....	7
1.1.3 Columna torsionante.....	9
1.1.4 Corte simple cíclico .....	11
1.1.5 Péndulo de torsión .....	12
1.1.6 Cámara triaxial cíclica .....	13
1.2 Estudios previos .....	17
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO .....</b>	<b>41</b>
2.1 Cámara triaxial cíclica .....	41
2.2 Descripción del equipo triaxial MTS.....	41
2.3 Sistema hidráulico (servomecanismo) .....	42
2.4 Panel de control .....	43
2.5 Sistema automatizado, control y procesamiento de datos.....	44
2.6 Instrumentación del equipo.....	45
<b>3. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE .....</b>	<b>51</b>
3.1 Descripción del material .....	51
3.2 Formación de las muestras .....	52
3.3 Relación de vacíos de la probeta.....	55
3.4 Montaje .....	56
3.5 Colocación de los instrumentos.....	58
3.6 Ensaye de la muestra.....	59
3.7 Cálculo de parámetros .....	65
<b>4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS E RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
4.1 Introducción .....	69
4.2 Corrección del cambio volumétrico.....	69
4.3 Relación de Poisson .....	81
4.3.1 Material SP-Arena mal graduada (La Parota) .....	82
4.3.1.1 Efecto de la compacidad relativa.....	84
4.3.1.2 Efecto del contenido de agua. ....	88
4.3.1.3 Efecto del esfuerzo de confinamiento.....	88
4.3.1.4 Relación de Poisson obtenida por el método de regresión lineal múltiple, R.L.M. ...	92

4.3.2 Material SP-Arena limosa (Los Jales) .....	94
4.3.2.1 Efecto de la compacidad relativa.....	95
4.3.2.2 Efecto del contenido de agua. ....	98
4.3.2.3 Efecto del esfuerzo de confinamiento.....	98
4.3.2.4 Relación de Poisson obtenida por el método de regresión lineal múltiple, R.L.M. .	100
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>107</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO 1. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Distribución de elementos para obtener la relación de Poisson ( $\nu$ ) con el método de transmisión de ondas, (Brignoli, et al., 1996) .....	3
Figura 1.2 Señal experimental. Método de transmisión de ondas, (Brignoli, et al., 1996) .....	3
Figura 1.3 Elementos bender: a) Estructura, b) Instalación, c) Funcionamiento, (Valle, 2006).....	5
Figura 1.4 Diferentes tipos de conexiones de elementos bender, (Valle, 2006) .....	6
Figura 1.5 Discos Piezoeléctricos: a) Estructura, b) Instalación, c) Funcionamiento, (Valle, 2006).....	7
Figura 1.6 Fuerza de torsión aplicada y distorsiones que presenta la probeta durante la etapa de ensaye, (Flores, 2009).....	8
Figura 1.7 Curvas de respuesta bajo vibración forzada, (Flores, 2009) .....	9
Figura 1.8 El espécimen es cubierto con una membrana interna y externa sobre la cual presiones internas y externas pueden ser aplicadas independientemente. La aplicación de torsión cíclica induce esfuerzos cortantes cíclicos en planos horizontales, (Kramer Steven L., 1996) .....	10
Figura 1.9 Dispositivo de corte simple cíclico. El espécimen de suelo es contenido dentro de una membrana de caucho, (Airey and Wood, 1987).....	11
Figura 1.10 Péndulo de torsión de vibración libre, (Zeevaert, 1983).....	13
Figura 1.11 Equipo de carga de péndulo (Casagrande y Shannon, 1948) .....	14
Figura 1.12 Cámara Triaxial cíclica, (Flores, 2009).....	15
Figura 1.13 Esquema del ensaye triaxial cíclico convencional para un espécimen isotrópicamente consolidado, (Díaz, 2005) .....	16
Figura 1.14 Esquema de desplazamientos axiales y radiales en la probeta, (Flores, 2009).....	16
Figura 1.15 Variación de la relación de Poisson con la porosidad, obtenidas con refracción sísmica (Salem, 2000).....	18
Figura 1.16 Esquema general del equipo para ensayar probetas huecas (Chaudhary et al., 2003) .....	19
Figura 1.17 Esquema general del equipo para ensayar probetas sólidas (Chaudhary et al., 2003).....	20
Figura 1.18 Posiciones y direcciones de registro de las velocidades de onda de cortante (Chaudhary et al., 2003) .....	21
Figura 1.19 Relación de Poisson para las muestras huecas y sólidas durante la consolidación y en la etapa de ensaye, con $p'$ constante (Chaudhary et al., 2003) .....	22

Figura 1.20	Cámara triaxial cíclica acondicionada para medir velocidades de ondas P y S (Tsukamoto et al., 2002) .....	23
Figura 1.21	Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y la B de Skempton (Tsukamoto et al., 2002) .....	25
Figura 1.22	Variación de la relación de Poisson con el grado de saturación (Gokhan Inci et al., 2001) .....	27
Figura 1.23	Velocidades de onda en arenas en estado seco y saturado de la región de Troll, para diferentes esfuerzos de confinamiento, los círculos rellenos corresponden a las ondas P, los vacíos representan las ondas S, los triángulos simbolizan los resultados experimentales de las muestras de Ottawa, medidas por Han (1986), Yin (1993) y Domenico (1984), Dvorkin y Nur (1996) .....	29
Figura 1.24	Relación de Poisson para las muestras de arena de la región de Troll, (Dvorkin y Nur, 1996) .....	29
Figura 1.25	Efecto del esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson, (Fawaz, et al., 2002) .....	30
Figura 1.26	Cámara triaxial instrumentada, (Hoque <i>et al.</i> , 1996) .....	31
Figura 1.27	Muestra cuadrada con sensores para la medición de deformaciones (Hoque et al., 1996) .....	31
Figura 1.28	Variación de la relación de Poisson, respecto a la relación de esfuerzos ( $\sigma_v/\sigma_h$ ) (Hoque et al., 1996) .....	32
Figura 1.29	Instalación de elementos bender y discos Piezoeléctricos en la cámara triaxial instrumentada, (Valle, 2006) .....	33
Figura 1.30	Variación de la relación de Poisson con B, en probetas ensayadas en la Cámara triaxial instrumentada, (Valle, 2006) .....	34
Figura 1.31	Columna combinada resonante y torsional (Stokoe et al. 1994) .....	35
Figura 1.32	Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, en probetas ensayadas en la columna torsional resonante, (Valle, 2006) .....	36

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Cámara triaxial cíclica MTS, (Flores, 2009) .....	42
Figura 2.2	Sistema hidráulico para aplicar presión al pistón del equipo .....	43
Figura 2.3	Panel de control .....	44
Figura 2.4	Sensores utilizados en la cámara triaxial cíclica MTS .....	46
Figura 2.5	Instrumentación de la probeta .....	47

## CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Granulometrías de los materiales ensayados .....	52
Figura 3.2	Secuencia de apisonado, (Flores, 1996) .....	52
Figura 3.3	Colocación del molde .....	53
Figura 3.4	Aplicación del vacío .....	54
Figura 3.5	Proceso de formación de la probeta por compactación .....	55
Figura 3.6	Curvas de compactación de los materiales ensayados .....	55

Figura 3.7	Pedestal (perfil).....	56
Figura 3.8	Probeta montada con molde .....	57
Figura 3.9	Cambio de vacío, probeta sin molde.....	57
Figura 3.10	Colocación de los sensores radiales de no contacto (a), y axiales LVDT (b) .....	58
Figura 3.11	Celda de carga sumergible.....	59
Figura 3.12	Pantalla principal del módulo de OPERACIÓN, (Flores, <i>et al.</i> , 2002) .....	60
Figura 3.13	Monitoreo de los sensores para el ajuste a sus valores de inicio de lectura, (Flores, <i>et al.</i> , 2002).....	60
Figura 3.14	Probeta montada con sensores de desplazamiento axial y radial, sometida a un valor de confinamiento .....	61
Figura 3.15	Reguladores para controlar presión de confinamiento.....	62
Figura 3.16	Selección del patrón de desplazamiento a utilizar, (Flores, <i>et al.</i> , 2002).....	62
Figura 3.17	Señal de desplazamiento cíclico, con una amplitud de 0.20 mm, con 10 ciclos, (N).....	63
Figura 3.18	Definición del porcentaje de trabajo del equipo, (Flores, <i>et al.</i> , 2002) .....	63
Figura 3.19	Ejecución del patrón de excitación diseñado, (Flores, <i>et al.</i> , 2002) .....	64
Figura 3.20	Señales de los desplazamientos axiales en los tercios medios, (Flores, 2009).....	65
Figura 3.21	Señales de los desplazamientos radiales en los tercios medios, (Flores, 2009).....	66

## CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Variación de la compacidad relativa inicial al aplicarse el vacío .....	70
Figura 4.2	Variación de la compacidad relativa inicial con el esfuerzo de confinamiento, La Parota .....	72
Figura 4.3	Variación de la compacidad relativa inicial con el esfuerzo de confinamiento, Los Jales.....	73
Figura 4.4	Variación de la compacidad relativa $D_r$ , con el incremento del esfuerzo de confinamiento .....	75
Figura 4.5	Incremento de la compacidad relativa, para el material de La Parota.....	78
Figura 4.6	Incremento de la compacidad relativa, para el material de Los Jales.....	80
Figura 4.7	Obtención de la relación de Poisson .....	81
Figura 4.8	Relación del Peso Volumétrico Seco Máximo y la Compacidad relativa inicial, para el material de La Parota .....	84
Figura 4.9	Variación de la relación de Poisson, $\nu$ , respecto a la compacidad relativa, con diferentes contenidos de agua.....	87
Figura 4.10	Variación de la relación de Poisson respecto al contenido de agua.....	88
Figura 4.11	Variación de la relación de Poisson respecto al esfuerzo de confinamiento, con diferentes contenidos de agua.....	91
Figura 4.12	Relación de Poisson obtenidas con la ecuación de regresión lineal múltiple, para el material de La Parota .....	92
Figura 4.13	Relación del Peso Volumétrico Seco Máximo y la Compacidad relativa inicial, para el material de Los Jales .....	95



Figura 4.14 Variación de la relación de Poisson respecto a la compacidad relativa, con diferentes contenidos de agua, para el material de Los Jales .....	97
Figura 4.15 Variación de la relación de Poisson respecto al esfuerzo de confinamiento, con diferentes contenidos de agua, material Los Jales .....	100
Figura 4.16 Relación de Poisson obtenidas con la ecuación de regresión lineal múltiple, para el material de Los Jales .....	101

## **ANEXO 1**

Figura A1.1 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para $\omega = 0\%$ , La Parota.....	119
Figura A1.2 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para $\omega = 2.5\%$ , La Parota....	120
Figura A1.3 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para $\omega = 3.5\%$ , La Parota....	122
Figura A1.4 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para $\omega = 0\%$ , Los Jales .....	124
Figura A1.5 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para $\omega = 6.50\%$ , Los Jales ....	125

# LISTA DE TABLAS

## CAPÍTULO 1

Tabla 1.1	Ensayes de laboratorio para determinar parámetros en suelos, (Ishihara, 1996) .....	1
Tabla 1.2	Propiedades índice del material utilizado para la elaboración de probetas, (Valle, 2006) .....	33
Tabla 1.3	Propiedades de los especímenes ensayados en la Cámara triaxial instrumentada, (Valle, 2006) .....	34
Tabla 1.4	Propiedades de los especímenes ensayados en la cámara torsional resonante, (Valle, 2006) .....	35

## CAPÍTULO 2

Tabla 2.1	Sensores instalados en el equipo triaxial MTS .....	45
-----------	---	----

## CAPÍTULO 3

Tabla 3.1	Granulometrías de los materiales ensayados .....	51
-----------	--	----

## CAPÍTULO 4

Tabla 4.1	Ensayes realizados para determinar el cambio de la compacidad relativa al aplicar el vacío durante su montaje y esfuerzo de confinamiento.....	71
Tabla 4.2	Ecuaciones obtenidas al normalizar el incremento de la compacidad relativa con respecto al esfuerzo de confinamiento .....	75
Tabla 4.3	Ensayes realizados con el material de La Parota .....	83
Tabla 4.4	Relación de Poisson promedio para el material La Parota .....	93
Tabla 4.5	Ensayes realizados con el material Los Jales.....	94
Tabla 4.6	Relación de Poisson promedio para el material Los Jales.....	102
Tabla 4.7	Comparativa de los resultados obtenidos en este trabajo con otros estudios, ( $\sigma_c, \nu$ ) .....	102
Tabla 4.8	Comparativa de los resultados obtenidos en este trabajo con otros estudios, ( $D_r, \nu$ ) .....	103

# NOMENCLATURA



---

---

## Nomenclatura

$A_m$	Área de la muestra
B	Parámetro de Skempton
CS	Cabezal superior
c	Cohesión
$D_{r_{cm}}$	Compacidad relativa, con molde sin aplicar vacío a la probeta
$D_{r_{cv}}$	Compacidad relativa, aplicando vacío a la probeta
$D_{r_{cc}}$	Compacidad relativa, aplicando esfuerzo de confinamiento
Dr	Compacidad o densidad relativa
$D_0$	Diámetro de la probeta de suelo
$D_{50}$	Diámetro de las partículas correspondientes 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
$E_v$	Módulo de elasticidad vertical
$e_{máx}$	Relación de vacíos máxima
$e_{mín}$	Relación de vacíos mínima
f	Frecuencia de excitación en una prueba triaxial cíclica
G	Módulo de rigidez al cortante dinámico
$G_s, S_s$	Densidad de sólidos
$H_0, L$	Longitud o altura de la probeta de suelo
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
N	Número de ciclos en una prueba triaxial cíclica
n	Porosidad
P	Ondas de compresión
$P_p$	Peso del pistón

---

---

$P'$	Esfuerzo octaédrico
$q, \sigma_d$	Esfuerzo desviador $q = \sigma_1 - \sigma_3$
$r_0$	Radio inicial de la probeta
SA	Semi amplitud de la señal de desplazamiento que se aplica como excitación en una prueba triaxial cíclica
Shh	Velocidad de ondas de cortante generada en sentido horizontal del espécimen con un elemento laminar colocado horizontalmente
Shv	Velocidad de ondas de cortante generada en sentido vertical del espécimen con un elemento laminar colocado verticalmente
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
V	Voltaje
$V_p$	Velocidad de onda de compresión
$V_s$	Velocidad de onda de cortante
U	Presión de poro
UU	Prueba triaxial no consolidada no drenada
$\omega$	Contenido de agua
$W_m$	Peso de la muestra de suelo
$\delta$	Desplazamiento axial registrado en una prueba triaxial
$\delta_{r1}$	Desplazamiento radial obtenido en el sensor 1
$\delta_{r2}$	Desplazamiento radial obtenido en el sensor 2
$\delta_{\alpha CS}$	Desplazamiento axial registrado en el cabezal superior
$\delta_{\alpha TM}$	Desplazamiento axial en el tercio medio de la probeta
$\delta_{\alpha TMI}$	Desplazamiento axial registrado en el tercio medio inferior
$\delta_{\alpha TMS}$	Desplazamiento axial registrado en el tercio medio superior
$\delta_{\alpha TMC}$	Desplazamiento axial registrado en el tercio medio central
$\varepsilon$	Campo eléctrico

---

---

$\varepsilon_a$	Deformación unitaria axial
$\varepsilon_r$	Deformación unitaria radial
$\gamma_m$	Peso específico del suelo
$\gamma_d$	Peso específico seco del suelo
$\nu$	Relación de Poisson
$\nu_p$	Relación de Poisson promedio
$\nu_{vh}, \nu_{hh}, \nu_{hv}$	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
$\phi$	Ángulo de fricción interna
$\sigma_c, \sigma_{3c}$	Esfuerzo de confinamiento
$\sigma_d$	Esfuerzo axial, (esfuerzo desviador)
$\sigma'_0, \sigma'$	Esfuerzo efectivo de consolidación
$\tau, \tau_d$	Esfuerzo cortante
$\tau_c, \tau_{max}$	Esfuerzo cortante máximo





# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**



## 1.- INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Durante la década de los sesentas y setentas algunos investigadores desarrollaron cámaras resonantes para ensayar diferentes tipos de suelos, Hardin y Richard, (1963), Hardin y Black (1968), Marcuson y Wahls, (1972), entre otros.

Respecto a las pruebas que se realizan en el laboratorio, los equipos que se utilizan comúnmente para la determinación de parámetros dinámicos son: la columna resonante, la cámara triaxial cíclica y el corte simple cíclico; en el primero es posible aplicar deformaciones angulares del orden de  $10^{-5}$  y  $10^{-2}$  %, estos últimos inducen deformaciones angulares del orden de  $10^{-3}$  hasta 10%, como se indica en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Ensayes de laboratorio para determinar parámetros en suelos, (Ishihara, 1996)

Deformación angular, (%)	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
Fenómeno	Propagación de ondas Vibración		Asentamientos diferenciales Grietas		Deslizamientos Compactación Licuación	
Características mecánicas	Elástico		Elasto-plástico		Falla	
Variables	$G, \nu$				$\phi, C$	
Efecto de la repetición de carga				←————→		
Mediciones en laboratorio	Propagación de ondas	←————→				
	Columna resonante	←————→				
	Carga repetida			←————→		

Si el objeto de estudio es evaluar el comportamiento del suelo a deformaciones muy pequeñas, considerando la tabla anterior, se tendrán que realizar ensayos en dos aparatos, como lo pueden ser la columna resonante y la cámara triaxial cíclica, con muestras iguales formadas de la misma muestra de suelo, con el objeto de determinar parámetros dinámicos como la relación de Poisson,  $\nu$ , o bien realizar el ensayo en el equipo cíclico torsionante, el cual permite aplicar deformaciones en el intervalo mencionado.

## 1.1 Obtención de parámetros dinámicos en laboratorio

### 1.1.1 Transmisión de ondas

En este método se coloca en un extremo de una probeta confinada de suelo, un transductor piezoeléctrico generador de la onda, y en el otro extremo un receptor.

Los transductores piezoeléctricos se emplean comúnmente para determinar las ondas de compresión,  $V_p$ , mientras que para determinar las ondas cortantes,  $V_s$ , se emplean cristales piezoeléctricos (Bender).

El empleo de transductores consiste en dos cristales piezoeléctricos (elementos bender), que son capaces de generar y detectar ondas cortantes, la aceptación de estos elementos se debe a su característica de desarrollar relativamente grandes deformaciones con bajas excitaciones eléctricas, (Brignoli, et al 1996).

La señal de excitación es producida por un generador de funciones, la cual es amplificada y enviada al transductor piezoeléctrico transmisor que se encuentra en la base del pedestal, tal como se ilustra en la figura 1.1. Las ondas transmitidas a través de la probeta de suelo son grabadas en el otro extremo por el transductor receptor, la señal de excitación amplificada es mostrada en el osciloscopio, (figura 1.2).

Con este método la probeta se ensaya en la rama elástica o lineal, debido a que es sometida a pequeñas deformaciones angulares.

Con el tiempo de propagación de las ondas a través de la probeta, (en compresión,  $t_p$ , y cortante,  $t_s$ ) obtenidos experimentalmente y la longitud de la probeta,  $L$ , se determina la velocidad de propagación de las mismas,  $V_p$  y  $V_s$ , y con estas velocidades, la relación de Poisson,  $\nu$ , de acuerdo con las siguientes expresiones de la 1 a la 4.

$$V_s = \frac{L}{t_s} \quad (1)$$

$V_s$  = Velocidad de cortante

$$V_p = \frac{L}{t_p} \quad (2)$$

$V_p$  = Velocidad de ondas de compresión

$$k = \frac{V_p}{V_s} \quad (3)$$

$k$  = Relación de velocidades de propagación de ondas de compresión y cortantes.

$$\nu = \frac{2 - k^2}{2 - 2k^2} \quad (4)$$

$\nu$  = Relación de Poisson

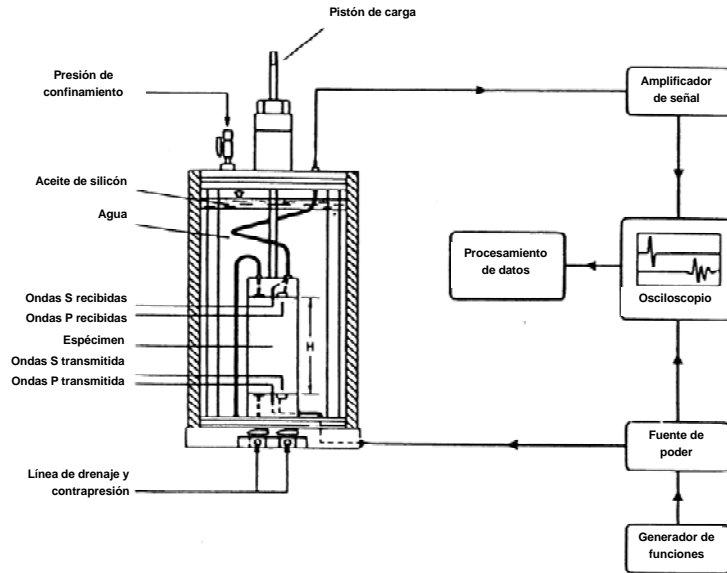


Figura 1.1 Distribución de elementos para obtener la relación de Poisson ( $\nu$ ) con el método de transmisión de ondas, (Brignoli, et al., 1996)

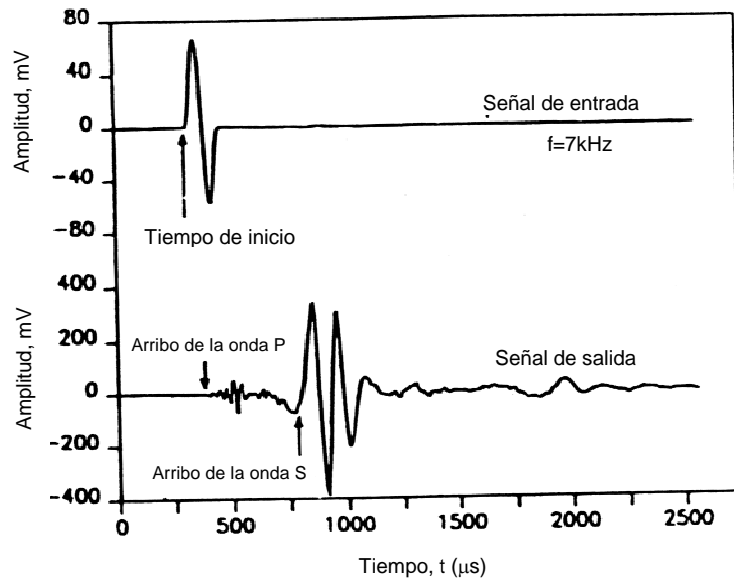


Figura 1.2 Señal experimental. Método de transmisión de ondas, (Brignoli, et al., 1996)

A continuación se realiza una descripción de los elementos laminares y piezoeléctricos

### 1.1.1.1 Elementos laminares y cristales piezoeléctricos

La piezoelectricidad es un fenómeno que se presenta en cristales como el cuarzo, la turmalita, el bario-titanio, el fosfato amónico, etc. Cuando se ejerce una presión sobre ellos. La deformación producida por una presión conduce a un desplazamiento del centro de aplicación de las cargas negativas respecto al de las positivas, produciendo así en el cristal una polarización que depende de la presión aplicada (efecto piezoeléctrico directo).

Recíprocamente si se aplica un campo eléctrico al cristal se producen deformaciones que dependen de la intensidad del campo aplicado (efecto piezoeléctrico inverso), (Díaz, 2005).

#### 1.1.1.1.1. Elementos Bender

Los elementos bender (laminares), son dispositivos que se constituyen por dos elementos de cerámica piezoeléctricos añadidos a un separador conductivo intermedio, con dos electrodos metálicos, uno en cada lado de la unidad cerámica, esta configuración se muestra en la figura 1.3.

Los elementos bender consisten en dos placas cerámicas con opuesta o igual polaridad, dependiendo del tipo de conexión utilizada. De esta manera los elementos bender con polaridad opuesta son conectados en serie, mientras que aquellos que tienen la misma polaridad son conectados en paralelo como se muestra en la figura 1.4.

La conexión en serie, figura 1.4a, significa que la guía principal del cable coaxial está soldada a uno de los electrodos y la parte cubierta del cable (tierra) está soldada al otro electrodo. Debido a esto, cuando el voltaje es aplicado a través de los electrodos del elemento bender, una de las placas se elonga mientras que la otra se acorta, de esta manera el elemento bender se curva como se muestra en la figura 1.3.c

Si uno de los extremos del elemento bender es empotrado, el otro extremo se moverá transversalmente y creará las ondas de cortante,  $V_s$ , como se muestra en la figura 1.3.c

En el caso de la conexión en paralelo de los elementos bender, figura 1.4b, los dos elementos de cerámica piezoeléctricos tienen la misma polaridad y deben tener acceso al separador conductivo intermedio entre las piezas cerámicas, esta conexión significa que la guía principal del cable coaxial está soldado al separador central y la parte cubierta del cable está soldada a ambos electrodos, como se indica en la figura 1.4b.

El principal beneficio de la conexión en paralelo es que este transductor crea movimiento más eficientemente en comparación a la conexión en serie.

La fuerza ( $f$ ) creada por los elementos bender es directamente proporcional al campo eléctrico ( $\epsilon$ ) y éste a su vez es la relación de voltaje ( $V$ ) a la distancia recorrida por el campo eléctrico, en este caso el espesor de la cerámica  $e$ . Por lo tanto, puede observarse que el campo eléctrico producido por el voltaje en una conexión en serie ( $\epsilon$

$= V/2e$ ) es la mitad del campo eléctrico producido por el mismo voltaje que en una conexión en paralelo ( $\varepsilon = V/e$ ). Considerando lo anterior, se puede señalar que los elementos bender presentan un mejor comportamiento como transductores generadores de las ondas de cortante,  $V_s$ , al ser conectados en paralelo en comparación con la conexión en serie, debido a que producen el mismo movimiento con la aplicación de la mitad del voltaje.

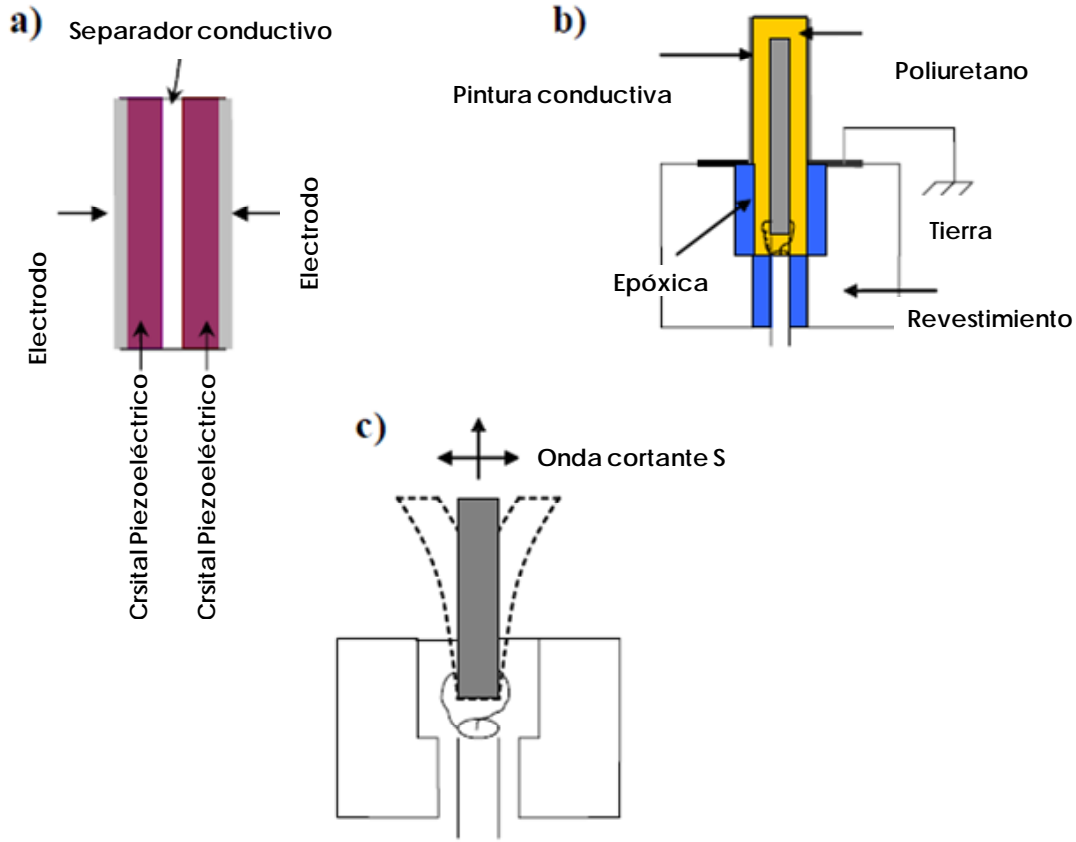


Figura 1.3 Elementos bender: a) Estructura, b) Instalación, c) Funcionamiento, (Valle, 2006)

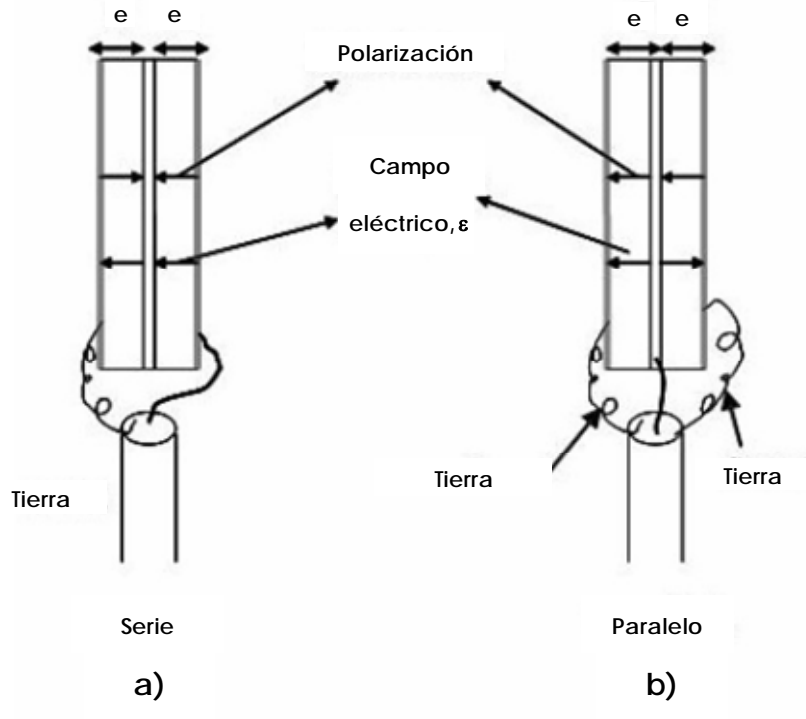


Figura 1.4 Diferentes tipos de conexiones de elementos bender, (Valle, 2006)

### 1.1.1.1.2 Cristales piezoeléctricos

Estos materiales pueden presentarse en forma de discos y están constituidos por capas conductoras en la parte superior e inferior de sus superficies, (figura 1.5). Los discos se expanden y contraen longitudinalmente cuando el voltaje es aplicado y tienen solamente una polaridad debido a que existe solamente una manera de ser conectado, que es en una forma similar como la conexión de los elementos bender en serie, esto se puede observar en la figura 1.5b. Los movimientos longitudinales de los cristales piezoeléctricos crean predominantemente ondas de compresión ( $V_p$ ), como se ilustra en la figura 1.5.c



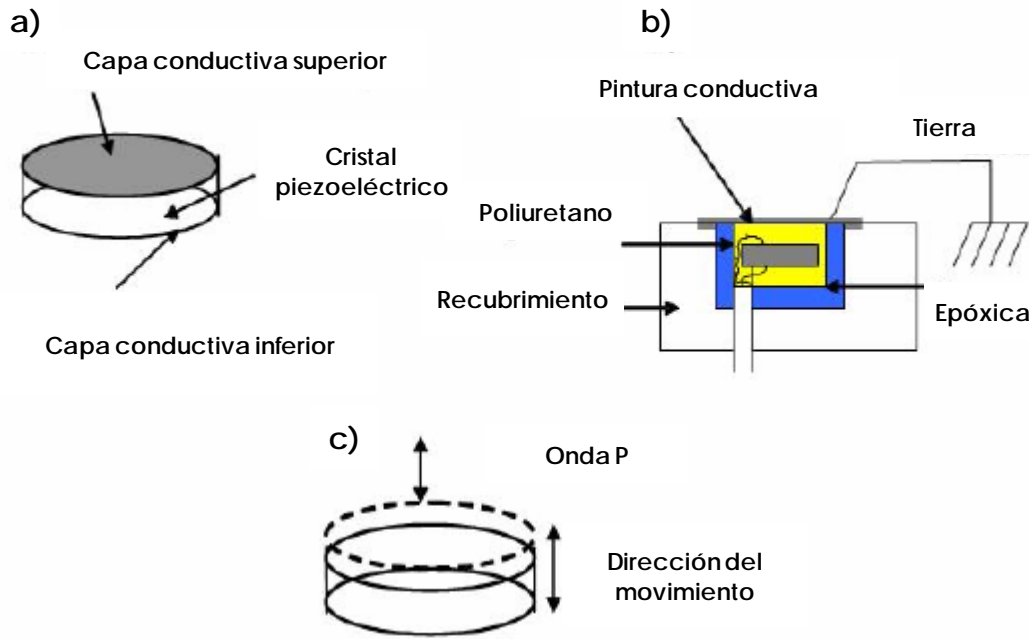


Figura 1.5 Discos Piezoeléctricos: a) Estructura, b) Instalación, c) Funcionamiento, (Valle, 2006)

### 1.1.2 Columna resonante

Al realizar el ensaye de los especímenes en esta la columna resonante, inicialmente se definen los rangos de frecuencia y amplitud que habrá de aplicar el sistema a la probeta, una vez realizado esto se induce un movimiento periódico senoidal en la parte superior del sistema.

Al realizar el ensaye de los especímenes en esta cámara, se le aplica una excitación a la probeta en la parte superior, debido a que se encuentra restringida de movimiento en la base, (figura 1.6) y se registra la aceleración de respuesta del material.

Con la fuerza aplicada se excita la probeta a una frecuencia inicial,  $f_i$ , y se registra la aceleración, una vez realizado esto se incrementa la excitación aplicada para a su vez incrementar la frecuencia con valores constantes,  $\Delta f$ , registrando la aceleración en cada uno de los incrementos, hasta alcanzar la frecuencia final del ensaye  $f_f$ .

A las lecturas de aceleración desde la frecuencia inicial,  $f_i$ , con incrementos de frecuencias,  $\Delta f$ , hasta la frecuencia final,  $f_f$ , se le llama barrido de frecuencias.

Una vez concluido el primer barrido de frecuencias, se incrementa la fuerza de torsión en valores  $\Delta F$ , para realizar una serie de barridos en donde la fuerza de torsión se incrementará en forma consecutiva.

Para cada barrido de frecuencias el cabezal se mueve desde un punto central 0 hasta los puntos A y hacia el punto B, al invertirse la dirección del movimiento la aceleración es cero, y en cualquier otro instante la aceleración es diferente de cero alcanzando la aceleración máxima cuando el cabezal pasa por el punto 0, tal como se ilustra en la figura 1.6.

Al graficar la variación de la frecuencia contra la aceleración, para cada incremento de frecuencia, se obtiene la gráfica "Curva de aceleraciones totales", (figura 1.7).

Para cada curva de aceleraciones totales se registra la aceleración máxima ( $a_{\max}$ ), la frecuencia de resonancia ( $f_0$ ) y las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , correspondientes a la aceleración  $a_{\max}/\sqrt{2}$ , como se indica en la figura 1.7.

Con los valores de  $f_0$ , la longitud de la muestra,  $L$ , y  $\beta$ , calculado a partir de los momentos polares de inercia de la muestra,  $I_m$ , y del sistema móvil,  $I_s$ , se pueden determinar los parámetros dinámicos con las expresiones 5 y 6:

$$V_s = \frac{2\pi f_0 L}{\beta} \quad (5)$$

$$G = \rho v_s^2 \quad (6)$$

En el caso de muestras sólidas la deformación angular se determina con la expresión 7 (Richard, *et al*, 1970):

$$\gamma = \left( \frac{1}{12\pi^2 r} \right) \frac{D}{L} \frac{a_{\max}}{f_0^2} \quad (7)$$

El amortiguamiento, bajo vibración forzada, se calcula con la siguiente expresión 8:

$$\lambda = \left( \frac{f_2 - f_1}{2f_2} \right) 100 \quad (8)$$

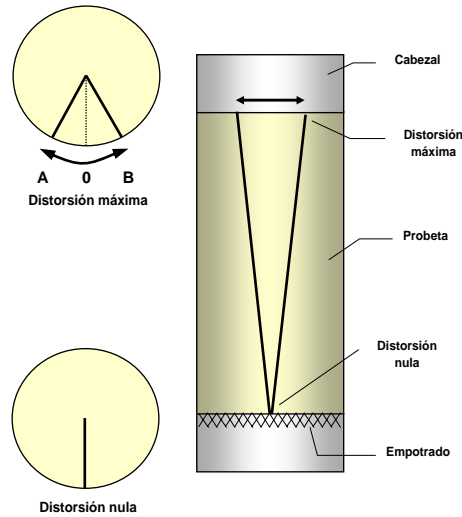


Figura 1.6 Fuerza de torsión aplicada y distorsiones que presenta la probeta durante la etapa de ensaye, (Flores, 2009)

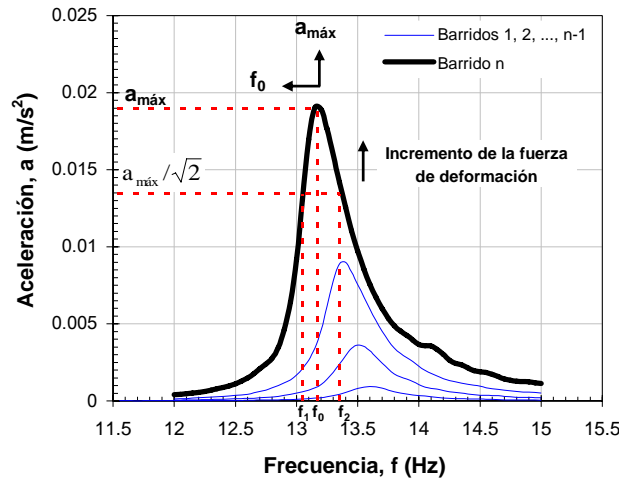


Figura 1.7 Curvas de respuesta bajo vibración forzada, (Flores, 2009)

### 1.1.3 Columna torsionante

Muchas de las dificultades asociadas con la cámara triaxial cíclica y los ensayos de corte simple cíclico pueden ser evitados ensayando especímenes cilíndricos en torsión.

Los ensayos de torsión cíclica permiten aplicar condiciones iniciales de esfuerzos isotrópicos como anisotrópicos y pueden imponer esfuerzos cortantes cíclicos en planos horizontales con rotación continua de los ejes principales de esfuerzos. Son comúnmente usados para medir rigideces en un amplio rango de deformaciones.

Ishihara y Li (1972) desarrollaron una cámara triaxial de torsión para ensayar especímenes sólidos. Dobry *et al.*, 1985, desarrollaron ensayos cíclicos de torsión con deformaciones controladas con aplicación de carga con esfuerzos controlados en especímenes sólidos, los cuales han demostrado ser eficientes para la medición del comportamiento de la licuación.

Con el uso de este equipo es posible la determinación de propiedades dinámicas de los suelos en un rango de distorsiones intermedias a muy altas ( $\pm 0.02\%$  a  $\pm 10\%$ ).

Para incrementar la uniformidad radial de dichas deformaciones, Drnevich 1967, 1972, desarrolló una cámara torsionante cíclica para ensayar muestras cilíndricas huecas, (figura 1.8). Mientras que el ensayo de muestras huecas ofrecen probablemente la mejor uniformidad y control sobre el esfuerzo aplicado así como el drenaje, la preparación de los especímenes puede ser difícil y el equipo no es ampliamente disponible.

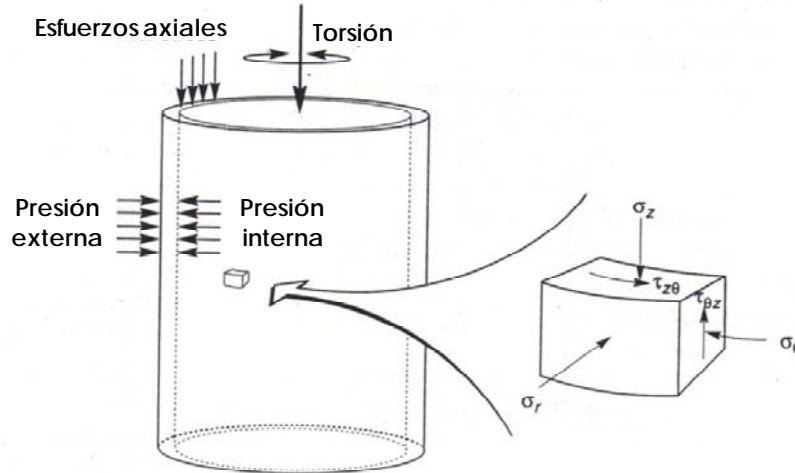


Figura 1.8 El espécimen es cubierto con una membrana interna y externa sobre la cual presiones internas y externas pueden ser aplicadas independientemente. La aplicación de torsión cíclica induce esfuerzos cortantes cíclicos en planos horizontales, (Kramer Steven L., 1996)

Las características de la cámara triaxial cíclica torsionante con la que cuentan en el Laboratorio de Dinámica de Suelos del CENAPRED, (Centro Nacional de Prevención de Desastres), son las siguientes:

- Determinación de propiedades dinámicas de los suelos en un rango de distorsiones intermedias a muy altas ( $\pm 0.02\%$  a  $\pm 10\%$ ).
- Presión confinante máxima de 1 Mpa.
- Confinamiento isotrópico o anisotrópico.
- Presión de poro máxima de 500 kPa.
- Carga vertical máxima de 2 kN.
- Deformación vertical máxima de 20 mm.
- Ensayo de muestras cilíndricas de suelo, ya sea macizas o huecas, de 70 ó 100 mm de diámetro exterior, 100 mm de altura y 20 mm de espesor de pared en las últimas.
- Siete transductores para monitorear visualmente presión confinante, presión de poro, deformación volumétrica, carga vertical, deformación axial, momento torsionante y deformación angular.
- Sistema electroneumático para la aplicación de momentos torsionantes cíclicos dinámicos, con frecuencias de 0.001 a 2 Hz.
- Sistema optoelectrónico que permite registrar en papel continuo sensible a los rayos ultravioleta, la variación con el tiempo del par torsionante, el giro y la presión de poro, durante las pruebas dinámicas.
- Sistema de adquisición de datos con control digital de las tres variables antes citadas, durante las pruebas dinámicas.
- Graficador x-y que despliega en tiempo real un registro gráfico del desplazamiento angular o giro (x) y el par torsionante (y).

### 1.1.4 Corte simple cíclico

El ensaye de corte simple cíclico es capaz de reproducir condiciones de esfuerzos sísmicos mucho más precisas que en el ensaye triaxial cíclico, es comúnmente usado para ensayos de licuación.

En este ensaye, una muestra de suelo es restringido contra expansión lateral por fronteras rígidas, (Cámara tipo Cambridge), una membrana de alambres reforzados, (Cámara tipo NGI), o por una serie de anillos apilados, (Cámara tipo SGI).

Al aplicar esfuerzos cortantes cíclicos horizontales en la base o en la parte superior de la probeta, ésta es deformada, tal como se muestra en la figura 1.9, muy similar a un elemento de suelo sujeto a la propagación vertical de ondas de cortante S.

El aparato de corte simple, sin embargo, aplica esfuerzos cortantes solo en la parte superior e inferior del espécimen.

Puesto que esfuerzos cortantes no complementarios son impuestos en los lados verticales, los momentos causados por los esfuerzos cortantes horizontales deben ser balanceados por esfuerzos cortantes y normales no uniformemente distribuidos. Los efectos de no uniformidad de esfuerzos pueden ser reducidos incrementando la relación diámetro/altura del espécimen, tales efectos son pequeños en relaciones de diámetro/altura más grandes de la relación 8:1 (Kovacs and Leo, 1981).

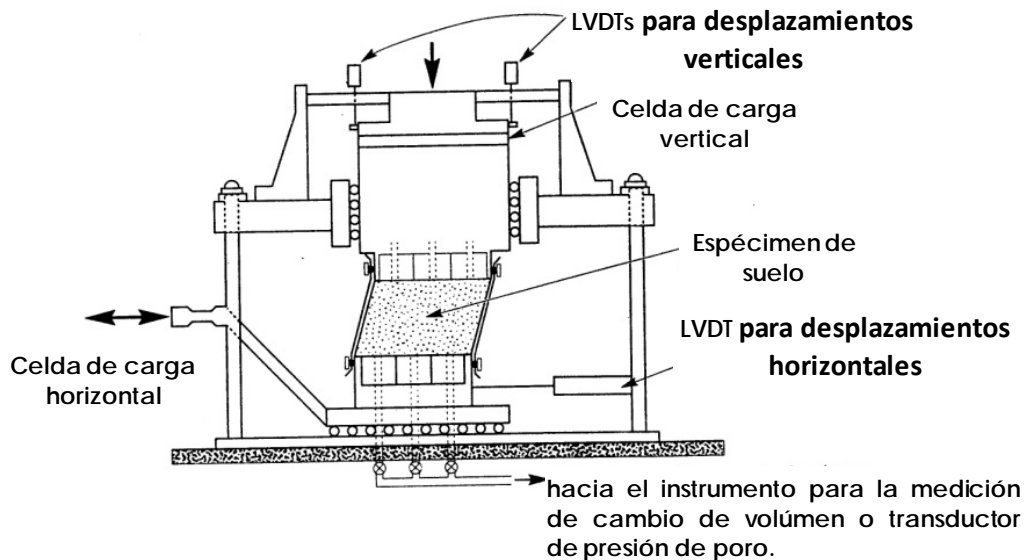


Figura 1.9 Dispositivo de corte simple cíclico. El espécimen de suelo es contenido dentro de una membrana de caucho, (Airey and Wood, 1987)

### 1.1.5 Péndulo de torsión

La determinación del Módulo de elasticidad lineal, E, es difícil, debido a que los cambios del volumen en el espécimen requiere de una determinación precisa de las presiones de poro. Por otra parte, los valores de la relación de Poisson,  $\nu$ , puede influenciar de manera importante los resultados cuando se calculen las velocidades de las ondas cortantes,  $V_s$ , a partir de los valores de E.

La determinación de las velocidades de ondas cortantes,  $V_s$ , puede realizarse a partir del Módulo de elasticidad, E, y debido a que su determinación no implica cambios de volumen, esto puede llevarse a cabo con precisión.

El ensaye de péndulo libre de torsión es la representación más cercana del comportamiento de sedimentos a este fenómeno.

Durante el ensaye del péndulo de torsión, la muestra es sujeta a diferentes presiones de confinamiento, y consolidada bajo presión hidrostática. Un brazo horizontal es añadido a la cámara, como se muestra en la figura 1.10, en el cual dos pesos son colocados de forma simétrica con el eje de la muestra, se le aplica un pequeño impulso al brazo, permitiendo al sistema vibrar libremente. La vibración es producida por la respuesta de los elementos elásticos en el suelo y las lecturas son grabadas en un dispositivo de adquisición de datos eléctrico especial. De la información obtenida, el Módulo de rigidez al cortante dinámico, G, es calculado mediante la expresión 9:

$$G = \frac{\omega_{sd}^2 c}{(1 - \zeta_s^2) - (1 - \zeta_a^2) \left(\frac{\omega_{sd}}{\omega_{ad}}\right)^2} \quad (9)$$

Donde:

$$c = J_a L / I_p$$

$J_a$  = Momento polar de inercia de las masas

$$I_p = \frac{\pi D_0^4}{32} \quad (10)$$

$\omega_{sd}$  = Frecuencia circular amortiguada del sistema

$\omega_{ad}$  = Frecuencia circular amortiguada de calibración

$\zeta_s$  y  $\zeta_a$  = Relaciones de amortiguamiento del sistema y del instrumento, respectivamente

Considerando las ecuaciones 11 y 12 es posible determinar el módulo de elasticidad lineal, E, a partir del Módulo de rigidez al cortante dinámico:

$$G = V_s^2 \rho \quad (11)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (12)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3 y 4 en la ecuación 12, obtenemos el módulo de elasticidad lineal, E, en función de las velocidades de ondas  $V_s$  y  $V_p$ , indicado en la ecuación 13

$$E = \rho V_s^2 \frac{(4 - 3k^2)}{1 - k^2} \quad (13)$$

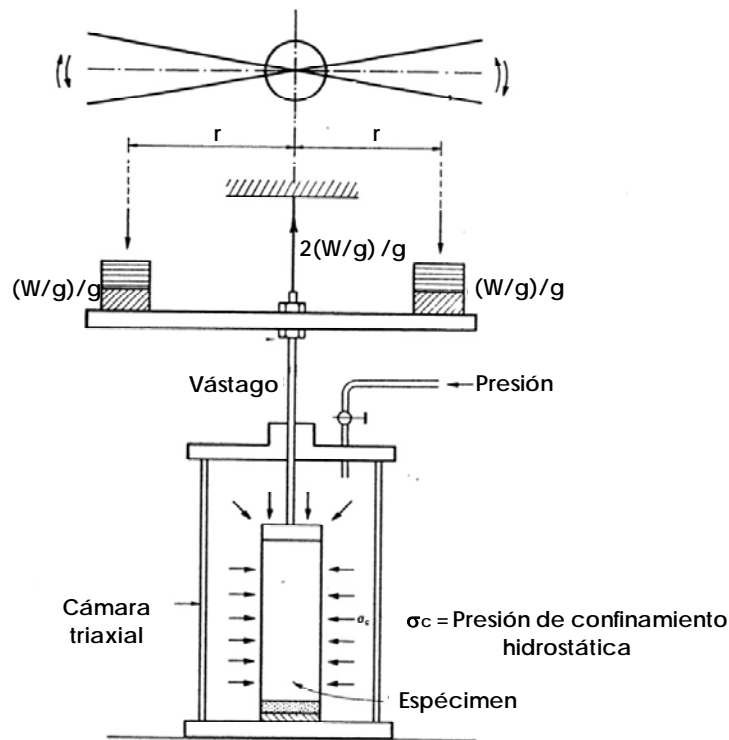


Figura 1.10 Péndulo de torsión de vibración libre, (Zeevaert, 1983)

### 1.1.6 Cámara triaxial cíclica

El ensaye en la cámara triaxial cíclica tiene como finalidad investigar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia al esfuerzo cortante de un espécimen cilíndrico de suelo, sometido a esfuerzos isotrópicos o anisotrópicos y esfuerzos desviadores axiales con variación periódica senoidal.

Los antecedentes de este tipo de ensayos pueden ubicarse en las investigaciones realizadas para la construcción del canal de Panamá. La figura 1.11 muestra un equipo para aplicar cargas dinámicas desarrollado por Casagrande y Shannon (1948), este equipo utilizaba la energía de un péndulo el cual golpeaba un resorte conectado a un pistón hidráulico que transmitía la energía a otro pistón hidráulico que finalmente la aplicaba a un espécimen de suelo.

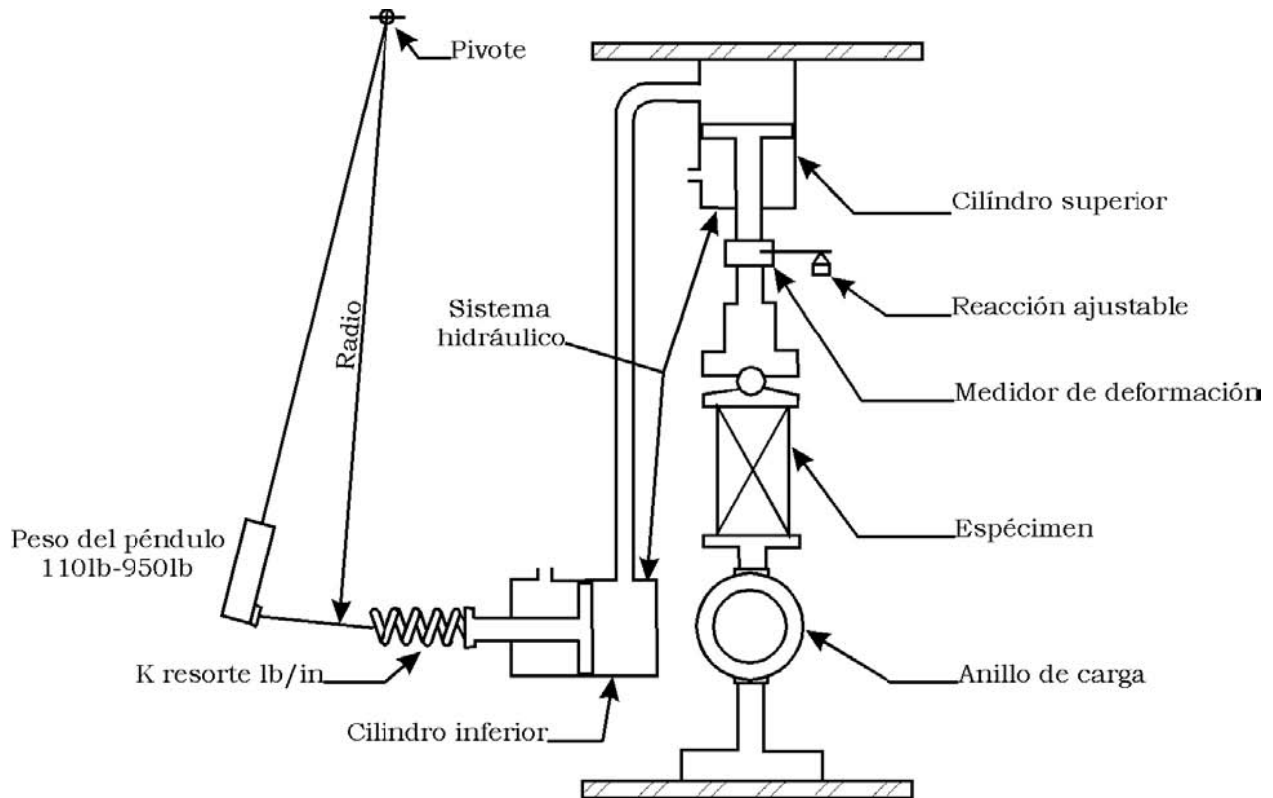


Figura 1.11 Equipo de carga de péndulo (Casagrande y Shannon, 1948)

Seed y Fead (1959) y Seed (1960) describen un equipo que usa un pistón neumático para la aplicación de la carga dinámica, el dispositivo permite someter los especímenes de ensaye a una presión de confinamiento.

La figura 1.12 muestra un esquema de la cámara triaxial cíclica moderna.

El ensaye triaxial cíclico consiste en someter a una probeta de suelo a un esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_{3c}$ , (bajo condición isotrópica) hasta lograr su consolidación, y posteriormente aplicarle un esfuerzo desviador cíclico,  $q$ , de magnitud conocida a una frecuencia determinada,  $f$ , o bien, aplicar una deformación cíclica de semi-amplitud,  $SA$ , conocida a una frecuencia determinada, todo esto manteniendo el esfuerzo de confinamiento constante,  $\sigma_{3c}$ , como se indica en la figura 1.13

En la figura 1.13a se muestra el estado de esfuerzos de una probeta en un ensaye triaxial, en el que, una vez consolidado el espécimen a una presión de confinamiento,  $\sigma_{3c}$ , se incrementa el esfuerzo axial en una cantidad igual a  $\pm \sigma_d$ , manteniendo constante la presión de confinamiento. En la figura 1.13b se puede observar cómo es la variación de los esfuerzos cortantes y de los esfuerzos axiales dentro de la probeta en un ensaye triaxial.

La distribución de esfuerzos que se presenta en un ensaye típico, se aleja un poco de la condición ideal de ensaye en la que se debe variar tanto el esfuerzo axial como el



esfuerzo de confinamiento, manteniendo constantes los esfuerzos normales y variando únicamente los esfuerzos cortantes, los cuales cambian de sentido ciclo a ciclo.

Para la ejecución de la prueba se definen el número de ciclos,  $N$ , la frecuencia de excitación,  $f$ , y los incrementos de esfuerzo desviador cíclico,  $\sigma_d$ , entre cada serie de ciclos.

Para el trabajo experimental que se presenta en esta tesis, durante el ensaye se aplica 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 TM, como se observa en la figura 1.14.

Con los datos obtenidos se determina la relación de Poisson conforme a las expresiones 14,15 y 16:

$$\varepsilon_a = \frac{\delta_a}{H_0} \quad (14)$$

$\varepsilon_a$  = Deformación unitaria axial

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{r_0} \quad (15)$$

$\varepsilon_r$  = Deformación unitaria radial

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (16)$$

$\nu$  = Relación de Poisson

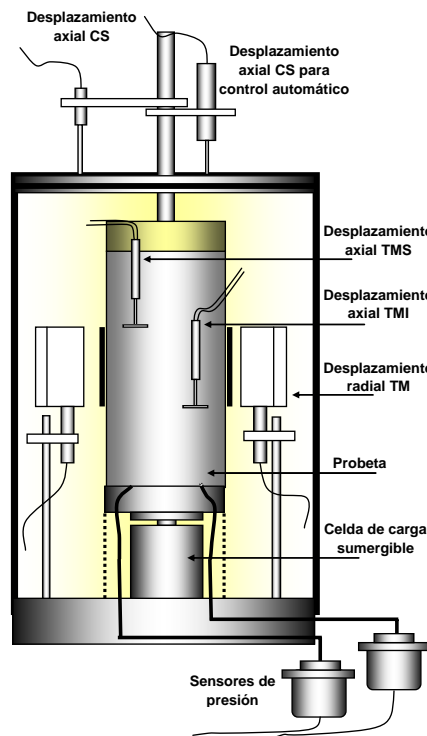


Figura 1.12 Cámara Triaxial cíclica, (Flores, 2009)

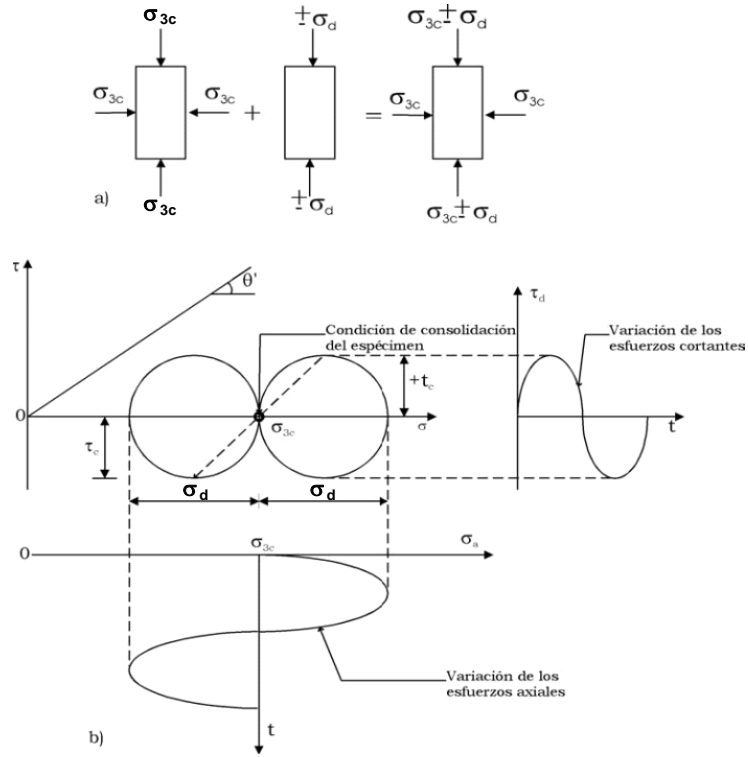


Figura 1.13 Esquema del ensaye triaxial cíclico convencional para un espécimen isotrópicamente consolidado, (Díaz, 2005)

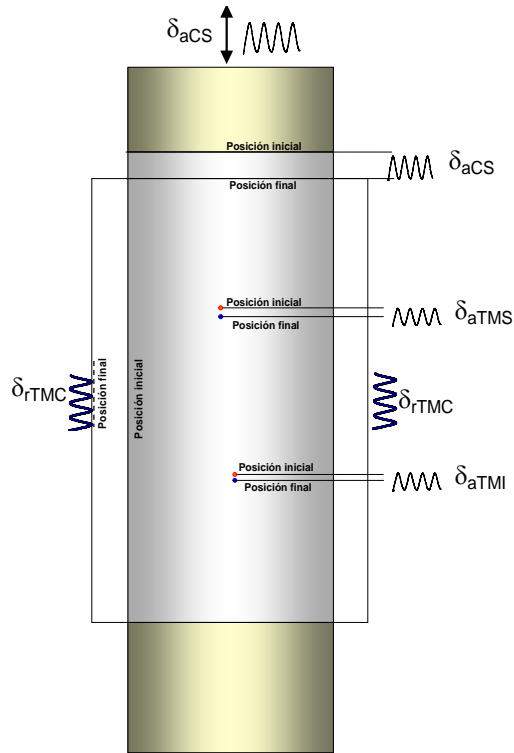


Figura 1.14 Esquema de desplazamientos axiales y radiales en la probeta, (Flores, 2009)

## 1.2 Estudios previos

Se realizó una búsqueda bibliográfica sobre trabajos de investigación realizados en suelos granulares donde se determinaron valores experimentales de la relación de Poisson, obtenidos a partir de mediciones de deformación radial y axial, así como de velocidades de ondas cortante y de compresión, generadas por transductores o elementos bender.

A continuación se realiza una descripción de los trabajos realizados por algunos investigadores, estableciendo la influencia de algunos parámetros en la determinación de la relación de Poisson, tales como la porosidad (Salem, 2000, Dvorkin y Nur, 1996, compacidad relativa, (Tsukamoto *et al.*, 2002), esfuerzo de confinamiento, (Fawaz, *et al.*, 2002, Chaudhary *et al.*, 2003), y el grado de saturación (Gokhan Inci *et al.*, 2001).

Salem en el año 2000, llevó a cabo una investigación en la cual realizó mediciones de refracción sísmica para registrar velocidades de propagación de ondas P y S, mediante el uso de un sistema de geófonos colocados en línea, separados a cada 2 m, con puntos de tiro localizados a un metro desde el primer geófono hasta el último, los resultados obtenidos indican que existe una relación lineal entre  $v$  y la porosidad,  $n$ , en donde  $v$  disminuye conforme aumenta  $n$ ; dicha relación se puede apreciar en la figura 1.15. Con la información obtenida, se determinó la relación de Poisson, ( $\nu$ ) y la porosidad, ( $n$ ) de acuerdo con las expresiones 17, 18 y 19:

$$n = -0.175 \ln(V_p) + 1.56 \quad (17)$$

$n$  = Porosidad, expresión obtenida por Watkins, *et al.*, (1972)

$$\nu = 0.81734 - 0.01208n, (R_c = 0.91) \quad (18)$$

$$\nu = 0.38798 - 0.0084335n, (R_c = 0.96) \quad (19)$$

$R_c$  = Coeficiente de correlación

Los valores positivos de Poisson corresponden a suelos superficiales y materiales subyacentes, los valores negativos de Poisson corresponden solamente a suelos superficiales con porosidad promedio de 58.9% con anisotropía.

La relación de Poisson disminuye con la profundidad, lo cual puede ser atribuido al hecho que los suelos y sedimentos son más jóvenes y más compresibles cerca de la superficie, pero pueden llegar a ser menos compresibles y más plásticos con la profundidad (mayor módulo volumétrico, menor compresibilidad y menor relación de Poisson).

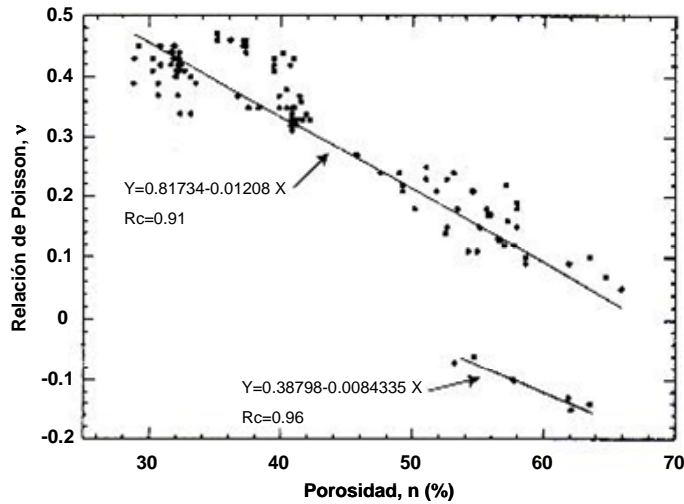


Figura 1.15 Variación de la relación de Poisson con la porosidad, obtenidas con refracción sísmica (Salem, 2000)

Chaudhary, *et al.*, en 2003 publicaron un trabajo en donde determinaron parámetros de rigidez en arena densa de Toyoura, medidos en varios estados de esfuerzos, durante condiciones de consolidación similares y manteniendo el esfuerzo octaédrico constante,  $p'$ , en muestras huecas y sólidas en un aparato equipado con transductores y elementos bender.

Un diagrama esquemático del sistema de ensaye para pruebas huecas se muestra en la figura 1.16, las dimensiones de las muestras fueron de 20 cm de altura, radio interior de 3 cm y radio exterior de 5 cm, los desplazamientos axiales y angulares fueron medidos por sensores de proximidad en la parte superior de la probeta, además estos mismos desplazamientos fueron medidos por un transductor de desplazamiento tipo "strain gage", colocado fuera de la celda y el potenciómetrico en el cabezal.

Un diagrama esquemático del sistema de ensaye triaxial utilizado para el ensaye de las probetas sólidas se muestra en la figura 1.17, las dimensiones de las probetas ensayadas fueron de 15 cm de altura y de 7.5 cm de diámetro, el aparato está totalmente automatizado y es 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 sobre la porción central de la muestra por un par de transductores locales de desplazamiento (LDT) y un par de transductores (LVDT) montados en lados diametralmente opuestos.

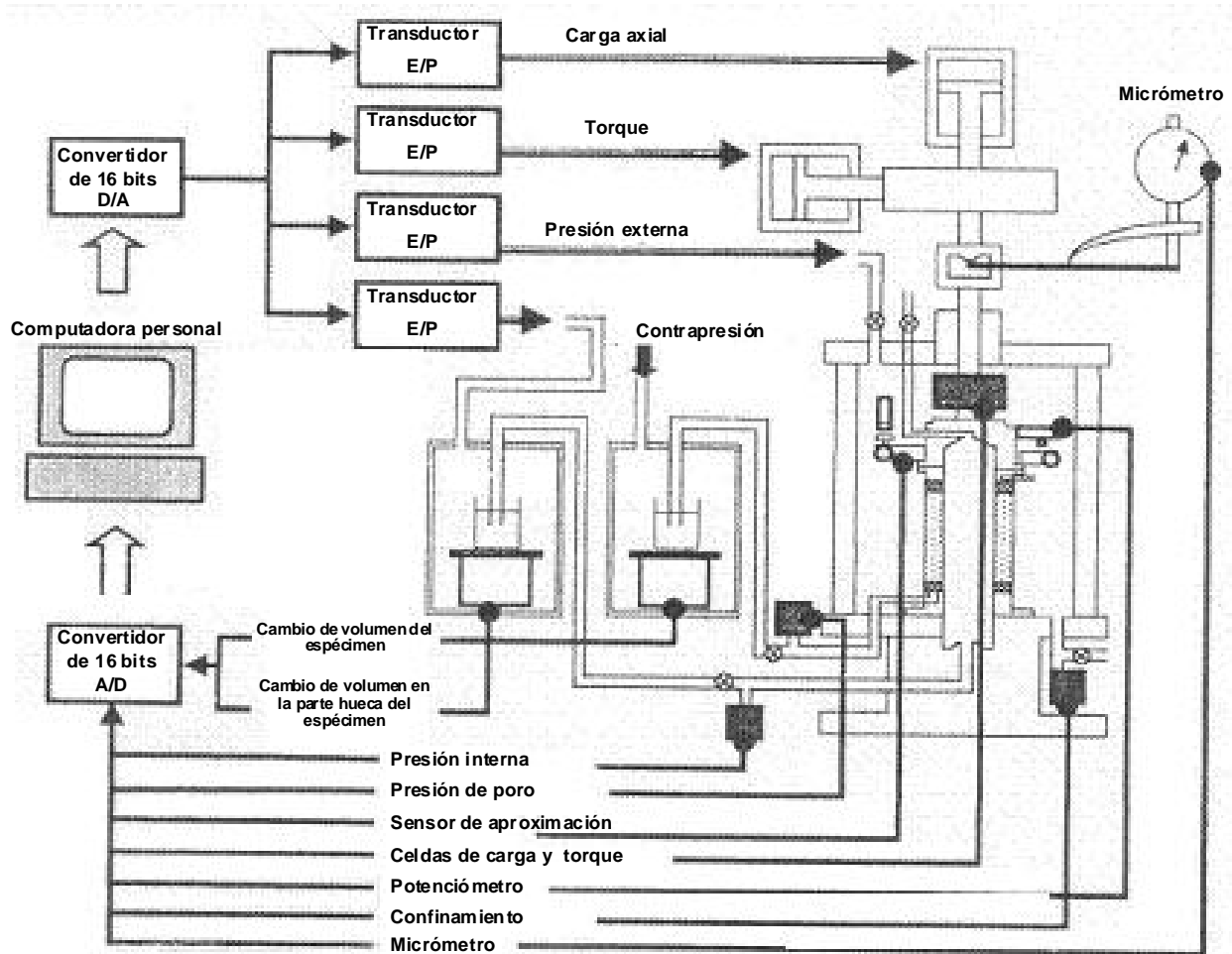


Figura 1.16 Esquema general del equipo para ensayar probetas huecas (Chaudhary et al., 2003)

Para medir las velocidades de onda cortantes en el plano horizontal y vertical de la muestra, se instalaron un par de elementos bender en dirección axial y dos pares en dirección horizontal (radial), como se muestra esquemáticamente en la figura 1.18

Se utilizó arena de Toyoura en la investigación realizada, material uniforme con partículas subangulosas, principalmente de material de cuarzo, ampliamente utilizadas en Japón con propósitos de investigación. Las principales propiedades físicas son la siguientes:  $D_{50} = 0.19 \text{ mm}$ ,  $G_s = 2.645$ ,  $e_{\text{mín}} = 0.609$  y  $e_{\text{máx}} = 0.973$ .

Las muestras fueron formadas por pluviación en aire, obteniendo compacidades relativas del orden de 80%, la altura de caída de la arena se mantuvo constante para lograr una densidad uniforme en las probetas.

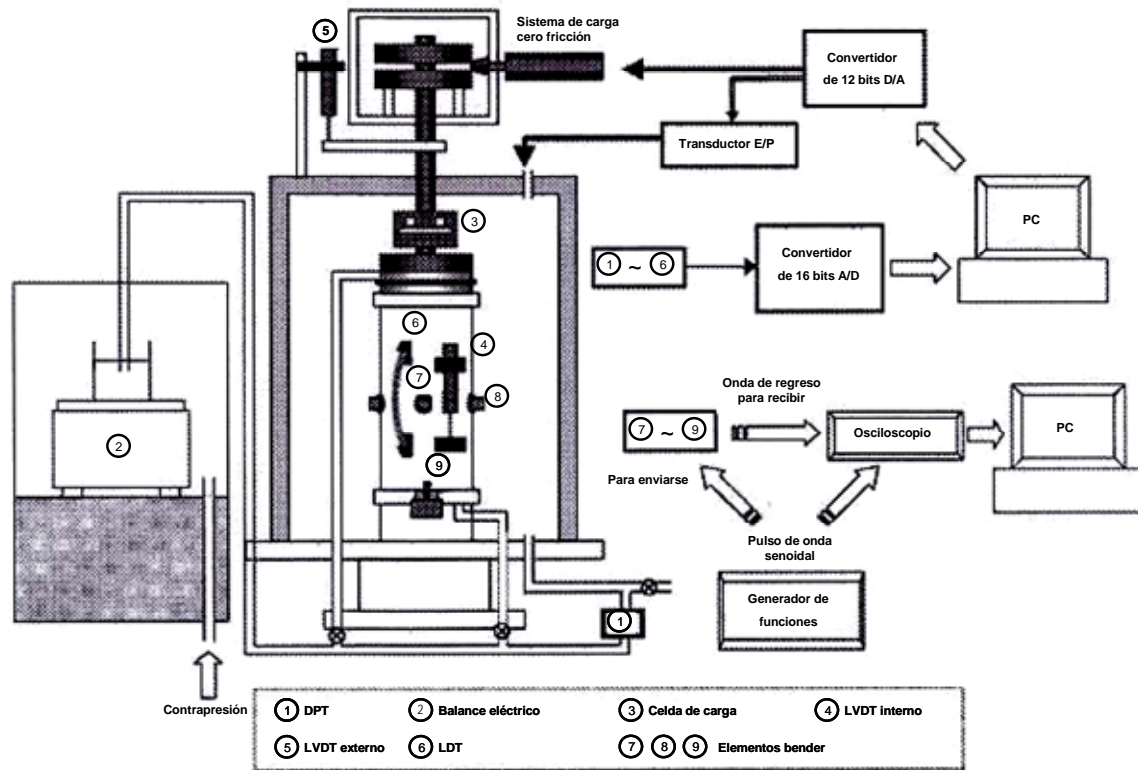


Figura 1.17 Esquema general del equipo para ensayar probetas sólidas (Chaudhary et al., 2003)

Un total de ocho pruebas fueron realizadas para este trabajo, 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  $K = \Delta\sigma_h' / \Delta\sigma_v' = 0.50$  de consolidación. Las otras cuatro fueron triaxiales, dos a compresión y las otras dos a extensión, consolidadas isotrópicamente a 98.1 kPa (1.0 kg/cm<sup>2</sup>)

Los valores de la relación de Poisson medidos durante la consolidación se muestran en la figura 1.19. Los valores para ambos aparatos, cilindro hueco y cámara triaxial fueron similares y varían, entre 0.10 y 0.30, la dispersión fue del mismo orden en ambos equipos. El nivel de deformación que se aplicó para la determinación de la relación de Poisson fue menor de 0.005%, en términos generales.

La relación de Poisson medida durante la compresión y extensión triaxial se muestra en la figura 1.19b, donde  $\tau_{m\acute{o}x} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$  es el esfuerzo cortante máximo, y  $\tau_{m\acute{o}xf}$  es el máximo esfuerzo cortante a la falla. Los valores de relación de Poisson se encuentran entre 0.10 y 0.30, independiente de la aplicación del esfuerzo cortante.

Se puede observar que la relación de Poisson no es afectado notablemente por el nivel de esfuerzo cortante aplicado.

Se puede observar que la relación de Poisson es independiente de los niveles de presión y de esfuerzo constante aplicados. Para ambos casos, los ensayos realizados en probetas huecas y sólidas, la relación de Poisson es muy similar.

Los resultados muestran que para ambos tipos de ensayos, en probetas huecas y sólidas, así como las condiciones de consolidación como en la etapa de ensaye a la falla, la relación de Poisson se mantiene en un rango de 0.10 a 0.30, se observa también que en la etapa de consolidación, la condición isotrópica o anisotrópica no influye de manera considerable en la relación de Poisson, al incrementar el esfuerzo octaédrico,  $p'$ .

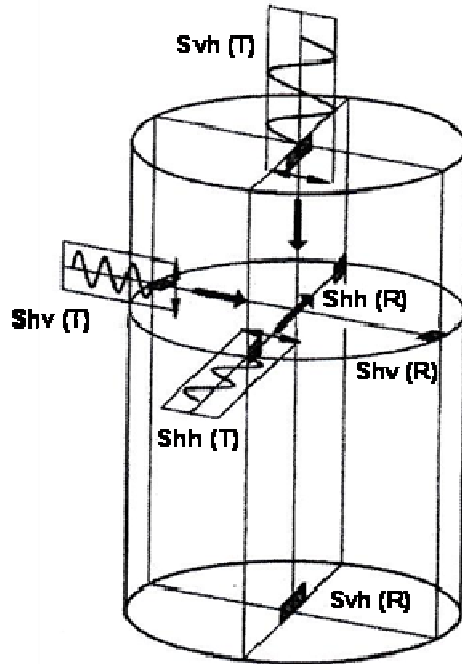
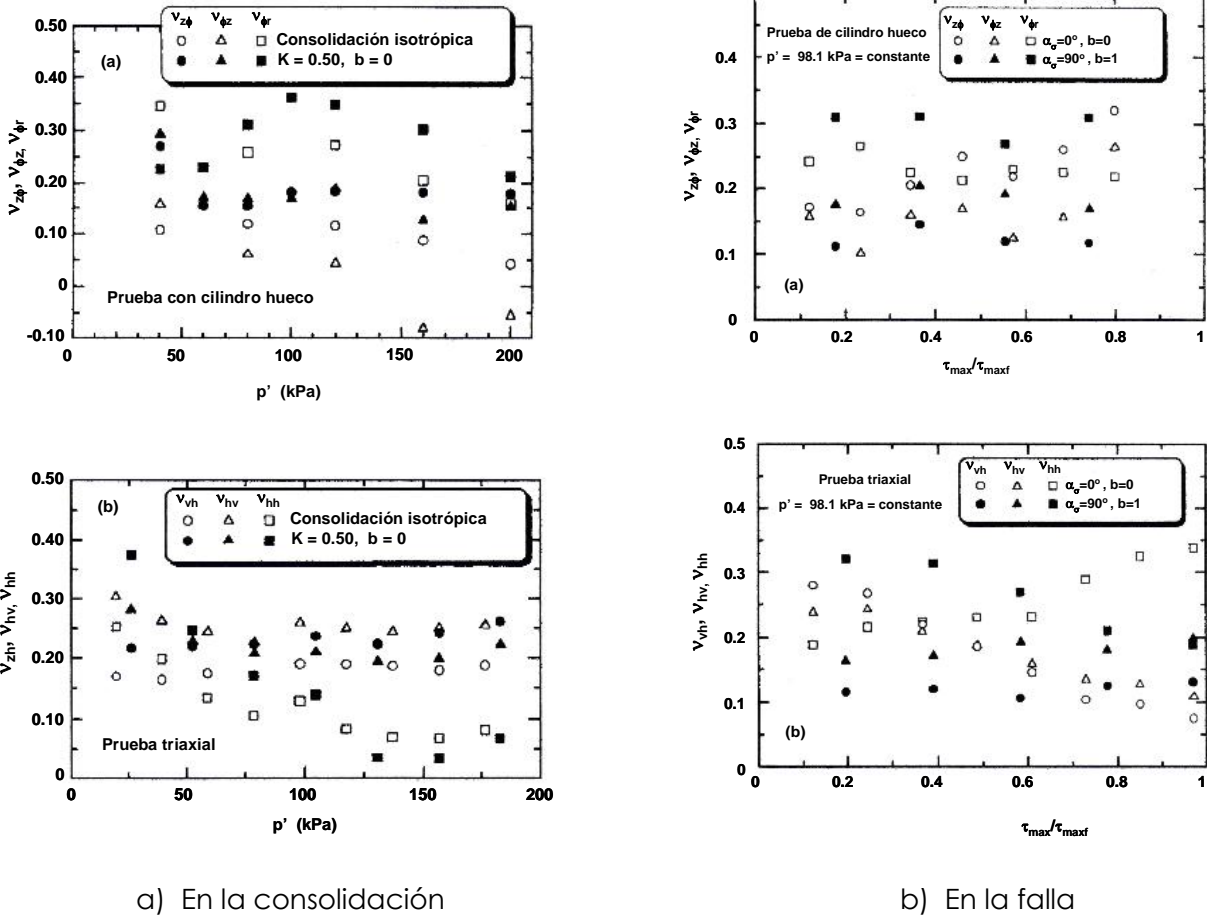


Figura 1.18 Posiciones y direcciones de registro de las velocidades de onda de cortante (Chaudhary et al., 2003)



a) En la consolidación

b) En la falla

Figura 1.19 Relación de Poisson para las muestras huecas y sólidas durante la consolidación y en la etapa de ensaye, con  $p'$  constante (Chaudhary et al., 2003)

Tsukamoto, *et al.*, (2002), realizaron un trabajo con el propósito de examinar la resistencia a la licuación de una arena parcialmente saturada, para esto desarrollaron una cámara triaxial cíclica en la cual es posible medir las velocidades de onda de compresión y de cortante y después llevar a cabo ensayos triaxiales en las mismas pruebas en condiciones de consolidación isotrópica constante. Una serie de ensayos indicaron que las velocidades de ondas de compresión,  $V_p$ , pueden ser utilizadas para determinar el grado de saturación de muestras cercanas a la saturación, el efecto de este parámetro en la resistencia a la licuación de arenas puede ser establecido al realizar ensayos triaxiales cíclicos inmediatamente después de medir la velocidad de la onda P, un esquema del procedimiento de ensaye se indica en la figura 1.20. Los resultados de las mediciones 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, correspondientemente, para un grado de saturación final entre 90 y 100%.

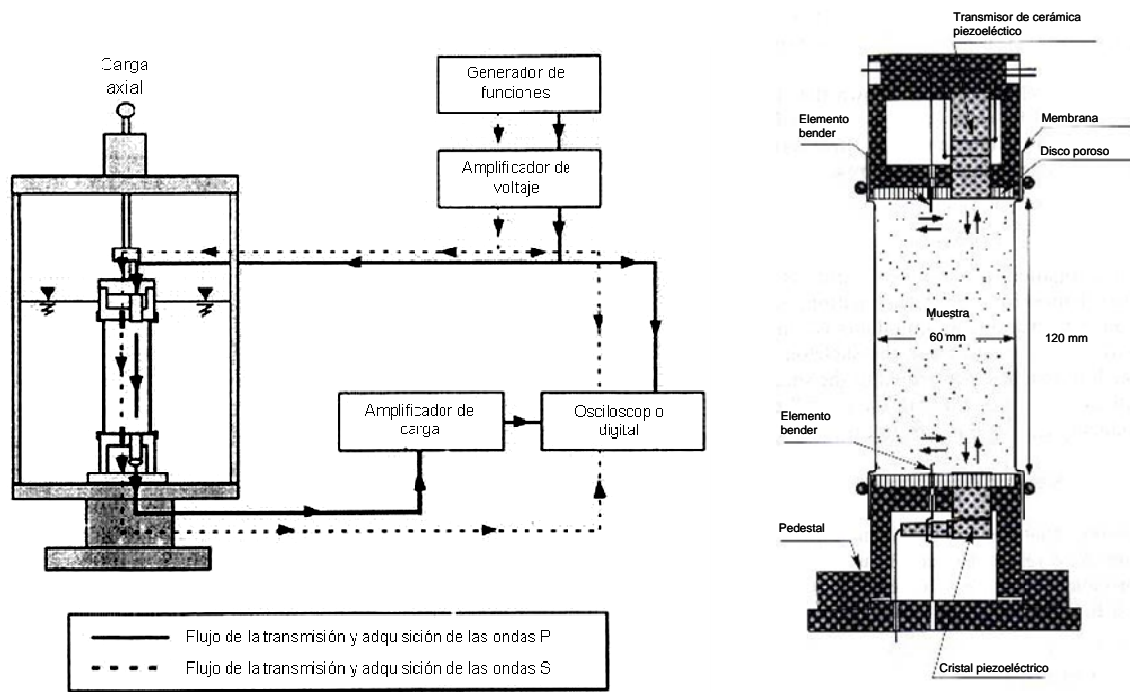
El valor de  $V_p$  se puede expresar en función de dos factores, el valor de B y la relación de Poisson del esqueleto de suelo, el cual es definido por los pequeños niveles de deformaciones registradas en la masa de suelo. De acuerdo con estos investigadores, la ventaja de usar las velocidades de onda P como un parámetro de 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, en campo, 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. Por lo tanto, 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, por lo tanto ésta puede ser usada para identificar el valor de B en sitio, como el que se usa en muestras de suelo en laboratorio.



a) Sistema para obtener las velocidades de onda

b) Instrumentación de la probeta

Figura 1.20 Cámara triaxial cíclica acondicionada para medir velocidades de ondas P y S (Tsukamoto et al., 2002)

Con base en la concepción anterior, Tsukamoto et al., 2002, realizaron una serie de ensayos en laboratorio con probetas reconstituidas de arena con diferentes grados de saturación.

En la cámara triaxial se pueden ensayar probetas de 6 cm de diámetro por 12 cm de altura, el cabezal superior se equipó con un disco poroso y en éste se colocó un sistema para activar los pulsos para generar las ondas cortantes y de compresión, el pedestal

también se equipó con un disco poroso y un receptor de las ondas que recorren la longitud de la probeta.

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. También se colocaron un par de elementos bender, uno como emisor y otro como receptor, para medir la velocidad de ondas de cortante del espécimen.

El material que se utilizó para los ensayos fue arena de Toyoura cuyas características se mencionaron anteriormente.

El método de formación fue por pluviación en aire, lo que permitió obtener probetas con compacidades relativas entre 30 y 70%. Las muestras de suelo se consolidaron isotrópicamente a un esfuerzo efectivo de 98 kPa, (1.0 kg/cm<sup>2</sup>) y se midió la B de Skempton, considerando que este valor se incrementa conforme aumenta la contrapresión.

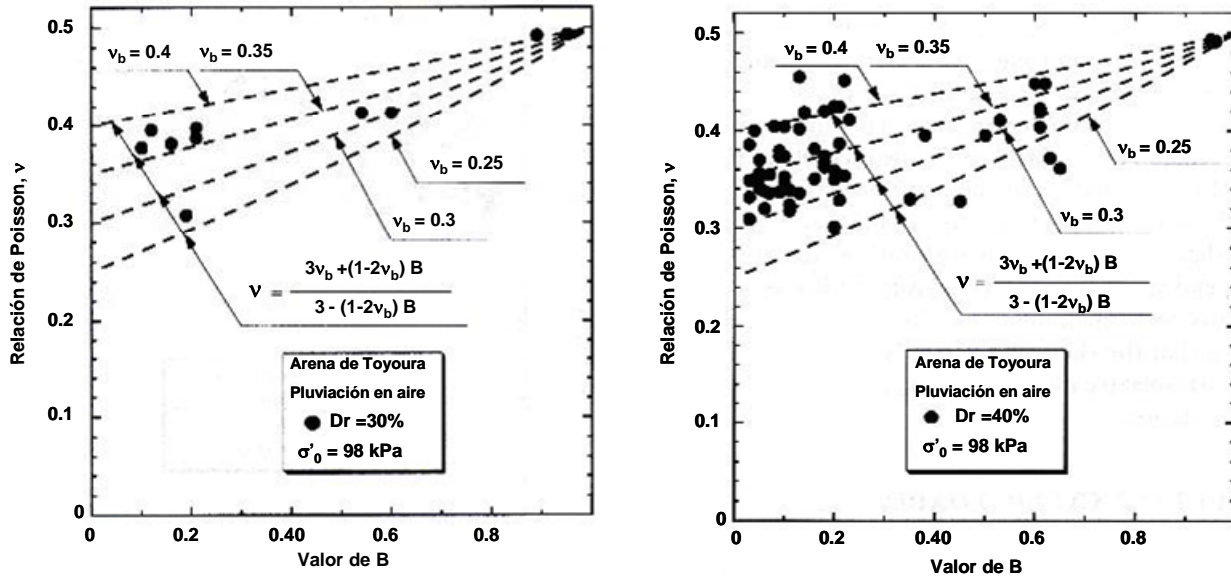
A partir de las mediciones de las velocidades de onda de compresión,  $V_p$ , y de cortante,  $V_s$ , se calculó la relación de Poisson, considerando la expresión 20:

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \quad (20)$$

Los resultados experimentales que se indican en la figura 1.21, muestran que cuando el material se encuentra en estado seco, la relación de Poisson oscila entre 0.22 y 0.44, para todas las densidades estudiadas, conforme aumenta el valor de la B de Skempton el rango de variación se va cerrando, hasta llegar al valor de 0.50, cuando  $B=0.95$ .

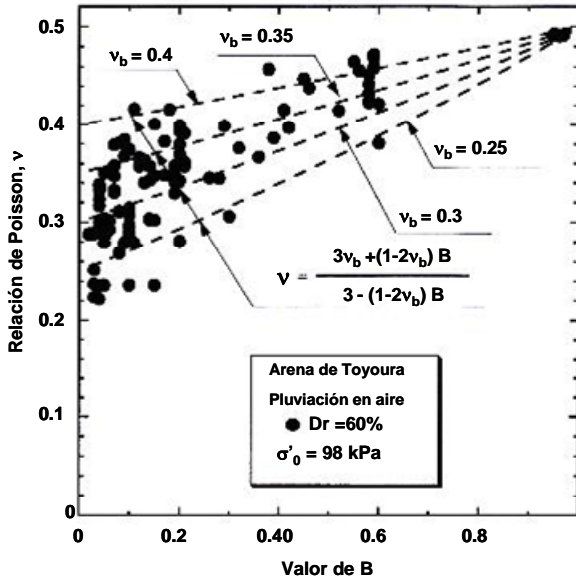
De acuerdo con los resultados experimentales, los autores propusieron la expresión 21 para determinar la relación de velocidades en función de la relación de Poisson y del valor de B.

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{2(1-\nu)}{3(1-2\nu)(1+B)} \quad (21)$$

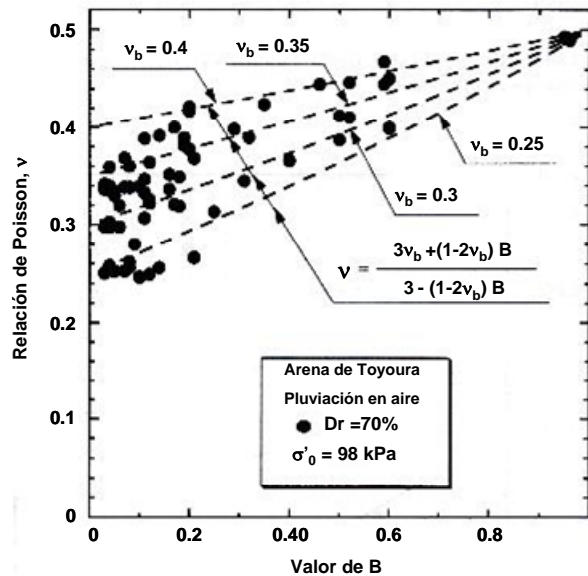


a) Compacidad relativa de 30 %

b) Compacidad relativa de 40 %



c) Compacidad relativa de 60 %



d) Compacidad relativa de 70 %

Figura 1.21 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y la B de Skempton (Tsukamoto et al., 2002)

Gokhan Inci *et al.*, (2001), realizaron un estudio para definir la influencia del grado de saturación en la determinación de la relación de Poisson; para esto obtuvieron las propiedades dinámicas de suelos arcillosos compactados con vibraciones de baja amplitud, utilizando un método de transmisión de pulsos ultrasónicos.

Para este estudio los autores realizaron una serie de ensayos en tres tipos de suelos, los suelos 1 y 2 fueron de baja plasticidad y el suelo 3 se formó con una mezcla del suelo 2 y 25% en relación al peso de bentonita para formar un material con alta plasticidad.

Se elaboraron muestras cúbicas y cilíndricas compactadas, empleando energías Proctor estándar y modificadas, las muestras fueron compactadas con distintos contenidos de agua. Las muestras cúbicas fueron inicialmente formadas con 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, posteriormente fueron labradas a 11 cm aproximadamente.

Las muestras cilíndricas fueron preparadas en moldes Proctor con aproximadamente 10 cm de radio por 11 cm de altura, en total se realizaron 18 muestras cúbicas y 6 muestras cilíndricas.

Para la medición de las velocidades en las probetas se utilizaron dos transductores, un transmisor colocado en un extremo de la muestra y un receptor colocado en el extremo opuesto.

La eficacia del pulso ultrasónico utilizado en el presente estudio fue verificado con mediciones realizadas en muestras elaboradas con arena de Ottawa, las muestras fueron preparadas con 15 cm de longitud en secciones de tubo shelby, con características volumétricas y de esfuerzos conocidos. Las mediciones obtenidas de las muestras fueron comparadas con los resultados reportados por Lambe y Whitman (1969), los resultados indicaron que con similares relaciones de vacíos y condiciones de esfuerzos, las velocidades de onda obtenidas concuerdan con los valores publicados por estos autores.

De los resultados obtenidos en el presente estudio se puede establecer que las velocidades de onda en suelos arcillosos compactados pueden ser afectados por un número de parámetros que incluyen factores de composición y ambientales.

Los factores de composición comprenden la mineralogía de las arcillas y contenido de finos. Los factores ambientales comprenden condiciones de compactación, grado de saturación y esfuerzo efectivos en la muestra, la tendencia de los resultados obtenidos indican que las velocidades se incrementan conforme se incrementa el esfuerzo de compactación y decrementa la plasticidad del suelo.

Para la determinación de la relación de Poisson se consideraron las velocidades de ondas de compresión,  $V_p$ , y ondas cortantes,  $V_s$ , se consideró que el medio fue isótropo, semi-infinito y elástico.

Los resultados experimentales se muestran en la figura 1.22, en la cual se puede apreciar la variación de la relación de Poisson, cuando el grado de saturación es máximo entre 80 y 100 % le corresponden valores de 0.40 a 0.50, presentando poca dispersión, para un grado de saturación entre 0 y 20 % la relación de Poisson disminuye al rango entre 0.05 y 0.30, presentando mayor dispersión de valores.

De acuerdo con lo observado, se puede indicar que la relación de Poisson depende fuertemente del grado de saturación y en menor medida de la plasticidad del suelo. La relación de Poisson se incrementa con el aumento del grado de saturación. La dispersión de valores de la relación de Poisson fue menor con valores de saturación altos, comparado con saturaciones menores.

La relación de Poisson fue ligeramente menor para el suelo 1, en comparación con los suelos 2 y 3. Gazetas (1991), indicó que la relación de Poisson depende altamente del grado de saturación y que tiene poca afectación por el tipo de suelo, presión de confinamiento y relación de vacíos. Los suelos saturados son esencialmente incompresibles y les corresponden un valor de relación de Poisson límite de 0.50.

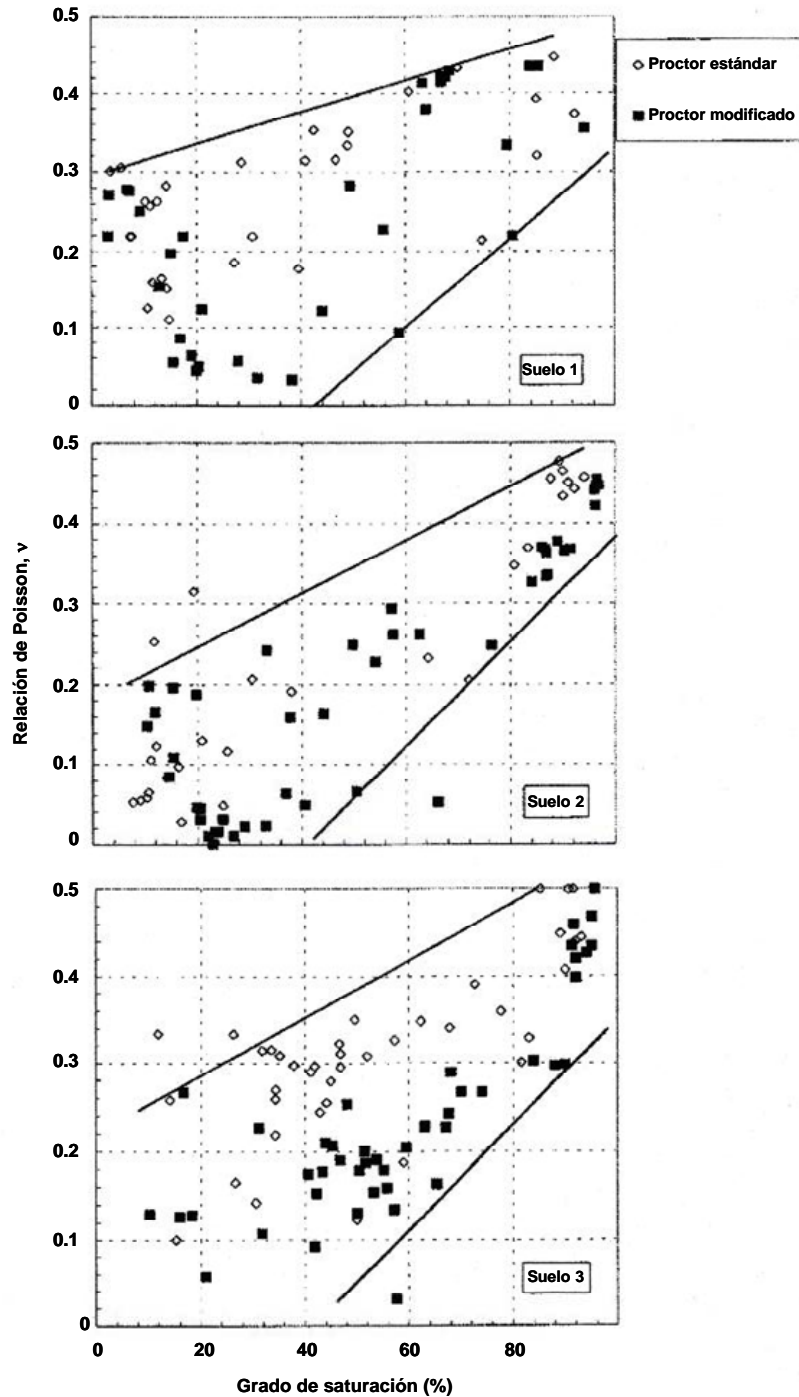


Figura 1.22 Variación de la relación de Poisson con el grado de saturación (Gokhan Inci et al., 2001)

Dvorkin y Nur en 1996, desarrollaron un trabajo que consistió en determinar la variación de la relación de Poisson, a partir de las velocidades de las ondas de compresión ( $V_p$ ) y cortantes ( $V_s$ ), respecto a la porosidad del material, así como del esfuerzo de confinamiento aplicado a las muestras, para esto realizaron una serie de ensayos en dos tipos de areniscas del Mar del Norte. El primer material corresponde a la región de Oseberg (Starndenes, 1991), cuyas muestras presentan alta anisotropía intrínseca, de las cuales se seleccionó un subgrupo que presentó porosidades entre 0.13 y 0.32, conformado principalmente por arenas de cuarzo, con material cementante entre sus partículas.

El segundo grupo consistió en arenas de la región de Troll con porosidades entre 0.22 y 0.38 (Blangy, 1992; Blangy *et al.*, 1993), sin presentar cementante entre sus partículas.

En la figura 1.23 se muestran los resultados experimentales del suelo de la región de Troll, para la condición seca y saturada, para los esfuerzos de confinamiento de 5, 15 y 30 MPa, (51.0, 153.0 y 306.0 kg/cm<sup>2</sup>), en ambos casos se observa que presentan el mismo comportamiento: conforme aumenta la porosidad, disminuyen las velocidades de las ondas S y P, presentando una mayor disminución estas últimas. Conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento aumentan estas velocidades, y al aumentar el grado de saturación aumentan la magnitud de las mismas.

En la figura 1.24 se indican los valores de la relación de Poisson para las arenas de la región de Troll, en condiciones secas y saturadas, para los esfuerzos mencionados anteriormente; se puede apreciar que para la condición saturada, la relación de Poisson presenta la siguiente variación: para un esfuerzo de 5 MPa (51.0 kg/cm<sup>2</sup>), le corresponden valores de 0.30 a 0.40, para un esfuerzo de 15 MPa (153.0 kg/cm<sup>2</sup>), de 0.28 a 0.35, y para un esfuerzo de 30 MPa (306.0 kg/cm<sup>2</sup>), presenta valores de 0.29 a 0.33, concluyendo que al aumentar el esfuerzo de confinamiento la relación de Poisson disminuye, al aumentar la porosidad la relación de Poisson aumenta. Cuando el material se encuentra en estado seco se observa que al aumentar el esfuerzo de confinamiento, la relación de Poisson presenta una ligera tendencia a aumentar, mostrando una mayor dispersión de valores.

Fawaz, *et al.*, en el 2002, realizaron una serie de ensayos triaxiales en arena cárstica fina de la región de Hostun, Francia, para determinar la variación de la relación de Poisson,  $\nu$ , el ángulo de fricción,  $\phi$ , y el módulo de Elasticidad Tangente, con la finalidad de realizar pruebas con el piezómetro en un modelo cilíndrico de 57.5 cm de diámetro y 89.2 cm de altura.

Los ensayos triaxiales se realizaron en muestras de 10 cm de diámetro y 21 cm de altura, con un peso volumétrico promedio entre 1.5 y 1.6 T/m<sup>3</sup>.

Los resultados que obtuvieron los autores indican que el ángulo de fricción decrece al aumentar el esfuerzo de confinamiento de 50 a 400 kPa, (0.5 a 4.0 kg/cm<sup>2</sup>), variando de 40 a 36°, respectivamente, mientras que el módulo de elasticidad Inicial aumenta de 50 a 200 MPa (500.0 a 2200.0 kg/cm<sup>2</sup>), en este mismo rango de confinamiento, la relación de Poisson disminuye al aumentar el confinamiento, con valores de Poisson de 0.46 a 0.24, (figura 1.25).

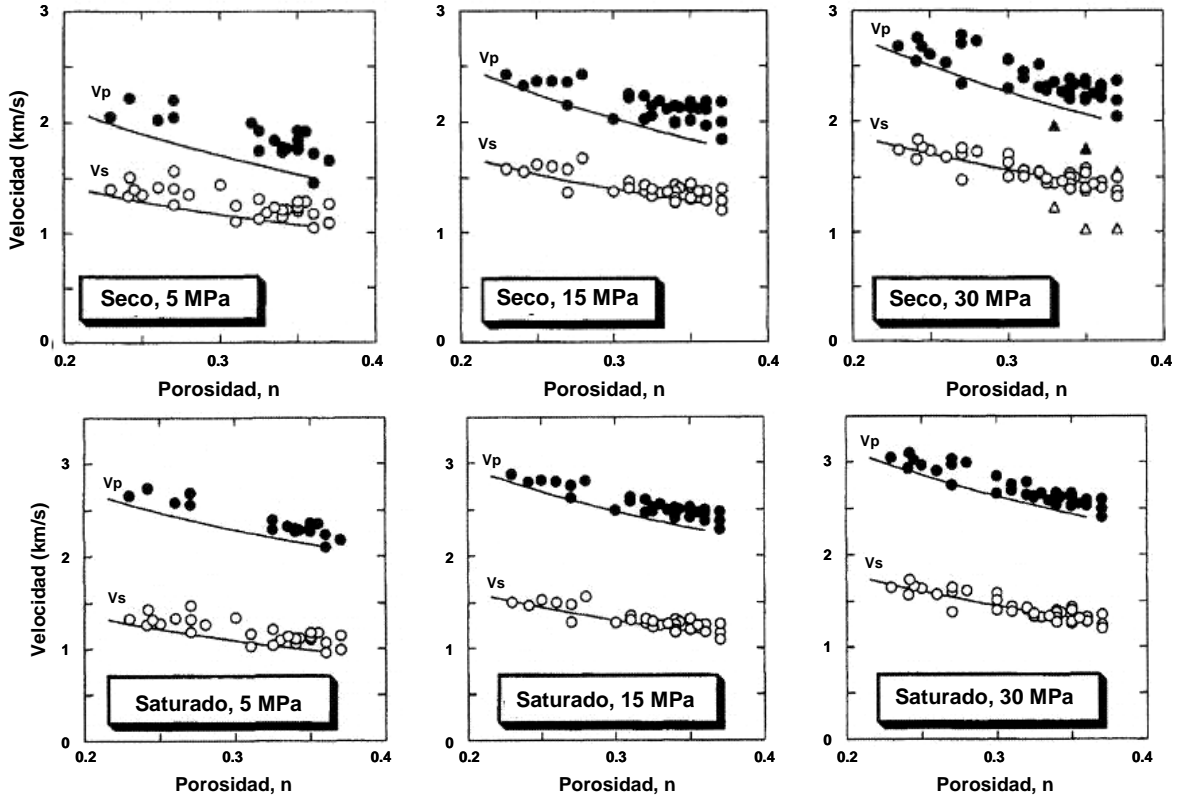


Figura 1.23 Velocidades de onda en arenas en estado seco y saturado de la región de Troll, para diferentes esfuerzos de confinamiento, los círculos rellenos corresponden a las ondas P, los vacíos representan las ondas S, los triángulos simbolizan los resultados experimentales de las muestras de Ottawa, medidas por Han (1986), Yin (1993) y Domenico (1984), Dvorkin y Nur (1996)

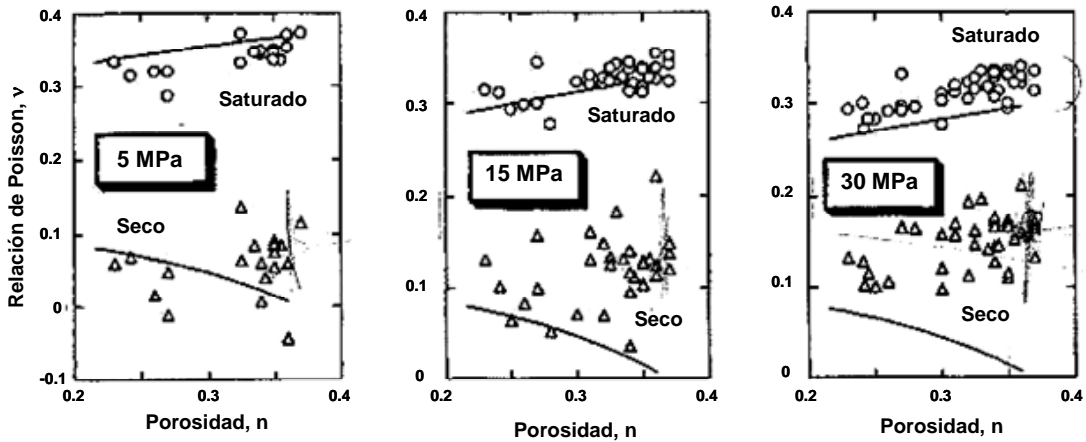


Figura 1.24 Relación de Poisson para las muestras de arena de la región de Troll, (Dvorkin y Nur, 1996)

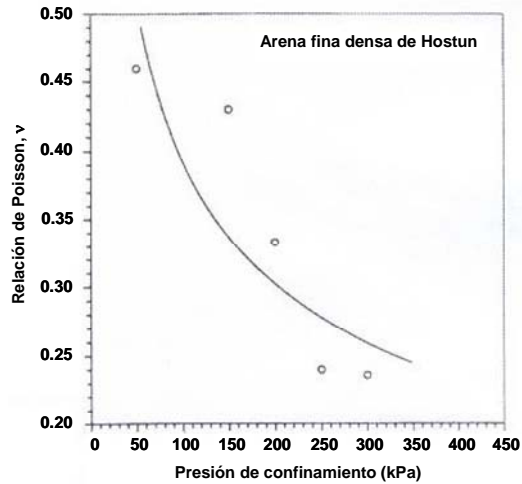


Figura 1.25 Efecto del esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson, (Fawaz, et al., 2002)

Hoque *et al.*, (1996), desarrollaron un trabajo de investigación que consistió en realizar ensayos en una cámara triaxial automatizada, para determinar el comportamiento elástico en arenas, (figura 1.26). Ensayaron muestras cuadradas, de 23 cm de base por 57 cm de altura, aplicando esfuerzos cíclicos de pequeña amplitud, con incrementos de esfuerzos axiales o laterales, midiendo deformaciones elásticas, con la finalidad de determinar el módulo de elasticidad vertical,  $E_v$ , horizontal,  $E_h$ , y la relación de Poisson,  $\nu$ .

La cámara triaxial utilizada cuenta con una celda de carga sumergible, con el propósito de eliminar la fricción originada por el pistón. La aplicación de los esfuerzos tanto verticales como horizontales, pueden ser controlados, siendo posible con esto la aplicación de consolidación anisotrópica a las probetas, así como la definición de diversas trayectorias de esfuerzos, la penetración de la membrana es directamente medida en el espécimen, utilizando transductores de deformación local (LDTs), (Goto *et al.*, 1991), un transductor externo de desplazamiento y dos transductores de proximidad fueron utilizados para los desplazamientos del pistón de carga en el cabezal superior. Dos transductores de proximidad fueron utilizados para detectar movimientos laterales en la superficie lateral de la muestra, como se indica en la figura 1.27.



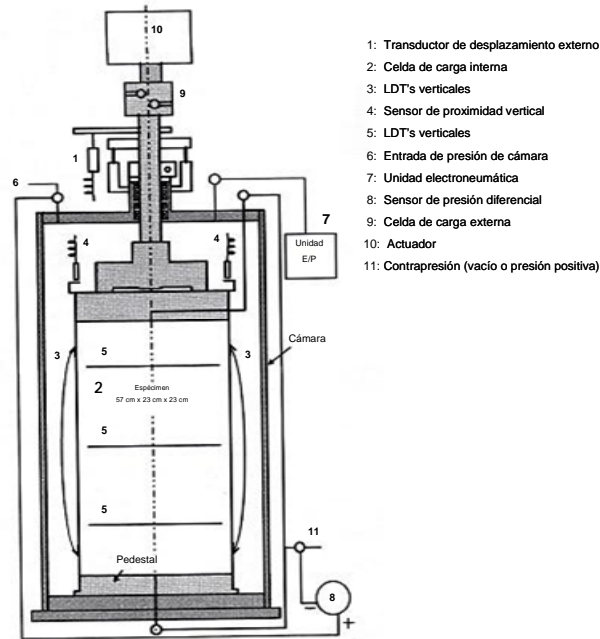


Figura 1.26 Cámara triaxial instrumentada, (Hoque *et al.*, 1996)

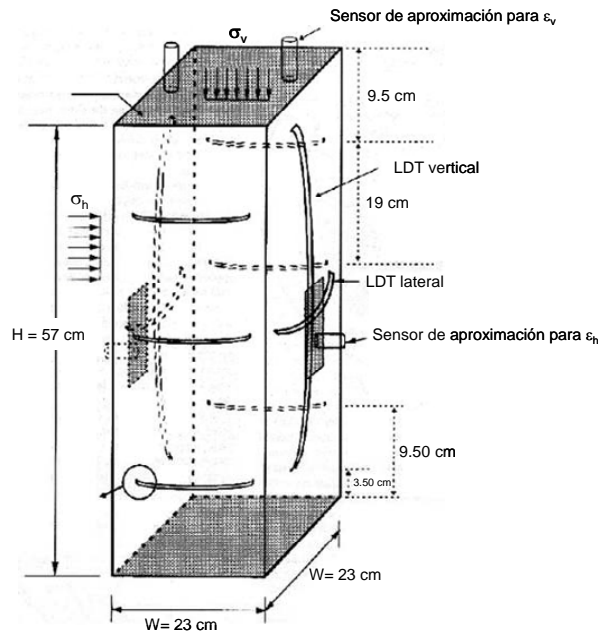


Figura 1.27 Muestra cuadrada con sensores para la medición de deformaciones (Hoque *et al.*, 1996)

Una serie de ensayos fueron realizados principalmente en arena de Ticino, arena sílica pobremente graduada, sus propiedades físicas son:  $G_s = 2.68$ ,  $D_{50} = 0.50$  mm,  $e_{max} = 0.96$  y  $e_{min} = 0.59$ , la relación de vacíos,  $e$ , de cada muestra fue medida al aplicar un esfuerzo de confinamiento de 19.6 ó 29.5 kPa (2.0 y 3.0 T/m<sup>2</sup>), cada muestra fue formada por pluviación en aire. Se aplicó vacío a las muestras antes de que el molde fuera retirado y fue reemplazado por el equivalente esfuerzo de confinamiento antes que se realizara el ensayo en la cámara triaxial.

Los incrementos de deformación unitaria vertical,  $\varepsilon_v$ , y horizontal,  $\varepsilon_h$ , fueron obtenidos al promediar las lecturas de un par de LDTs verticales y cuatro pares de LDTs laterales, respectivamente.

En la figura 1.28 se muestran los resultados de la relación de Poisson respecto a la relación de esfuerzos  $\sigma_v/\sigma_h$ , en la cual se observa que al aumentar dicha relación de esfuerzos de 0.5 a 2.0, los valores de Poisson se incrementan ligeramente de 0.14 a 0.19.

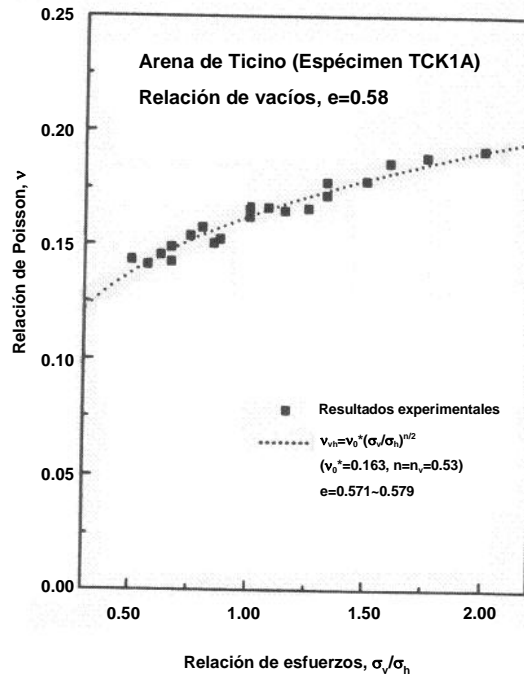


Figura 1.28 Variación de la relación de Poisson, respecto a la relación de esfuerzos ( $\sigma_v/\sigma_h$ ) (Hoque et al., 1996)

En 2006 Valle, realizó una serie de ensayos con probetas de arena en dos equipos diferentes: La cámara torsional resonante, y en una cámara triaxial instrumentada. Elementos bender y cristales piezoeléctricos fueron colocados en ambos equipos, con la finalidad de medir las velocidades de ondas cortante,  $V_s$ , mientras que en la cámara torsional resonante se midieron utilizando la columna resonante y los elementos bender.

Las velocidades de ondas de compresión,  $V_p$ , fueron medidas en ambos equipos utilizando cristales piezoeléctricos.

El material empleado para realizar las probetas fue arena clasificada como pobremente graduada SP de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS. La arena fue obtenida del Río Colorado en Austin Texas, las propiedades índice determinadas para el material en estudio se indican en la tabla 1.2.

La formación de las probetas se realizó por compactación en cinco capas por espécimen.

Tabla 1.2 Propiedades índice del material utilizado para la elaboración de probetas, (Valle, 2006)

Clasificación SUCS	SP
Tipo de partícula	Sub angular a subredondeada
G <sub>s</sub>	2.67
$\gamma_{d,max}$	18.4 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{d,min}$	14.2 kN/m <sup>3</sup>
e <sub>max</sub>	0.74
e <sub>min</sub>	0.51
Distribución del tamaño de partícula	
D <sub>50</sub>	0.31 mm
D <sub>10</sub>	0.16 mm
$C_u = D_{60} / D_{10}$	2.32
$CC = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$	1.12
% pasa la malla 200	<1%

### Cámara triaxial Instrumentada

Elementos bender y cristales piezoeléctricos fueron instalados en el pedestal y en el cabezal de una cámara triaxial cíclica, la figura 1.29 muestra el esquema de instrumentación implementada.

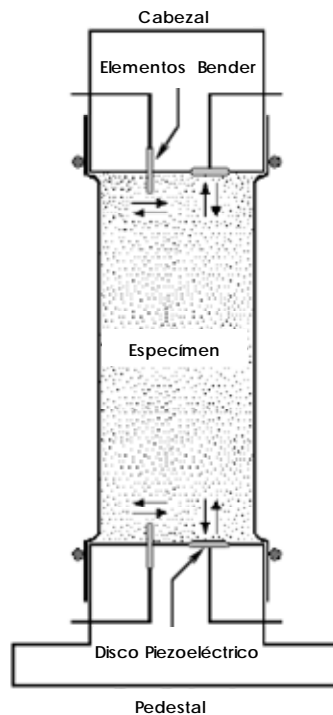


Figura 1.29 Instalación de elementos bender y discos Piezoeléctricos en la cámara triaxial instrumentada, (Valle, 2006)

En este equipo se ensayaron diez probetas de arena, en tres condiciones: seca, parcialmente saturada y saturada, el principal objetivo de realizar los ensayos en este equipo fue el de monitorear el proceso de saturación de las muestras utilizando las velocidades de las ondas,  $V_p$  y  $V_s$ , las propiedades índice. Las características de las diez probetas empleadas se indican en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Propiedades de los especímenes ensayados en la Cámara triaxial instrumentada, (Valle, 2006)

PROBETAS	$\varnothing$ cm	h cm	$\gamma$ T/m <sup>3</sup>	e	Dr %
1	3.6	11.2	1.73	0.54	84.5
2	3.6	11.2	1.67	0.60	60.0
3	3.5	11.0	1.71	0.57	72.7
4	3.6	11.0	1.68	0.59	65.0
5	3.6	11.4	1.69	0.58	69.5
6	3.6	11.2	1.66	0.61	55.9
7	3.6	11.0	1.65	0.62	50.0
8	3.6	11.0	1.65	0.61	55.9
9	3.5	10.9	1.64	0.62	50.0
10	3.5	11.0	1.66	0.61	55.9

En estas probetas, la relación de Poisson,  $\nu$ , fue evaluada, utilizando las velocidades de onda  $V_s$  y  $V_p$ , en diferentes valores de B. La variación de  $\nu$  con B se muestra en la figura 1.30, en la cual se puede apreciar que el valor promedio de Poisson es de 0.26 para las probetas de arena en estado seco y cuando  $B \leq 0.40$ ; conforme aumenta el valor de B a valores superiores a 0.40, se incrementa la relación de Poisson a 0.50, con lo anterior se puede establecer que la relación de Poisson presenta una tendencia a aumentar a 0.50 conforme B aumenta a valores superiores a 0.40.

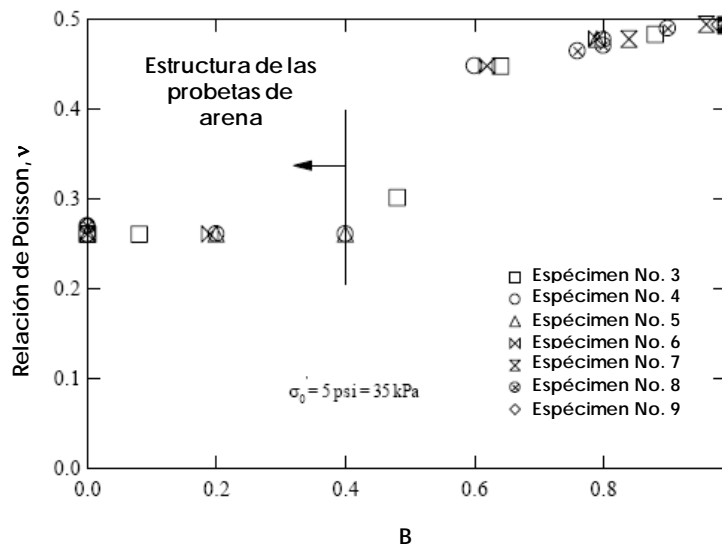


Figura 1.30 Variación de la relación de Poisson con B, en probetas ensayadas en la Cámara triaxial instrumentada, (Valle, 2006)

**Cámara torsional resonante.**

La parte torsional del equipo es usada para ensayar con cargas cíclicas en torsión a las probetas de arena. En este equipo los especímenes son fijados en la parte inferior, mientras que la excitación torsional es aplicada en la parte superior por un sistema electromagnético. Este equipo es mostrado en la figura 1.31

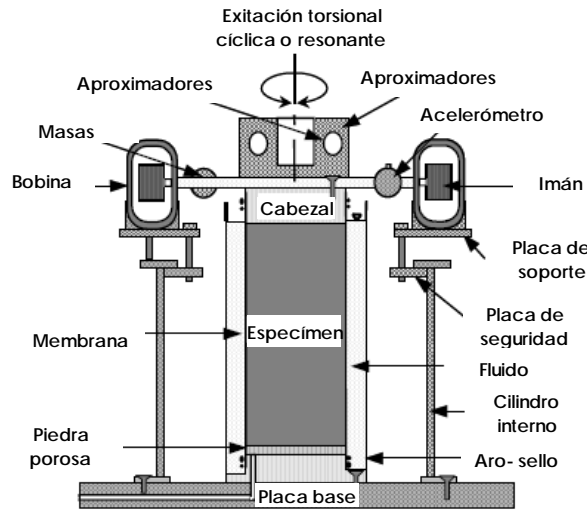


Figura 1.31 Columna combinada resonante y torsional (Stokoe et al. 1994)

Para realizar los ensayos de las probetas de arena en la columna resonante se realizó lo siguiente:

En la configuración, como la mostrada en la Cámara triaxial instrumentada, (figura 1.29), elementos bender y cristales piezoeléctricos fueron montados en el pedestal y en el cabezal de la cámara resonante.

En lo concerniente a la parte torsionante de la cámara, las mediciones de los ensayos fueron realizados empleando elementos bender en la misma probeta de arena.

En la columna torsional resonante se ensayaron dos probetas constituidas con arena en estado seco, nombradas BR1 y BR2 con el objetivo de establecer el efecto de la presión de confinamiento en los valores de las ondas cortantes,  $V_s$ , las propiedades índice y características de las probetas se indican en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Propiedades de los especímenes ensayados en la cámara torsional resonante, (Valle, 2006)

PROBETAS	$\varnothing$ cm	h cm	$\gamma$ T/m <sup>3</sup>	e	Dr %
BR1	6.32	14.22	1.65	0.62	55.00
BR2	6.27	13.60	1.65	0.60	64.00

Con la medición de las velocidades de ondas, el autor determinó la relación de Poisson  $\nu$ , empleando la siguiente expresión 22:

$$\nu = \frac{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2}{1 - \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2} \quad (22)$$

En la figura 1.32 se presentan los valores de  $\nu$  determinados contra el esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , en la cual se observa una tendencia a disminuir la relación de Poisson, conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento, manteniéndose en un rango de 0.28 a 0.18 para un confinamiento de 576 a 8064 psf, respectivamente, ambas probetas presentaron un comportamiento muy similar.

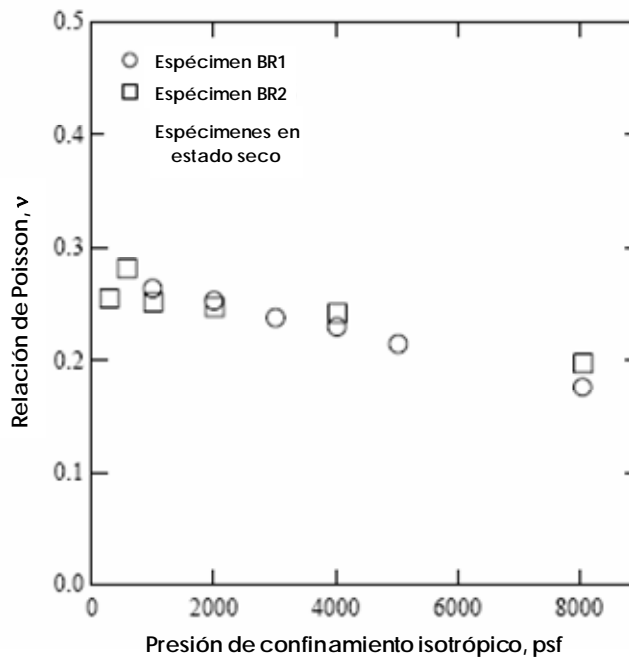


Figura 1.32 Variación de la relación de Poisson con el esfuerzo de confinamiento, en probetas ensayadas en la columna torsional resonante, (Valle, 2006)

Considerando los resultados de los trabajos mencionados se puede establecer lo siguiente:

En relación con la porosidad, Dvorkin y Nur (1996) indican que al aumentar la porosidad, la relación de Poisson aumenta para la arenas, tanto en estado seco como saturado, obtenidos en ensayos triaxiales, (figura 1.24); sin embargo, Salem, 2000, al realizar su investigación empleando refracción sísmica, indica lo contrario, figura 1.15.

Al aumentar el grado de saturación aumenta la relación de Poisson, como se indican en los trabajos de Tsukamoto, *et al.*, (2002), de Gokhan *et al.*, (2001) y de Valle, (2006), obteniendo el primer autor valores de Poisson de 0.25 a 0.40 en la condición seca y 0.50

para la condición saturada, figura 1.21, mientras que el segundo autor reporta valores de Poisson de 0.05 y 0.30 para la condición seca y de 0.40 a 0.50 para la condición saturada, figura 1.22, el tercer autor reporta valores de Poisson de 0.26 para las muestras en estado seco y conforme aumenta el valor de B a valores superiores a 0.40, se incrementa la relación de Poisson a 0.50, figura 1.30.

Considerando la influencia del esfuerzo de confinamiento Chaudhary *et al.*, 2003 reportaron que para las arenas ensayadas en su investigación, la relación de Poisson no se ve afectada significativamente con la variación de este parámetro, presentando valores de Poisson entre 0.10 a 0.30, (figura 1.19); sin embargo, Fawaz, *et al.*, 2002, establecieron que al aumentar el confinamiento implica una disminución de la relación de Poisson y reportaron valores de 0.24 a 0.46, figura 1.25. De igual forma, el trabajo de investigación desarrollado por Valle, 2006, reporta que los valores de la relación de Poisson tienden a disminuir conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento, presentando valores de 0.28 a 0.18 para un confinamiento de 576 a 8,064 psf, respectivamente, (figura 1.32).





**CAPÍTULO 2**  
**DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.**



## 2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

### 2.1 Cámara triaxial cíclica

La cámara triaxial cíclica se utiliza para realizar pruebas dinámicas con aplicación de excitación periódica senoidal, con el fin de generar patrones que simulen los efectos de un sismo; sin embargo, las deformaciones que se generan durante el ensaye comprenden un rango muy amplio de distorsiones angulares, es por esto que para poder abarcar dicho rango de deformación en los ensayos de laboratorio es necesario el uso de diversos equipos dinámicos, aunados a la cámara triaxial cíclica, como son: la columna resonante, el aparato de corte simple o la mesa vibradora.

El ensaye en la cámara triaxial cíclica tiene como finalidad investigar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia al esfuerzo cortante de un espécimen cilíndrico de suelo, sometido a esfuerzos isótropos o anisótropos y esfuerzos desviadores axiales con variación periódica senoidal.

En términos generales, se puede señalar que con esta prueba se obtienen registros continuos de la variación de la carga axial aplicada, la deformación axial producida, y de la presión de poro generada cuando el ensaye requiere de la consolidación de la probeta.

A partir de los datos de ensaye también se pueden obtener, entre otros, los parámetros de licuación de un suelo granular y los parámetros para los modelos de degradación de suelos.

### 2.2 Descripción del equipo triaxial MTS

Para la ejecución de las pruebas presentadas en esta tesis se utilizó una cámara triaxial cíclica automatizada (Flores, O., Rosas, E., Romo, M. P., y Flores, R., 2002) dicha cámara (Figura 2.1) puede ser utilizada para realizar ensayos tanto estáticos como dinámicos, mediante la aplicación de carga o desplazamientos controlados, en muestras con las siguientes dimensiones: Diámetro de 10.14 ó 15.20 cm y altura de 26 cm en ambos casos.

El equipo está constituido por los siguientes elementos:

- La cámara triaxial.
- El panel de control.
- El sistema hidráulico (servomecanismo), que permite la aplicación de la carga axial a la probeta.
- Un sistema automatizado para el control, captura de datos y procesamiento de las señales obtenidas en el ensaye.

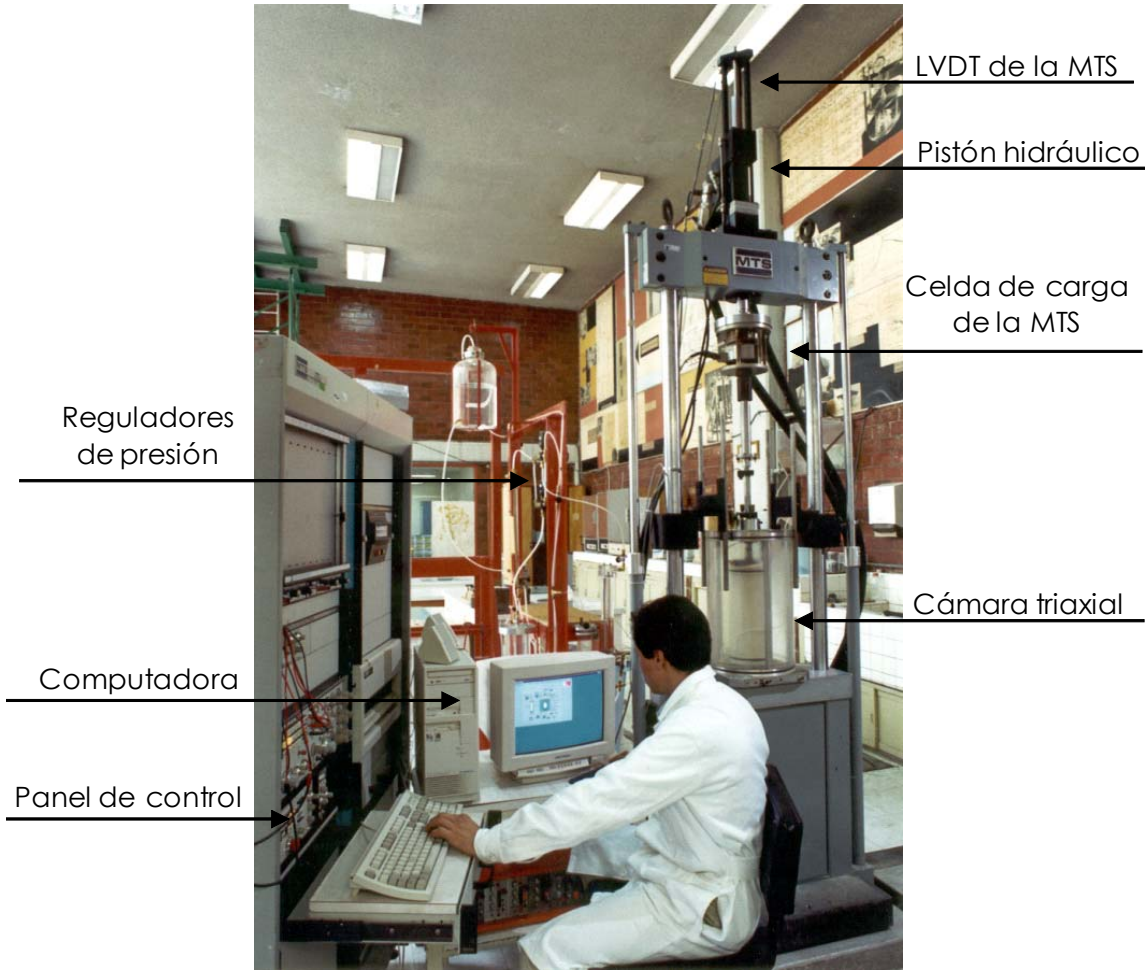


Figura 2.1 Cámara triaxial cíclica MTS, (Flores, 2009)

### 2.3 Sistema hidráulico (servomecanismo)

Este sistema es el que permite la aplicación de la carga axial a las probetas en el momento del ensaye, por medio de un sistema hidráulico que trabaja con aceite a presión. Este sistema está formado principalmente por una bomba que abastece de aceite a dos acumuladores, y se conectan por medio de mangueras a la servoválvula hidráulica ubicada sobre el marco de carga del sistema. El conjunto de estos tres elementos forma un circuito cerrado de presión en donde el aceite circula por una de las mangueras para aplicar la presión al pistón, y se libera por otra de las mangueras al retirar la carga, (Figura 2.2).



Figura 2.2 Sistema hidráulico para aplicar presión al pistón del equipo

La bomba tiene una capacidad para aplicar una presión de 3,500 lb/in<sup>2</sup>, para hacer que el vástago tenga movimiento y deforme la probeta.

## 2.4 Panel de control

Dependiendo de los requerimientos del ensaye, el equipo se puede operar en las condiciones de carga o desplazamiento controlado. El equipo puede trabajar a distintos porcentajes de trabajo (10, 20, 50 ó 100%), en relación al valor máximo del sensor de carga instalado en el equipo (500.0 kg), y de desplazamiento si es controlado con el LVTD de la cámara MTS, ó de 5 cm cuando se utiliza el LVDT colocado en la tapa de la cámara.

A través de este panel (Figura 2.3) se controla la posición del cabezal superior, CS, durante el montaje de la probeta, se ajusta la ganancia del sistema para el modo de trabajo en carga o desplazamiento controlado.

Antes de indicar la excitación que aplicará el equipo, se señalan los límites de trabajo, tanto para carga como para desplazamiento, cuando estos valores se rebasen, en el panel se ilumina uno de los botones. Definir estos límites se hace como una medida de seguridad para garantizar el buen funcionamiento de los otros sensores. En el panel de control los cambios se realizan manualmente, en su mayoría antes de montar la probeta.



Figura 2.3 Panel de control

## 2.5 Sistema automatizado, control y procesamiento de datos

Este sistema se conforma por el equipo triaxial MTS, una computadora personal en la que fue instalada una tarjeta de adquisición de datos, así como un conjunto de sensores, de acuerdo a los requerimientos del ensaye. Este sistema permite diseñar y ejecutar cuatro diferentes tipos de pruebas, (Flores, O., Rosas, E., Romo, M. P., y Flores, R., 2002):

- a) *Prueba estática.* Aplica un patrón de carga en rampa; es decir, carga o desplazamiento a una velocidad de aplicación constante, con el tiempo de duración, valor 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-extensión (en los porcentajes requeridos), sólo compresión o sólo extensión.
- c) *Prueba con patrón dinámico arbitrario.* Con este módulo se diseña una prueba con las siguientes señales: valor constante, rampa, senoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra, o las combinaciones de éstas. Además, se definen las características de frecuencia, número de ciclos y amplitud que se quieran.
- d) *Desplazagrama.* Permite cargar un archivo de un acelerograma, carga en pantalla todas las características del sismo y permite seleccionar 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 reproduce en el equipo triaxial MTS.

## 2.6 Instrumentación del equipo

Los sensores instalados actualmente en la cámara triaxial MTS son los siguientes:

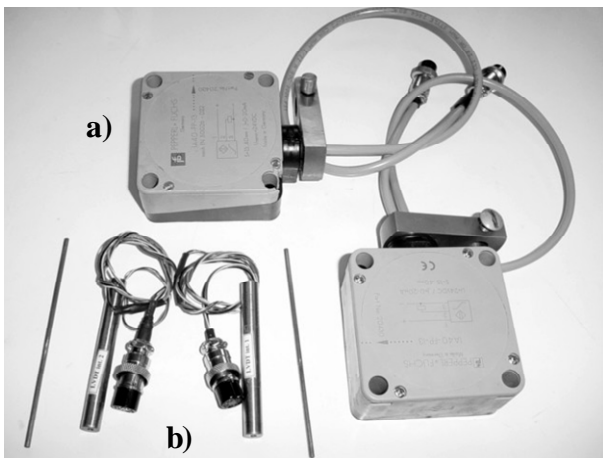
- ✓ Un sensor para medir desplazamiento axial (extensómetro) fuera de la cámara (LVDT original de la MTS), con una carrera de 150 mm.
- ✓ Un sensor de desplazamiento axial con una carrera de 50 mm, colocado en la tapa de la cámara triaxial MTS.
- ✓ Un sensor de desplazamiento axial externo, con un intervalo de medición de 20 mm, colocado en la tapa de la cámara triaxial.
- ✓ Dos sensores de desplazamiento axial (LVDT's) dentro de la cámara, que miden los desplazamientos axiales en los tercios medios de la probeta
- ✓ Dos sensores para medir el desplazamiento radial de la probeta, en el tercio medio.
- ✓ Una celda de carga externa, para medir la carga aplicada.
- ✓ Dos celdas de presión para medir el exceso de presión de poro,  $U$ , en la base y altura media de la probeta, así como para registrar las presiones de confinamiento y contrapresión.
- ✓ Una celda de carga sumergible, ubicada en la base de la cámara, donde se coloca la muestra al realizar el ensaye.
- ✓ Dos acelerómetros colocados en el interior o exterior de la probeta.
- ✓ Una celda de presión diferencial para medir el volumen de agua expulsada, cuando la prueba es drenada,  $\Delta V$ .

En la tabla 2.1 se indican las características de los sensores instalados en el equipo triaxial cíclico.

La instalación tanto de la celda de carga sumergible como del LVDT externo se hicieron con la finalidad de obtener mejores registros en las señales de carga y desplazamientos axiales para esfuerzos y desplazamientos pequeños, (Figura 2.4).

Tabla 2.1 Sensores instalados en el equipo triaxial MTS

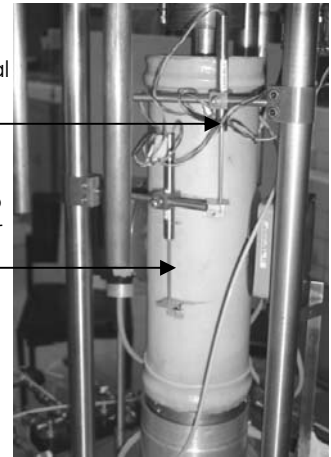
SENSOR	CANTIDAD	PARÁMETRO POR MEDIR	UNIDADES	INTERVALO DE MEDICIÓN
LVDT	1	Desplazamiento axial	mm	-75 mm a 75 mm
LVDT	1	Desplazamiento axial	mm	-25 mm a 25 mm
LVDT	1	Desplazamiento axial	mm	-10 mm a 10 mm
LVDT	2	Desplazamiento axial	mm	-5 mm a 5 mm
Sensor magnético	2	Desplazamiento radial	mm	0 a 25 mm
Celda de carga	1	Carga interna en cámara	kg	0 a 500 kg
Celda de carga	1	Carga exterior en cámara	kg	0 a 500 kg
Celda de carga	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



a) Sensores de desplazamiento radial  
 b) Sensores de desplazamiento axial

Sensores de desplazamiento axial en el tercio medio superior TMS

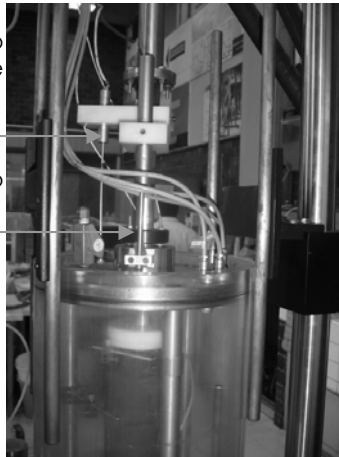
Sensores de desplazamiento axial en el tercio medio inferior TMI



Sensores de desplazamiento axial

Sensor de desplazamiento axial externo 20 mm de carrera.

Sensor de desplazamiento axial 50 mm de carrera.

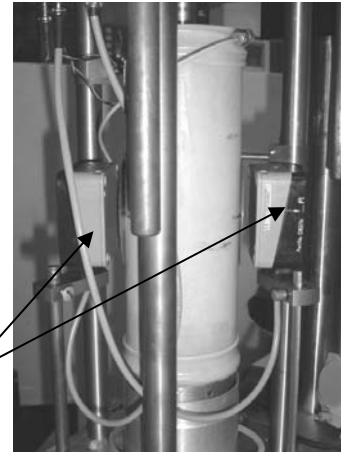


Sensores de desplazamiento axial en el cabezal superior



Sensores de presión

Sensores de desplazamiento radial, (0 a 25 mm).



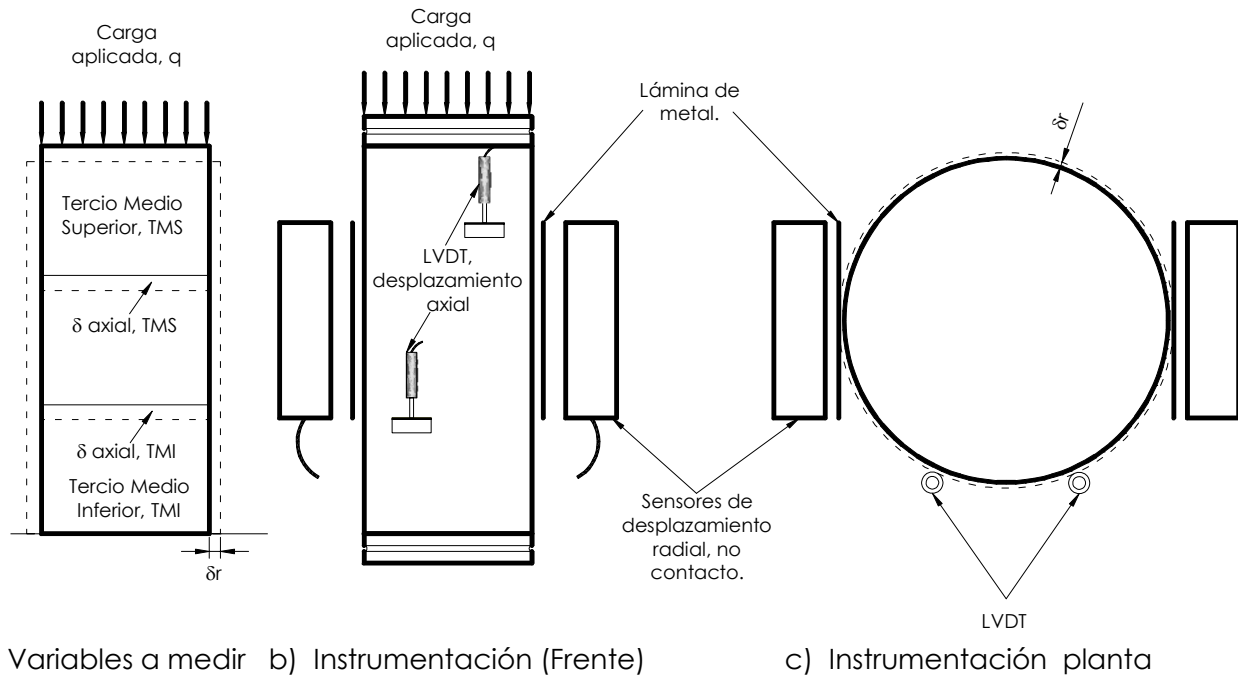
Sensor de desplazamiento radial en el tercio central

Figura 2.4 Sensores utilizados en la cámara triaxial cíclica MTS



Algunos de estos instrumentos de medición se presentan esquemáticamente en la figura 2.5, incluyendo su colocación dentro de la cámara y las variables a medir.

Estos sensores se conectan al panel de control de la cámara MTS y éste a su vez está conectado a una computadora personal, que es donde se lleva a cabo la adquisición de datos durante el ensaye.



a) Variables a medir    b) Instrumentación (Frente)    c) Instrumentación planta

Figura 2.5 Instrumentación de la probeta



**CAPÍTULO 3**

**MATERIAL Y  
PROCEDIMIENTO DE ENSAYE**



### 3. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

#### 3.1 Descripción del material

Los ensayes realizados se hicieron con dos materiales granulares:

Las Charcas, SM-Arena limosa y La Parota, SP-Arena mal graduada (Tabla 3.1, figura 3.1), cuyas densidades relativas de sólidos son 3.02 y 2.69, respectivamente.

El material de Las Charcas es un residuo minero, producto de la trituración de minerales en una mina de la ciudad de San Luis Potosí, México, con aristas predominantemente angulosas; el segundo es un material aluvial extraído de un banco de materiales para la construcción de la presa La Parota, de forma redondeada a subredondeada del estado de Guerrero, México.

Tabla 3.1 Granulometrías de los materiales ensayados

Las Charcas, SLP				La Parota, Gro.			
Malla número	Abertura malla <i>mm</i>	Peso retenido <i>g</i>	Retenido %	Pasa %	Peso retenido <i>g</i>	Retenido %	Pasa %
1/2"	12.700						
3/8"	9.525						
1/4"	6.350						
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	g	Suma=		3000.00	g

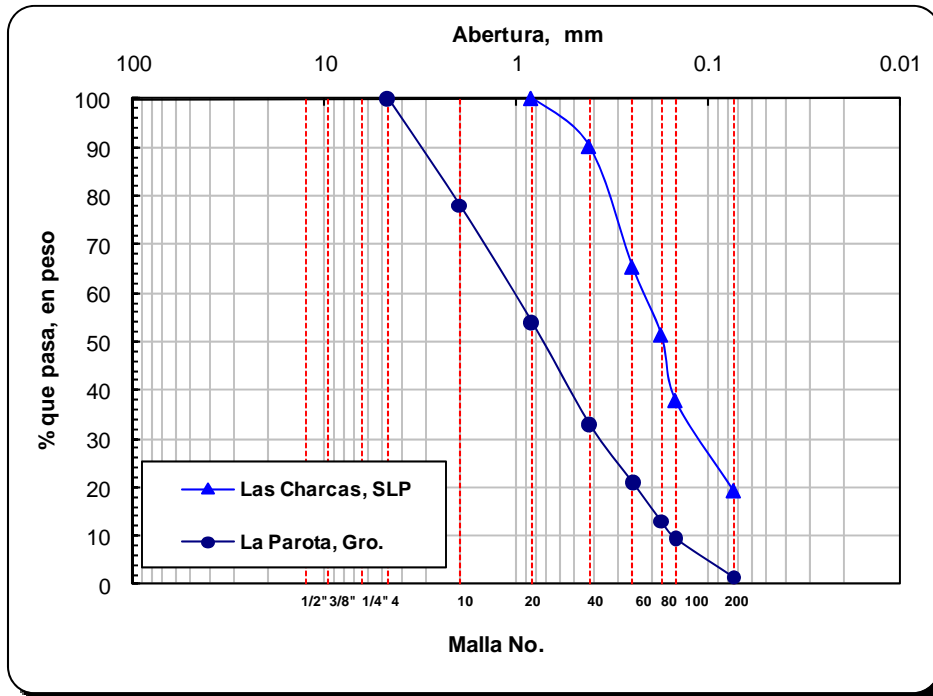


Figura 3.1 Granulometrías de los materiales ensayados

### 3.2 Formación de las muestras

Se adoptó un método de formación de probetas (Flores, 1996) que consiste en formar el espécimen en diez capas de igual espesor, aplicando carga estática con un pisón de diámetro igual al radio del molde, con una secuencia de apisonado para cada capa como la que se muestra en la figura 3.2.

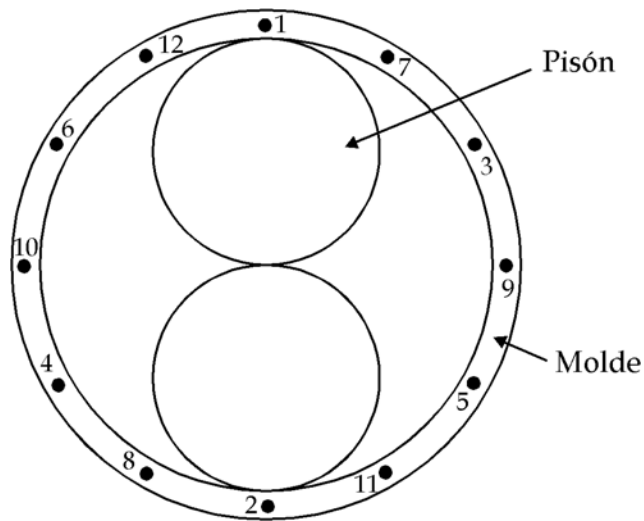


Figura 3.2 Secuencia de apisonado, (Flores, 1996)

Siguiendo el método de compactación antes descrito se procede a realizar lo siguiente:

- Se coloca el pedestal en una base cilíndrica de madera, acto seguido se coloca una membrana de látex y se afianza ésta al pedestal, con un arosello.
- Se coloca un molde cilíndrico partido, afianzado al pedestal; este molde está dividido longitudinalmente en dos partes, las cuales se unen con la ayuda de tres abrazaderas (Figura 3.3), para esto es necesario colocar una pasta selladora en los bordes del molde.

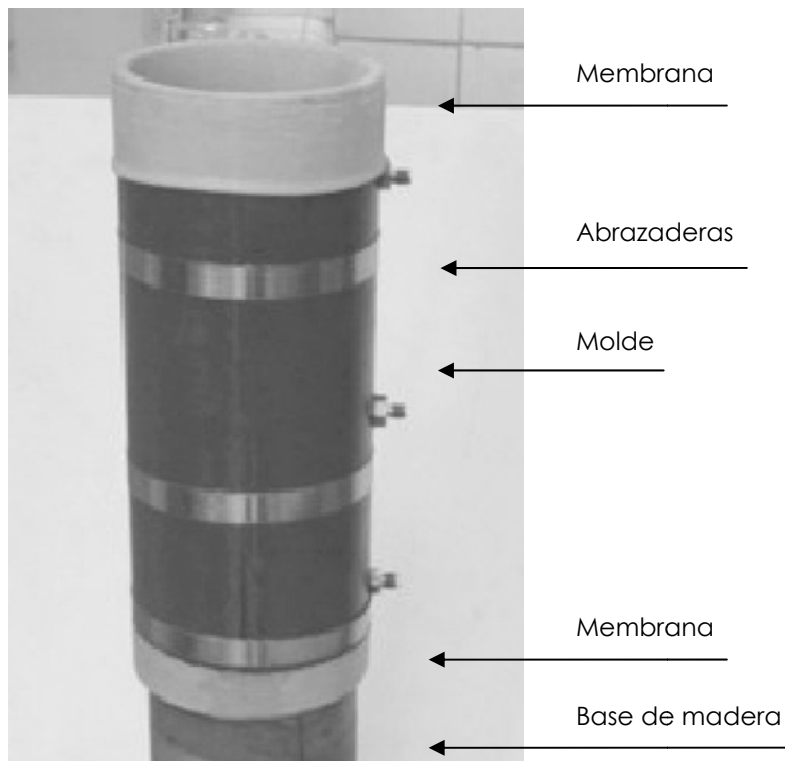


Figura 3.3 Colocación del molde

- Después se aplica vacío para que la membrana se adhiera al interior del molde (Figura 3.4)

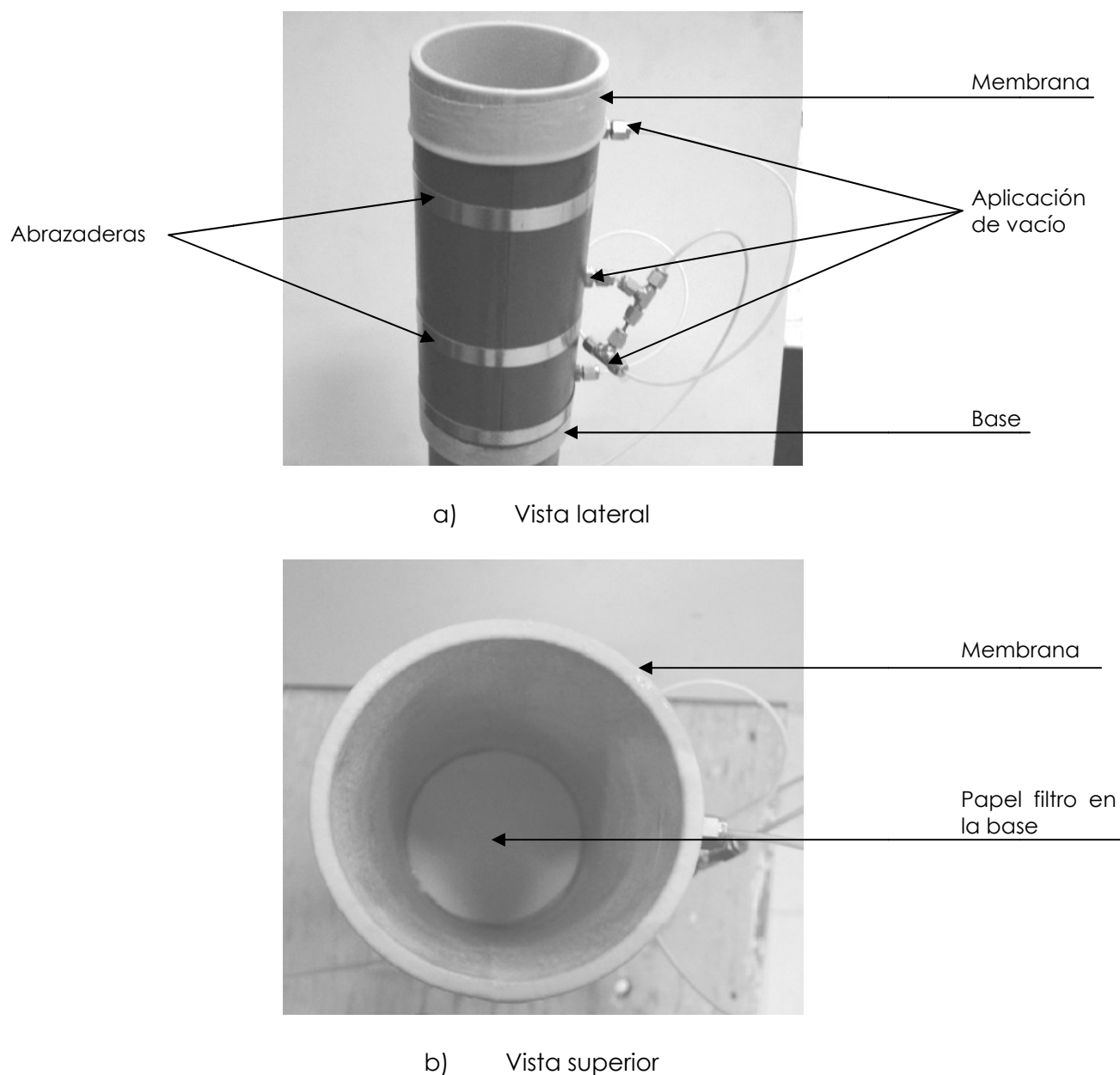


Figura 3.4 Aplicación del vacío

- Una vez que se asegura que no existe fuga del vacío en el molde, se coloca un papel filtro sobre el pedestal, para evitar que el material obstruya los drenes de saturación. Una vez realizado esto, se procede a vaciar el material previamente pesado para formar la primera capa y se distribuye uniformemente con la ayuda de la espátula.
- Se compacta el material con la ayuda del pisón en las 12 posiciones anteriormente mencionadas, este proceso se repite en cada una de las diez capas (Figura 3.5). Antes de compactar la última capa se coloca una extensión para lograr que el material se compacte correctamente; una vez realizado esto se enrasa el material en su parte superior para darle la altura requerida.



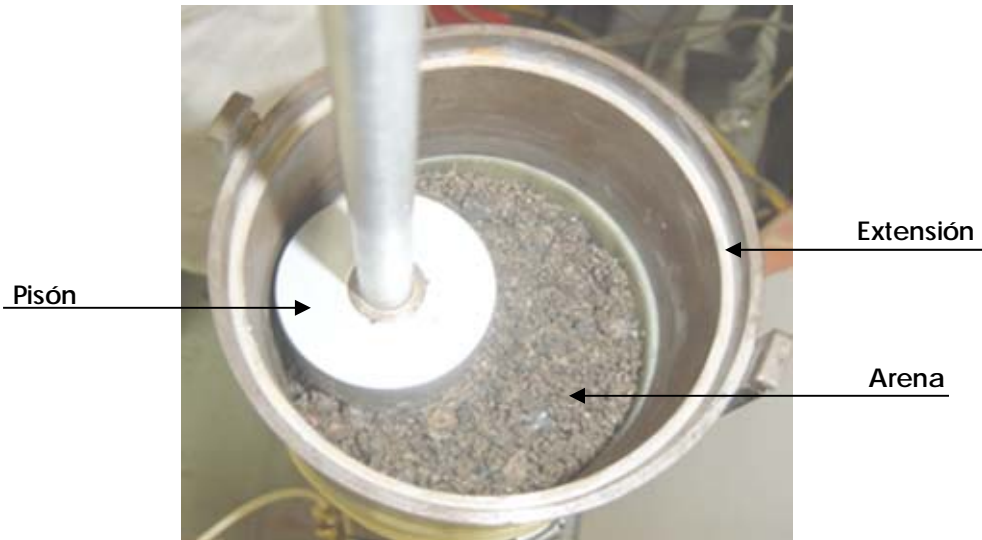


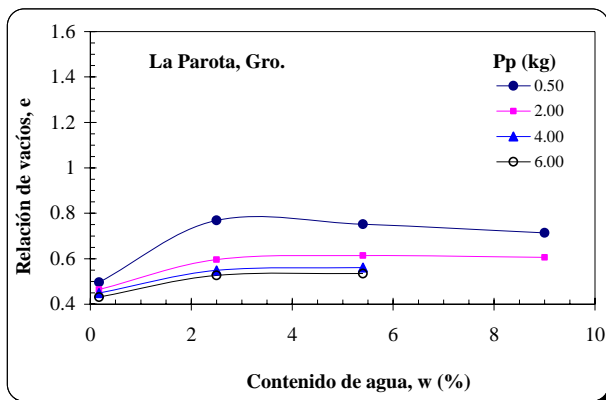
Figura 3.5 Proceso de formación de la probeta por compactación

### 3.3 Relación de vacíos de la probeta

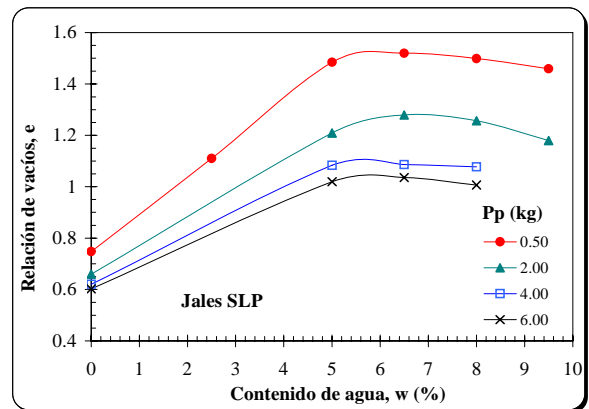
Para poder determinar la relación de vacíos máxima y mínima de los materiales al ser compactados, se elaboraron las gráficas que aparecen en la figura 3.6, variando los pesos de pisón (0.5, 2.0, 4.0, y 6.0 kg), y el contenido de agua (de 0 a 9%).

Los resultados de compactación de La Parota se indican en la figura 3.6a, cuyos valores de  $e_{m\acute{a}x.}$  y  $e_{m\acute{i}n.}$  son de 0.8 y 0.42, respectivamente.

En la figura 3.6b se observan los valores obtenidos para la compactación del material de Los Jales, cuyos valores de  $e_{m\acute{a}x.}$  y  $e_{m\acute{i}n.}$  son de 1.55 y 0.60, respectivamente.



a) La Parota



b) Los Jales

Figura 3.6 Curvas de compactación de los materiales ensayados

### 3.4 Montaje

Debido a las características propias de la cámara triaxial (Capítulo 2), es necesario encender el servomecanismo antes de la colocación de la probeta dentro de la cámara y liberar el cabezal de su soporte para dar espacio a la colocación de la probeta. Durante el proceso de colocación de la probeta en la cámara se maneja el equipo en presión baja, suficiente para permitirnos ajustar la posición del cabezal desde el panel de control. En el equipo de cómputo se abre el programa que controla y registra la señal de todos los sensores instalados y se monitorea permanentemente la respuesta de cada uno de ellos.

Se coloca la probeta dentro de la cámara, ajustando el pedestal a la base de la cámara por medio de tres tornillos opresores, figura 3.7, hasta que ésta quede bien ajustada y no exista posibilidad de que se desplace o sufra algún movimiento. Es necesario colocar en el cabezal un papel poroso para evitar la contaminación de los drenes del cabezal con material.

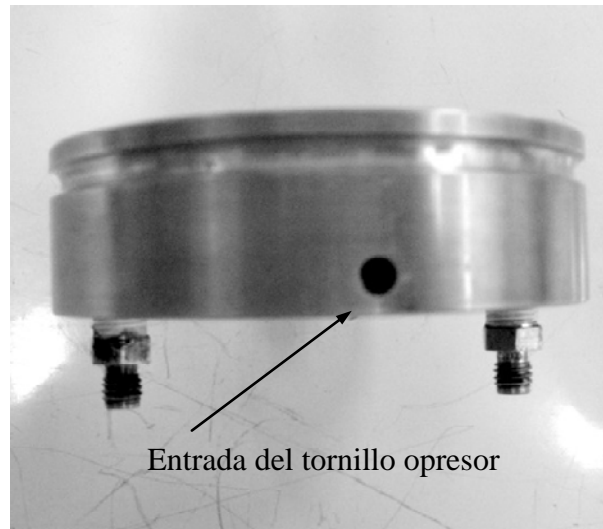


Figura 3.7 Pedestal (perfil)

- Por medio del panel de control se baja el cabezal hasta que tenga contacto con la parte superior de la probeta y se tenga una lectura de carga de 10 kg ( $0.125 \text{ kg/cm}^2$ ). Se levanta la membrana hasta cubrir el cabezal y se coloca un arosello, (Figura 3.8)

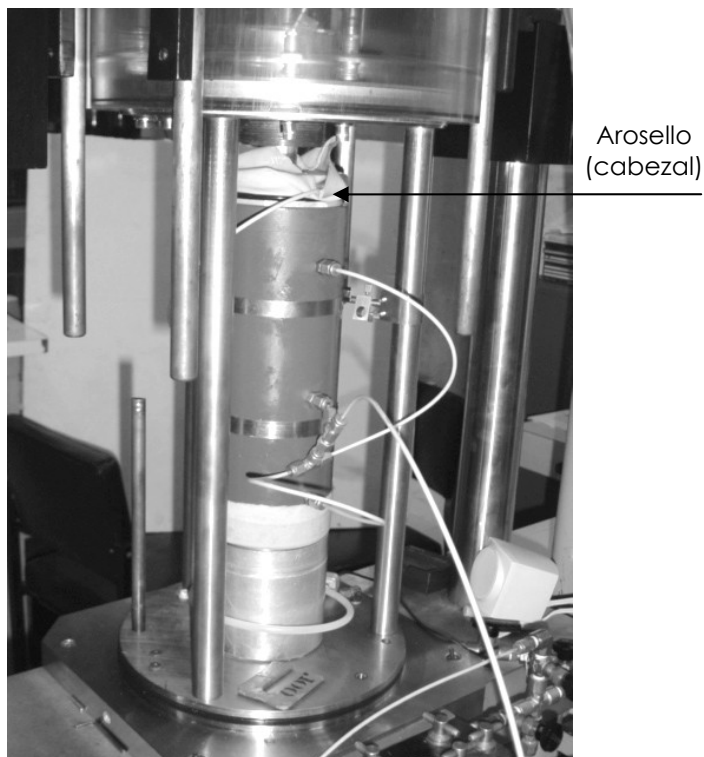


Figura 3.8 Probeta montada con molde

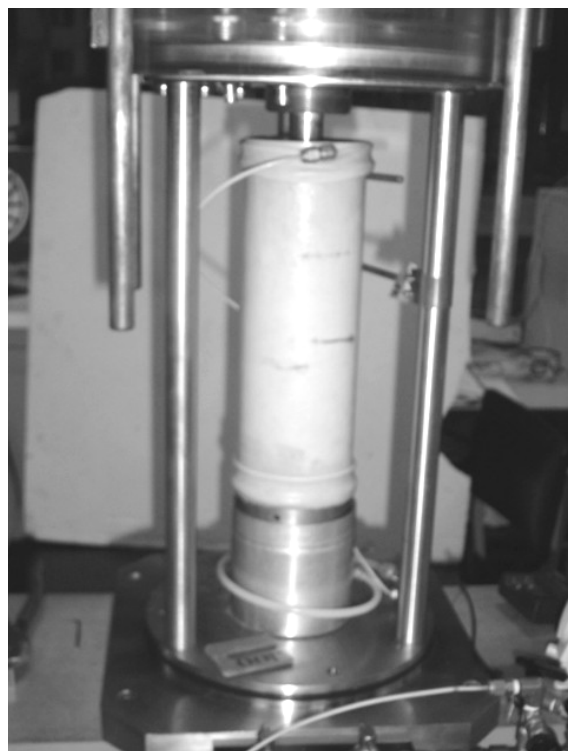


Figura 3.9 Cambio de vacío, probeta sin molde

- Se procede a aplicar vacío de  $0.15 \text{ kg/cm}^2$  al interior de la muestra, con el fin de garantizar la estabilidad de ésta al retirar el molde. Una vez retirado éste, se toman las dimensiones de la probeta, altura y diámetro en la parte superior, media e inferior (Figura 3.9).
- A continuación se colocan los sensores de desplazamiento radiales (Figura 3.10a) y 2 sensores axiales figura 3.10b. Los sensores radiales se colocan al tercio medio de la longitud de la probeta, y los sensores axiales se colocan en los tercios medio superior, TMS, e inferior, TMI.

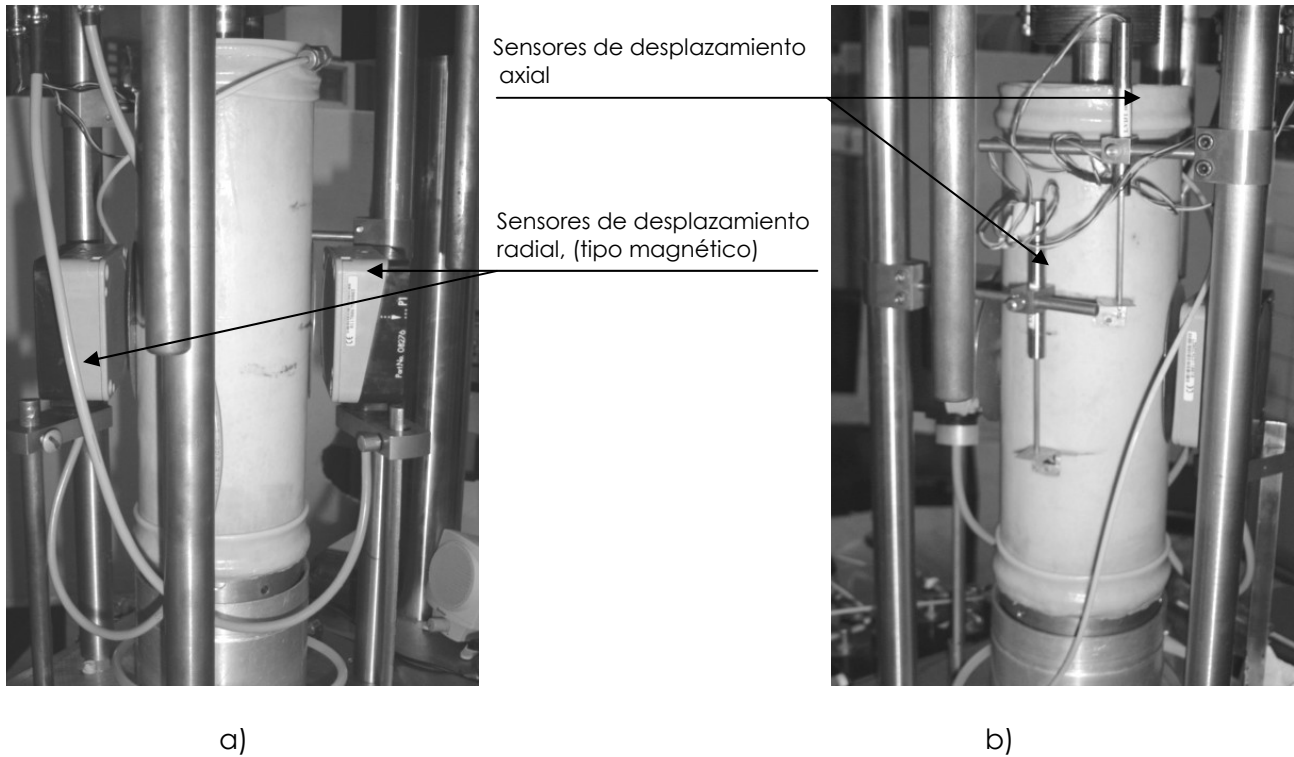


Figura 3.10 Colocación de los sensores radiales de no contacto (a), y axiales LVDT (b)

### 3.5 Colocación de los instrumentos

Los sensores de desplazamiento radial van conectados directamente a la tarjeta de adquisición de datos. Para los sensores de desplazamiento radial es necesario colocar a los costados de la probeta, frente a cada sensor, una lámina de latón circular que se adhiere a la membrana por medio de un punto de silicón. Los sensores van colocados en el tercio central de la probeta a 180° uno del otro.

Los sensores de desplazamiento axial de los tercios medios se colocan en un aditamento fabricado especialmente con esta finalidad, que consta básicamente de unas pequeñas barras que los sostienen, de tal manera que se puede variar el punto donde se quiera registrar el desplazamiento de la probeta. Se adhieren un par de laminillas en forma de "L" en los extremos del tercio medio de la probeta y sobre éstas hacen contacto los vástagos de los sensores.

Los instrumentos de medición que se instalan se pueden ver en la figura 3.10, donde se muestran los sensores de deformación axial (LVDT). La celda de carga sumergible se muestra en la figura 3.11.

El equipo también cuenta con un LVDT y una celda de carga, externas con los que se controla el equipo.



Figura 3.11 Celda de carga sumergible

Todas las señales son registradas en tiempo real y las correspondientes de carga, deformación, presión de poro y confinamiento se pueden visualizar como registros continuos, directamente en la pantalla en cualquier momento. Las señales de deformación radial y axial en los extremos del tercio medio se visualizan durante el ensaye. En todos los casos las señales generadas durante la prueba son grabadas en un archivo electrónico que permite desplegar las señales en pantalla, imprimirlas e incluso generar un archivo electrónico en formato de texto (\*.txt), que nos permita un análisis posterior de la información.

### 3.6 Ensaye de la muestra

En este tipo de pruebas es posible observar en tiempo real el comportamiento del suelo por medio de los ciclos de histéresis, ciclo a ciclo. De esta manera se puede determinar claramente cuándo se comienza a tener un comportamiento no lineal del material. Con los registros de deformación axial en los tercios medios y deformación radial obtenidos en la prueba cíclica se determinará la relación de Poisson.

Para realizar el ensaye de las probetas formadas es necesario hacer uso del programa "OPERACIÓN", el cual fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, éste es un módulo que 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 3.12). Los siguientes gráficos aparecen en la pantalla con ambiente

Windows a color, sólo que se presentan en blanco y negro para darle claridad a la impresión, para mayor información se puede consultar Flores, *et al.*, 2002.

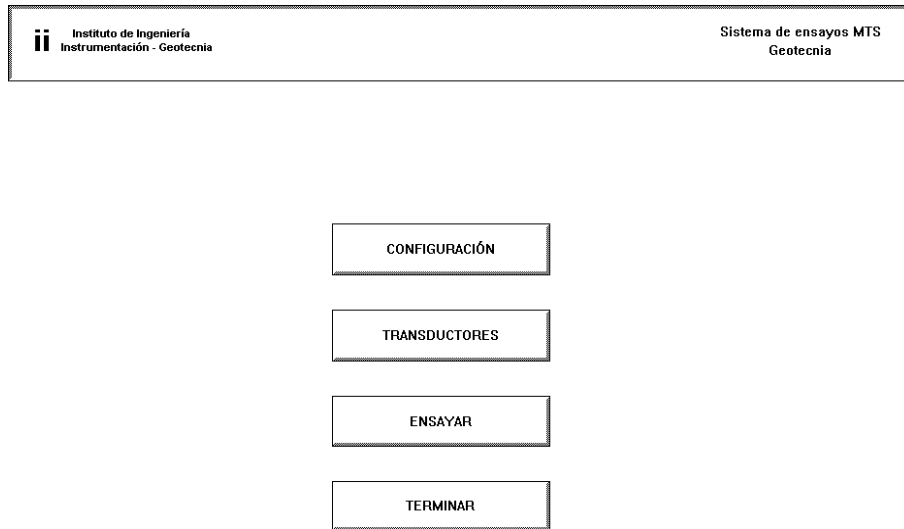


Figura 3.12 Pantalla principal del módulo de OPERACIÓN, (Flores, *et al.*, 2002)

Los ensayos que se realizaron son a desplazamiento controlado; su proceso de ensaye es el siguiente:

- Una vez colocados los sensores, se ajustan los valores iniciales de lectura, dichos valores se visualizan en la pantalla de "Transductores", figura 3.13

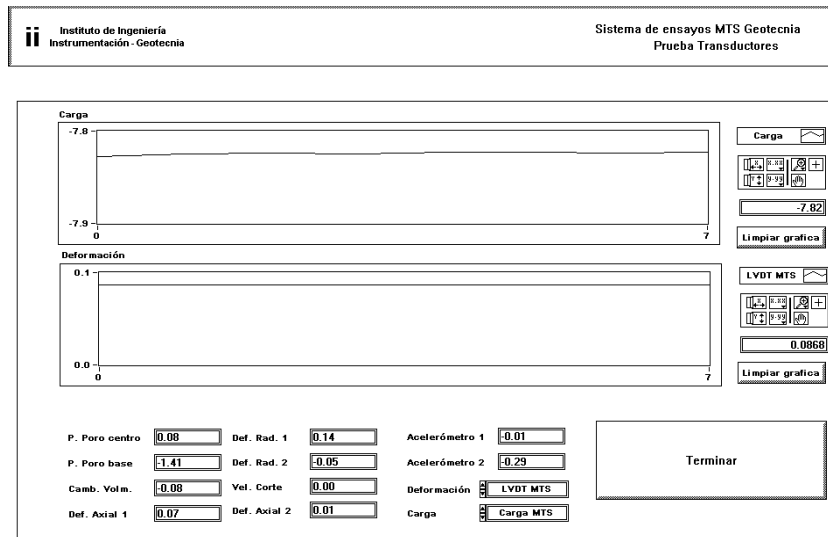


Figura 3.13 Monitoreo de los sensores para el ajuste a sus valores de inicio de lectura, (Flores, *et al.*, 2002)

Los valores iniciales de los sensores se determinaron de acuerdo a la calibración de los mismos, los valores que estos registran son en mm; para los sensores radiales el valor inicial debe ser cercano a 6 mm y para los axiales cercano a 0 mm.

- Una vez ajustados los sensores a sus valores iniciales, se baja la camisa de acrílico, (Figura. 3.14) para posteriormente aplicar la presión de confinamiento a la que estará sujeta la probeta. Las presiones de confinamiento para estos ensayos serán de 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>; la presión de confinamiento se aplica con los reguladores de presión, (ver figura 3.15) y se monitorea de igual forma en la pantalla de "Transductores", (Figura 3.13), luego se retira el vacío para que únicamente este actuando en la probeta el esfuerzo aplicado, que será el esfuerzo efectivo. En las pruebas realizadas en este trabajo, la cámara no se llenó de agua antes de aplicar la presión de confinamiento, debido a que los sensores colocados en el interior de la cámara no son sumergibles.

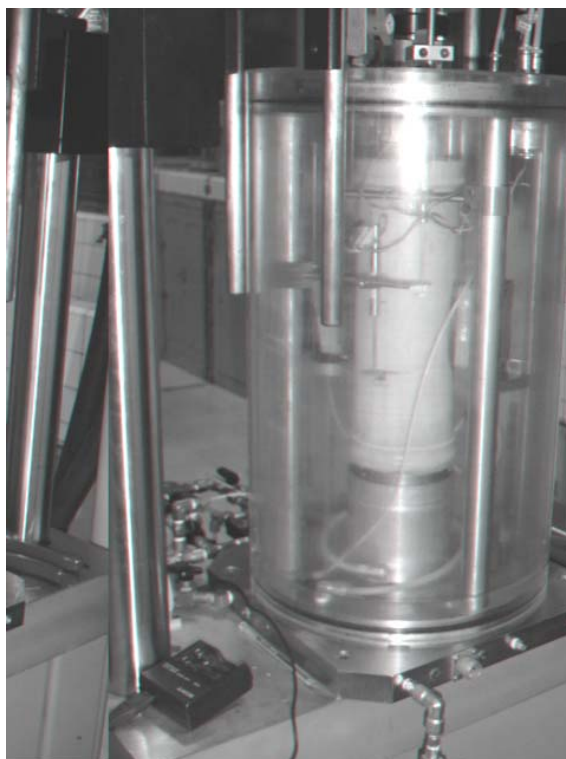


Figura 3.14 Probeta montada con sensores de desplazamiento axial y radial, sometida a un valor de confinamiento

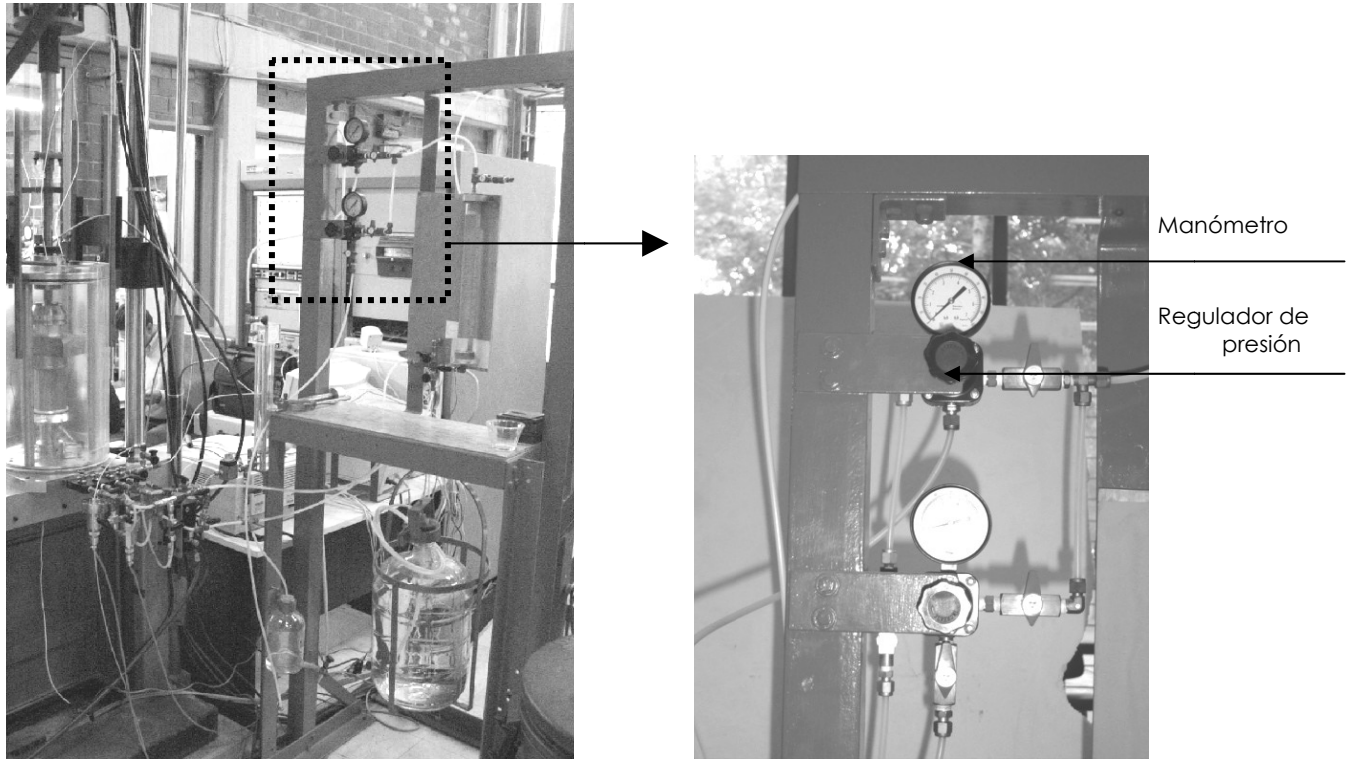


Figura 3.15 Reguladores para controlar presión de confinamiento

En la pantalla de “ENSAYAR” se selecciona el vector de *desplazamiento - tiempo* que vayamos a aplicar, esto se hace habilitando alguna de las opciones que aparecen en la pantalla de la figura 3.16. Es posible realizar la configuración de la prueba, permite recuperar una señal prediseñada o bien diseñar un patrón 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.

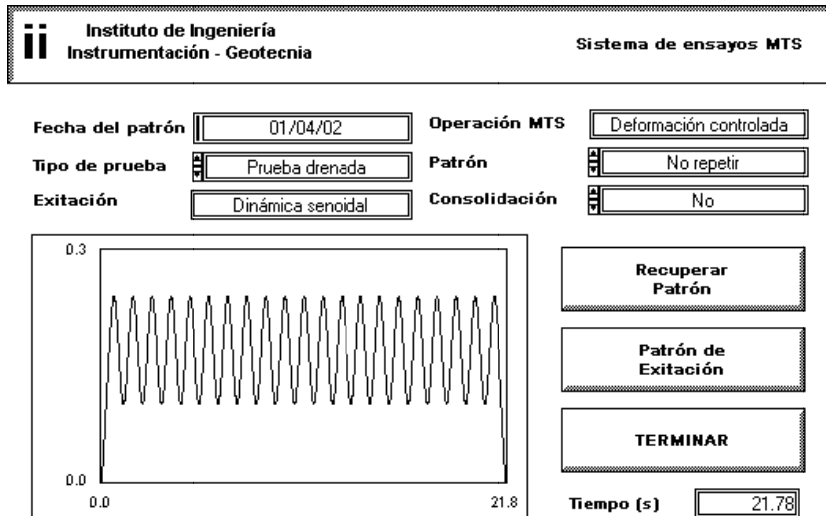


Figura 3.16 Selección del patrón de desplazamiento a utilizar, (Flores, *et al.*, 2002)



En las pruebas que se ejecutaron para esta investigación se aplicaron desplazamientos dinámicos axiales que van del orden de 0.05 a 1 mm de semi-amplitud, (SA) con incrementos de 0.05 mm, con una frecuencia de 1hz, (f) y 20 ciclos (Figuras 3.16 y 3.17).

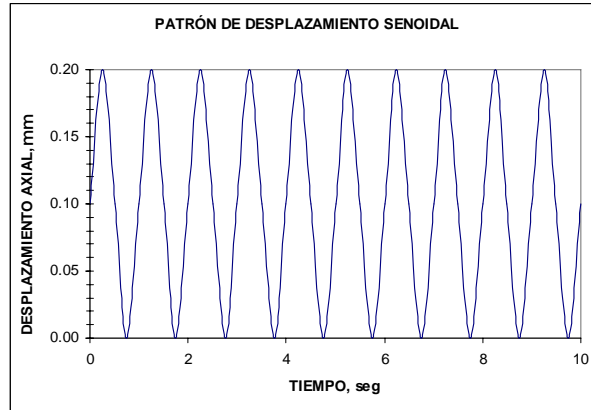


Figura 3.17 Señal de desplazamiento cíclico, con una amplitud de 0.20 mm, con 10 ciclos, (N)

- Una vez seleccionado el patrón de desplazamiento a aplicar, se procede a seleccionar la opción de ensayar en la pantalla de OPERACIÓN que aparece en la figura 3.12. El criterio para definir este patrón de desplazamiento fue el de aplicar semi-amplitudes pequeñas y con esto generar deformaciones unitarias axiales pequeñas del orden de 0.02 a 0.38 %, así como obtener una serie de lecturas para analizar los registros de un número de ciclo intermedio que en este caso fue el ciclo número 10, considerándolo representativo del ensaye.
- Posteriormente aparece una pantalla en la que se pide corroborar al equipo los porcentajes de trabajo definidos previamente en el panel de control, de acuerdo a la señal de excitación. En caso de que el patrón de prueba diseñado requiera utilizar un porcentaje de trabajo mayor al que se definió en el panel de control, en esta pantalla se genera un mensaje de error que indica que se debe aumentar este porcentaje de trabajo o diseñar un patrón con una amplitud menor (Figura 3.18).

**Seleccione el intervalo de operación de la máquina y fíjelo así como el *SPAN* y el modo de operación indicado en esta pantalla en la consola del sistema MTS**

Intervalo Carga	Intervalo Def.
100 % Intervalo del 500.0 / -500.0kg ▲	100 % Intervalo del 18.0 / -18.0mm ▲
50 % Intervalo del 250.0 / -250.0kg	50 % Intervalo del 18.0 / -18.0mm
20 % Intervalo del 100.0 / -100.0kg	20 % Intervalo del 6.0 / -6.0mm
10 % Intervalo del 50.0 / -50.0kg ▼	10 % Intervalo del 3.0 / -3.0mm ▼

**Span** 6.70      **Modo** Deformación Controlada

**CONTINUAR**

Figura 3.18 Definición del porcentaje de trabajo del equipo, (Flores, *et al.*, 2002)

- Luego de definir los porcentajes de trabajo, aparece una pantalla en la que se ingresan las dimensiones de la probeta, las condiciones de esfuerzo y se señala, si se desea, un comentario referente al ensaye. Se da, además, el nombre del ensaye y la dirección donde se desea guardar los archivos que se generen.
- Finalmente, para dar inicio al ensaye de la probeta, aparece una pantalla, que incluyen cinco gráficos, cuatro del lado izquierdo y uno al lado derecho (Figura 3.19). De los cuatro gráficos, en los primeros dos se pueden ver las señales de carga, desplazamiento vs tiempo y en los otros dos se puede seleccionar cualquiera de los sensores que se quiera visualizar. En la pantalla de la derecha aparece el gráfico de carga vs desplazamiento; si la prueba es dinámica senoidal, en esta pantalla aparece cada uno de los ciclos de histéresis; finalmente, se habilita la opción de inicio, para aplicar el vector de desplazamiento previamente diseñado.

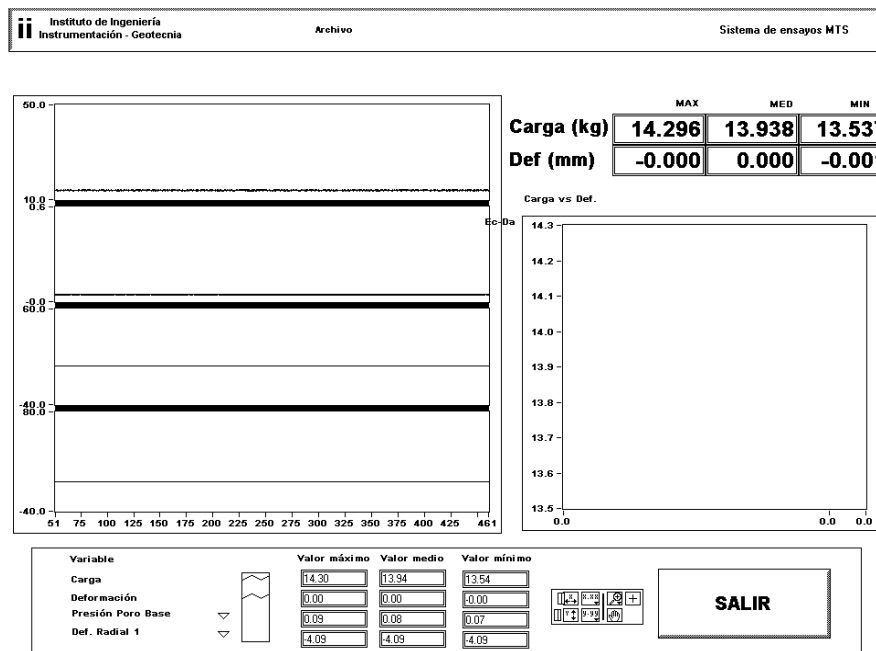


Figura 3.19 Ejecución del patrón de excitación diseñado, (Flores, *et al.*, 2002)

Se ejecuta el ensaye y se visualiza en tiempo real las lecturas de cada sensor. Los resultados quedan registrados en archivos electrónicos de datos (\*.txt), compatibles con hojas de cálculo, por ejemplo excel.

### 3.7 Cálculo de parámetros

#### Relación de Poisson

El término  $\nu$  se denomina Relación de Poisson, en honor al matemático, geómetra y físico francés Siméon-Denis Poisson, quien expresó el concepto en 1828, el cual lo define como el cociente que existe de la deformación unitaria radial o transversal, entre la deformación unitaria axial, al aplicar una fuerza o acción a un cuerpo, ecuación 16.

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (16)$$

Donde:

- $\varepsilon_r$  = Deformación unitaria radial,  $\varepsilon_r = \delta_r / r_0$ , en mm/mm
- $\varepsilon_a$  = Deformación unitaria axial,  $\varepsilon_a = \delta_a / H_0$ , en mm/mm
- $\delta_r$  = Desplazamiento radial
- $\delta_a$  = Desplazamiento axial
- $r_0$  = Radio inicial de la probeta
- $H_0$  = Longitud de la probeta de suelo
- $\nu$  = Relación de Poisson.

Para el análisis de esta relación se consideró el promedio de los desplazamientos axiales que se generan de las señales obtenidas del tercio medio superior (TMS), y del tercio medio inferior (TMI), como se muestra en la figura 3.20. El desplazamiento radial se obtiene haciendo el promedio de las señales de los desplazamientos radiales  $R_1$  y  $R_2$ , como se muestra en la figura 3.21

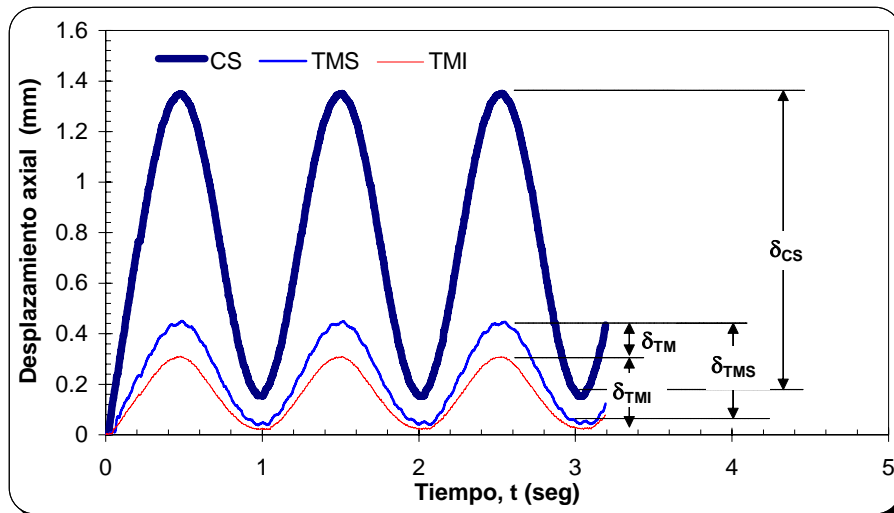


Figura 3.20 Señales de los desplazamientos axiales en los tercios medios, (Flores, 2009)

Donde:

- $\delta_{CS}$  = Desplazamiento axial registrado en el cabezal superior
- $\delta_{TMS}$  = Desplazamiento axial registrado en el tercio medio superior
- $\delta_{TM}$  = Desplazamiento axial registrado en el tercio medio
- $\delta_{TMI}$  = Desplazamiento axial registrado en el tercio medio inferior

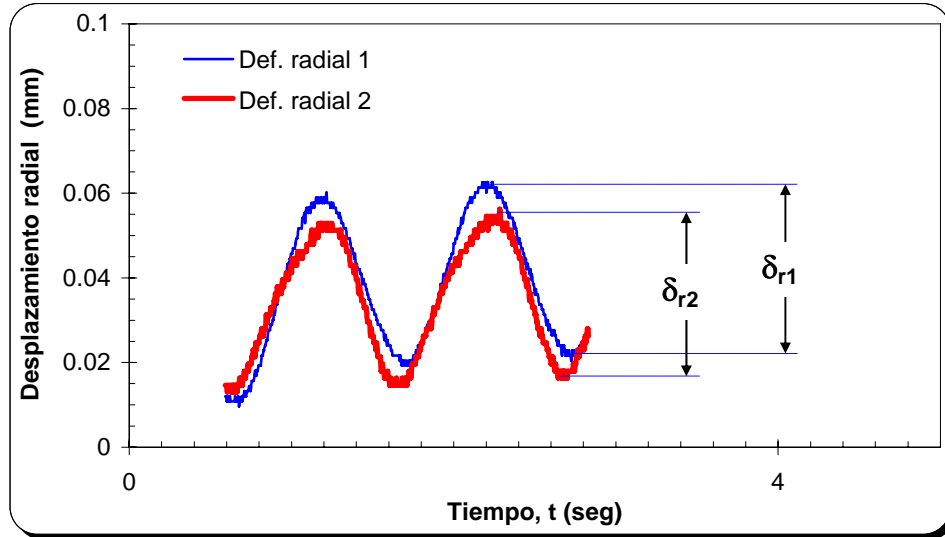


Figura 3.21 Señales de los desplazamientos radiales en los tercios medios, (Flores, 2009)

Donde:

- $\delta_{r1}$  = Desplazamiento radial obtenido en el sensor 1
- $\delta_{r2}$  = Desplazamiento radial obtenido en el sensor 2

## **CAPÍTULO 4**

### **PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**



## 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS E RESULTADOS

### 4.1 Introducción

Se ensayaron dos materiales granulares, La Parota y Las Charcas con humedades que van del 0 al 6.5 % en el material de Los Jales y de 0 a 3.5 % para el material de La Parota; se determinaron estos valores de contenidos de agua,  $\omega$ , considerando las curvas de compactación (Figura 3.6), en la cuales se pueden apreciar que con estos valores de contenido de agua,  $\omega$ , se alcanzan los valores máximos de la relación de vacíos,  $e$ , en cada uno de los materiales.

Se consideraron también tres esfuerzos de confinamiento,  $\sigma_c$ , de 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup> para las series de ensayos.

### 4.2 Corrección del cambio volumétrico

#### Incremento por aplicación de vacío.

Al momento de formar la probeta mediante el proceso de compactación descrito en el capítulo 3, se obtiene una compacidad inicial que se determina con el volumen del molde; a esta compacidad relativa le denominaremos compacidad relativa sin vacío con molde  $Dr_{cm}$ .

Cuando la probeta se coloca en la cámara triaxial se le aplica un valor de vacío de 0.15 kg/cm<sup>2</sup> antes de retirar el molde, con el propósito de evitar que se destruya la estructura de la probeta.

Al aplicar el vacío, el volumen inicial de la probeta sufre una disminución, lo cual provoca que la  $Dr$  se incremente, a este valor le denominaremos compacidad relativa con vacío ( $Dr_{cv}$ ).

Se realizaron 35 ensayos con el material de La Parota y 18 ensayos con el material de Los Jales, de los cuales se pudo determinar el incremento que sufre la compacidad relativa inicial, ( $Dr_{cm}$ ) por el efecto de la aplicación del vacío.

En la figura 4.1 se observa el incremento de la compacidad relativa inicial de la probeta ( $Dr_{cm}$ ), respecto al incremento que sufre cuando se le aplica el vacío. Los resultados indican que tanto para el material de La Parota como el de Los Jales, no sufren un incremento considerable de la compacidad relativa cuando las probetas tienen un  $Dr$  inicial de 60% o mayor, lo cual indica que para aquellas probetas con compacidades relativas menores a este valor la densificación por la aplicación del vacío al iniciar el ensayo se incrementará y puede llegar a ser el doble de la  $Dr$  que se tiene antes de aplicar el vacío.

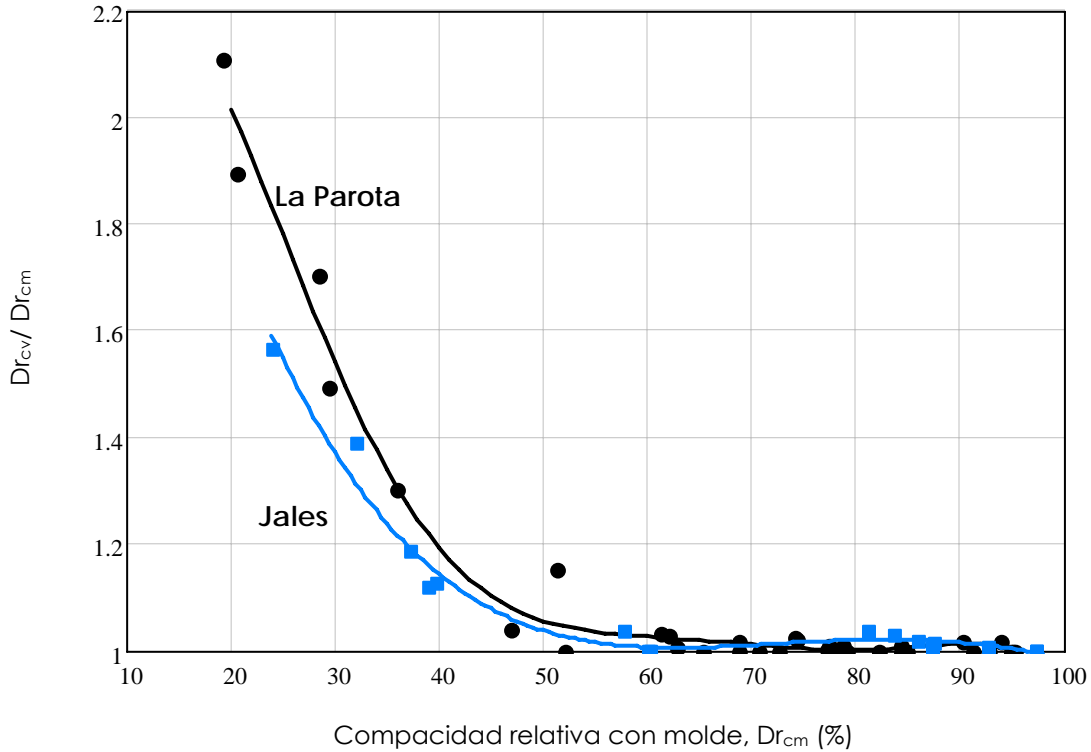


Figura 4.1 Variación de la compacidad relativa inicial al aplicarse el vacío

El segundo incremento de la compacidad relativa que experimenta la probeta es durante el montaje de la misma en la cámara triaxial, al aplicarle el esfuerzo de confinamiento sufre una disminución en su volumen, provocando nuevamente un incremento en la compacidad relativa.

En vista de que al ensayar las pruebas antes mencionadas no se cuantificó esta variación de la,  $Dr$ , se realizaron dos series de pruebas adicionales con ambos materiales contemplando las características de las anteriores, es decir, contenido de agua, compacidad relativa y esfuerzo de confinamiento; con el propósito de hacer el ajuste respectivo a los anteriores ensayos.

La tabla 4.1 muestra los valores del esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , que se aplicaron a las probetas complementarias, así como el valor de la compacidad relativa con vacío,  $Dr_{cv}$ , este último valor se determinó al montar la probeta en la cámara triaxial.



Tabla 4.1 Ensayes realizados para determinar el cambio de la compacidad relativa al aplicar el vacío durante su montaje y esfuerzo de confinamiento.

LA PAROTA			LOS JALES		
Prueba No.	Dr <sub>cv</sub> %	σ <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>	Prueba No.	Dr <sub>cv</sub> %	σ <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>
1	32.20	0.5,1.0 y 2.0	1	32.57	2.0
2	81.33	0.5,1.0 y 2.0	2	37.67	1.0 y 2.0
3	92.04	1.0 y 2.0	3	37.87	1.0 y 2.0
4	93.04	2.0	4	37.88	0.5,1.0 y 2.0
5	95.67	0.5,1.0 y 2.0	5	44.67	0.5,1.0 y 2.0
6	31.25	1.0 y 2.0	6	60.32	0.5,1.0 y 2.0
7	42.30	0.5,1.0 y 2.0	7	84.32	0.5,1.0 y 2.0
8	62.80	0.5,1.0 y 2.0	8	93.39	2.0
			9	93.47	1.0 y 2.0
			10	93.49	0.5,1.0 y 2.0

El procedimiento de ensaye que se desarrolló es el que se describe en el capítulo 3 a excepción de lo siguiente:

Al momento de colocar la probeta en la cámara triaxial se determinaron las dimensiones de las probetas para calcular la compacidad relativa con vacío Dr<sub>cv</sub>.

Una vez conocida la compacidad relativa con vacío, y tener la probeta colocada en la cámara triaxial cíclica, se tomaron lecturas de los sensores tanto radiales como axiales antes y después de aplicarle los esfuerzos de confinamiento, con el propósito de determinar la reducción del volumen, para esto se consideró un promedio de los valores registrados por los dos sensores radiales y una diferencia de los valores registrados por los sensores axiales, obteniéndose las siguientes gráficas:

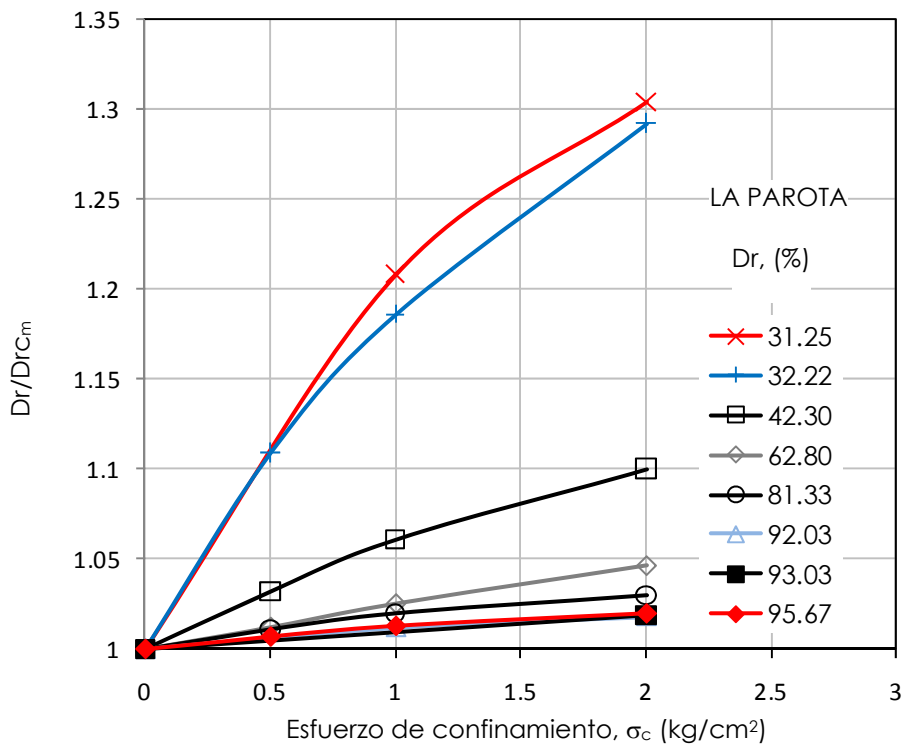
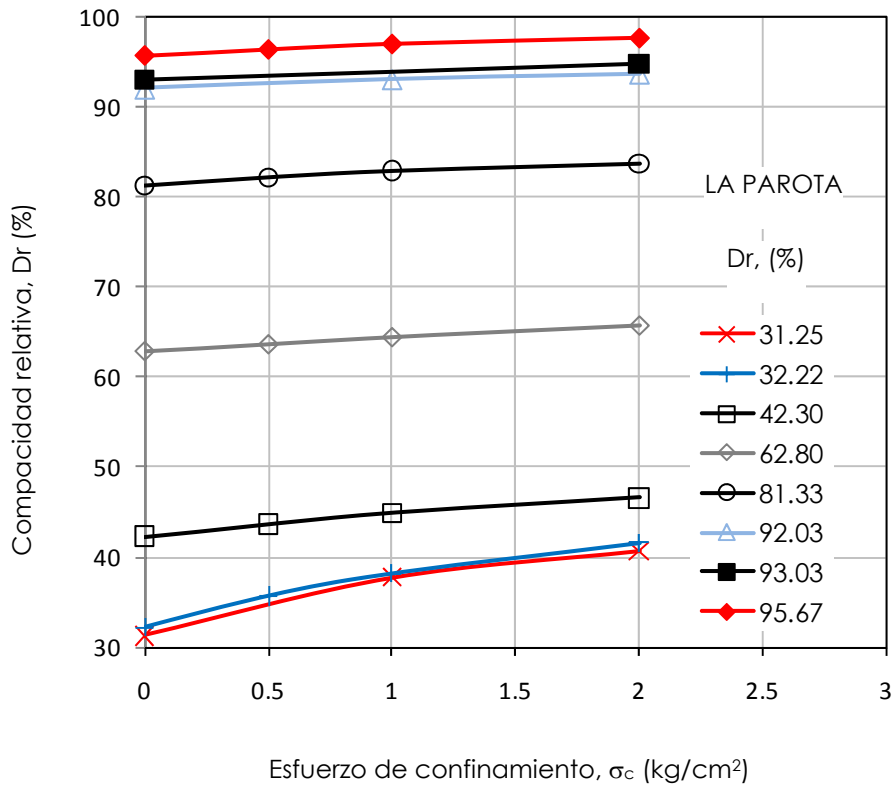


Figura 4.2 Variación de la compacidad relativa inicial con el esfuerzo de confinamiento, La Parota

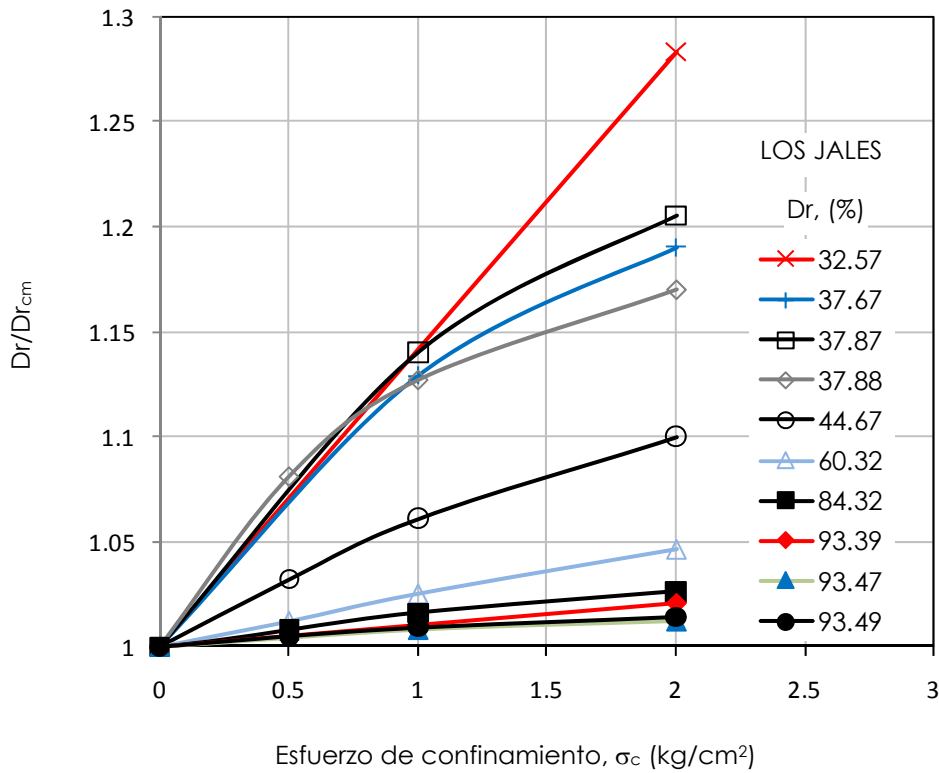
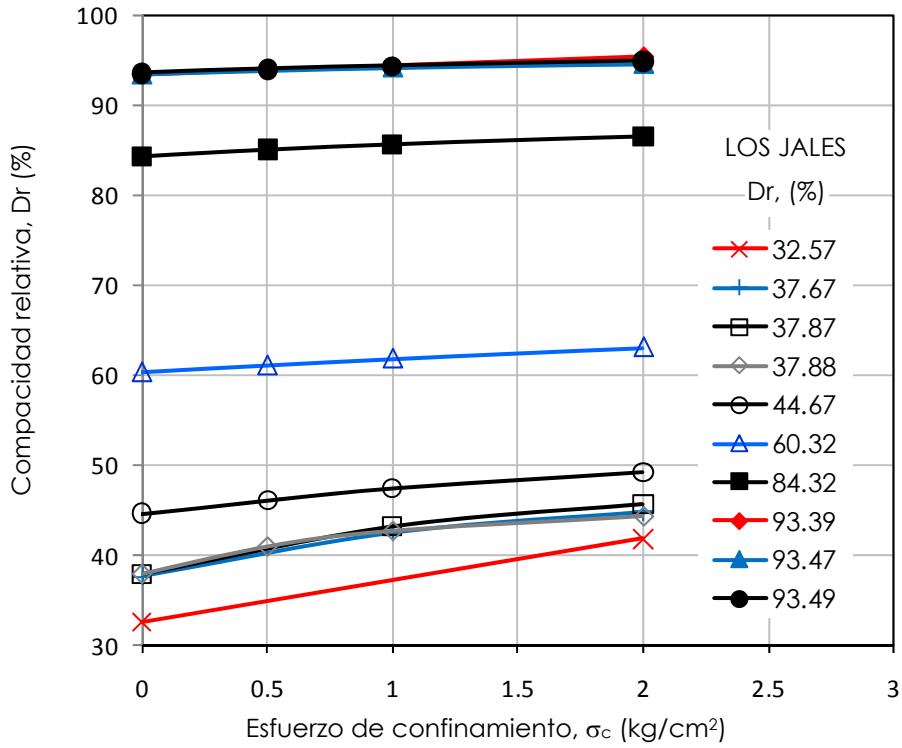


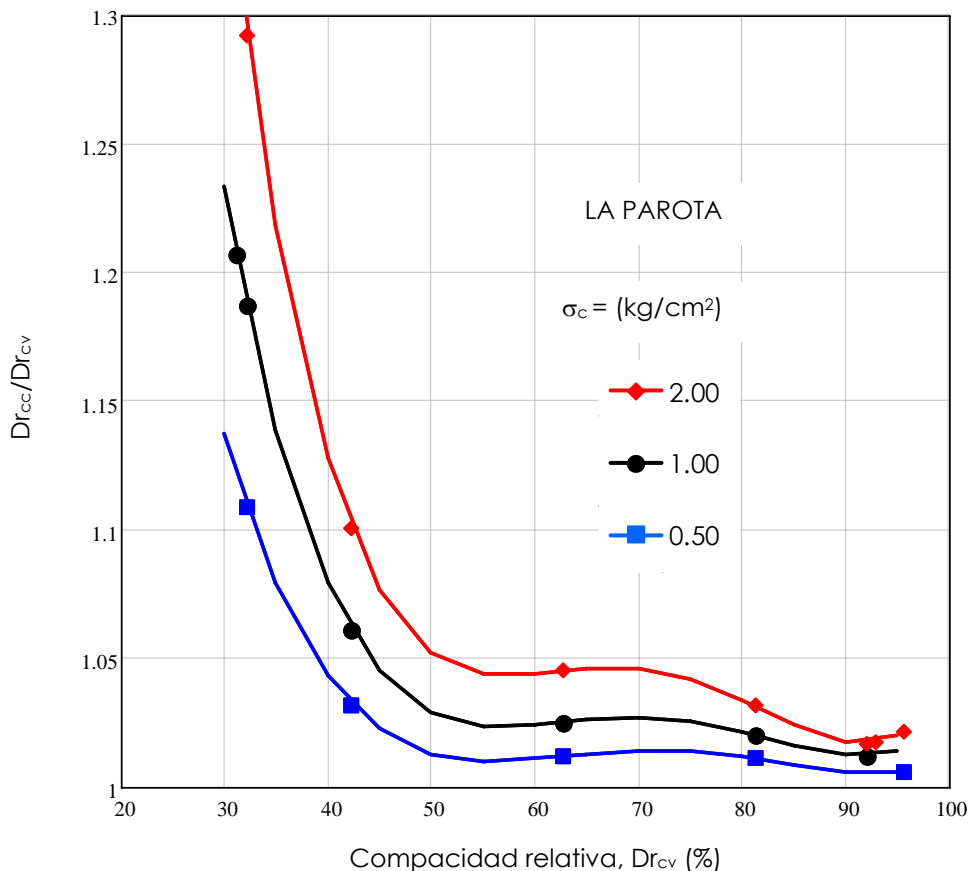
Figura 4.3 Variación de la compacidad relativa inicial con el esfuerzo de confinamiento, Los Jales

Como se puede apreciar en la figura 4.2, el incremento de la compacidad relativa de las probetas puede darse hasta un 30 %, cuando ésta se forma inicialmente con una compacidad baja de 31.25 %, en el material de La Parota; mientras que para el material de Los Jales, como se puede ver en la figura 4.3, el incremento puede ser hasta de un 28 %, con una compacidad inicial de 32.57%.

En relación a las compacidades altas, al aplicarles un esfuerzo de confinamiento de 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, se observó que sufrían un incremento máximo del 4%, considerando lo anterior podemos concluir que la variación de la compacidad relativa al aplicarle el esfuerzo de confinamiento en la probeta oscila del 4 al 30 %.

Partiendo de este incremento de la compacidad relativa que se puede apreciar en las figuras 4.2 y 4.3, se obtuvo la figura 4.4, en la cual se muestran los resultados de la normalización de la compacidad relativa con confinamiento  $Dr_{cc}$  entre la compacidad relativa con vacío  $Dr_{cv}$ , con respecto a este último valor para los tres valores de confinamiento. En ambos materiales se puede apreciar que el mayor incremento de la compacidad relativa se da en aquellas muestras cuya compacidad relativa con vacío es del orden del 30 al 50%

Al graficar los valores normalizados del confinamiento se ajustó la tendencia de los mismos con una regresión polinomial de cuarto orden, tanto para el material de Los Jales como el de La Parota, dichas ecuaciones se indican en la tabla 4.2.



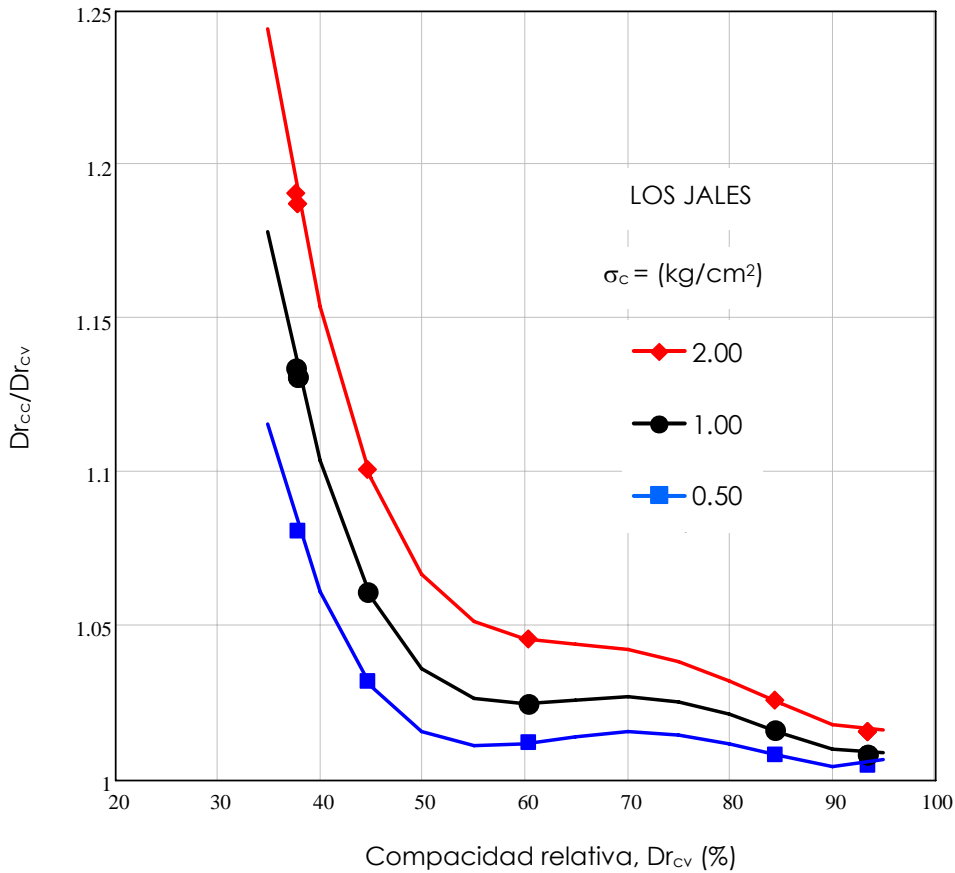


Figura 4.4 Variación de la compacidad relativa  $Dr$ , con el incremento del esfuerzo de confinamiento

Tabla 4.2 Ecuaciones obtenidas al normalizar el incremento de la compacidad relativa con respecto al esfuerzo de confinamiento

LA PAROTA	
$\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	Normalización de $\frac{Dr_{cc}}{Dr_{cv}}$ con respecto a la $Dr_{cv}$
0.5	$\frac{Dr_{cc}}{Dr_{cv}} = 5.251e-8 Dr_{cv}^4 - 1.542e-5 Dr_{cv}^3 + 0.002 Dr_{cv}^2 - 0.078 Dr_{cv} + 2.353$
1.0	$\frac{Dr_{cc}}{Dr_{cv}} = 8.886e-8 Dr_{cv}^4 - 2.582e-5 Dr_{cv}^3 + 0.003 Dr_{cv}^2 - 0.129 Dr_{cv} + 3.232$
2.0	$\frac{Dr_{cc}}{Dr_{cv}} = 1.407e-7 Dr_{cv}^4 - 4.057e-5 Dr_{cv}^3 + 0.004 Dr_{cv}^2 - 0.199 Dr_{cv} + 4.445$

LOS JALES	
$\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	Normalización de $\frac{Dr_{cc}}{Dr_{cv}}$ con respecto a la $Dr_{cv}$
0.5	$\frac{Dr_{cc}}{Dr_{cv}} = 7.93014e-8 Dr_{cv}^4 - 2.31007e-5 Dr_{cv}^3 + 0.00247 Dr_{cv}^2 - 0.11564 Dr_{cv} + 3.00237$
1.0	$\frac{Dr_{cc}}{Dr_{cv}} = 9.462e-8 Dr_{cv}^4 - 2.804e-5 Dr_{cv}^3 + 0.00306 Dr_{cv}^2 - 0.14599 Dr_{cv} + 3.59971$
2.0	$\frac{Dr_{cc}}{Dr_{cv}} = 1.053e-7 Dr_{cv}^4 - 3.132e-5 Dr_{cv}^3 + 0.00344 Dr_{cv}^2 - 0.16596 Dr_{cv} + 4.02528$

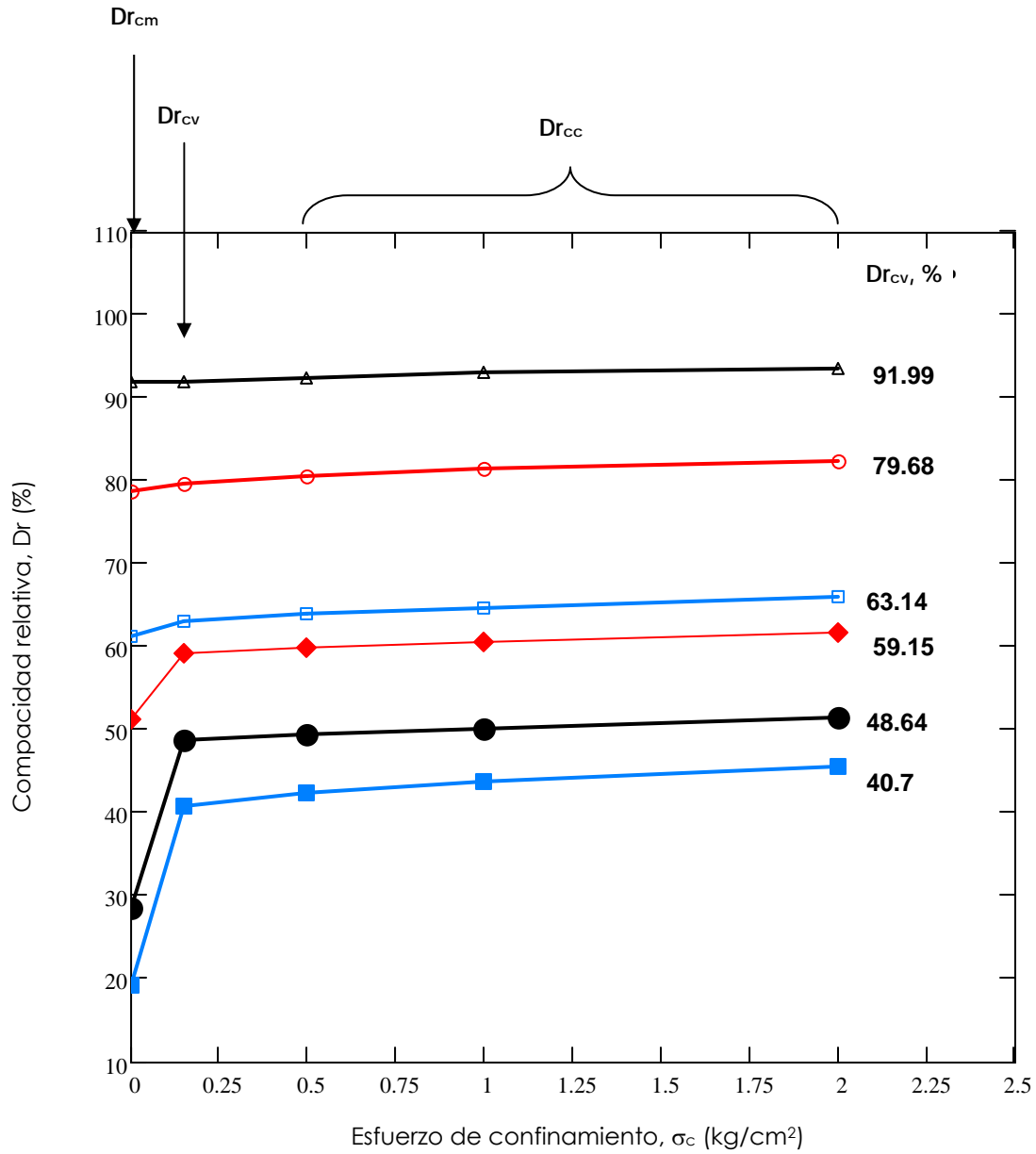
Estas ecuaciones se emplearon para determinar la compacidad relativa al aplicarle el confinamiento a los ensayos realizados en la primer etapa (35 para el material de La Parota y 18 para el material de Los Jales).

Los resultados obtenidos se indican en la figura 4.5 donde se puede apreciar la variación que experimenta la compacidad relativa desde su formación hasta el proceso de ensaye para el material de La Parota. En el inciso a) se puede observar que los mayores incrementos que experimenta la compacidad relativa al aplicar el vacío son en aquellas probetas que tengan compacidades menores al 60 %.

En la figura 4.5b se muestra la normalización de las diferentes compacidades que se obtienen durante el proceso de formación, montaje y ensaye de la probeta, con respecto al valor inicial que se obtiene de la compacidad relativa, es decir, la compacidad relativa con molde  $Dr_{cm}$ . En esta gráfica se puede observar que conforme el valor de la compacidad relativa inicial es mayor el incremento que sufre durante el proceso es menor, se observa que para una compacidad con molde del 40.70%, se incrementa 2.4 veces con respecto al valor de la compacidad relativa inicial, en su etapa de ensaye al aplicarle un esfuerzo de confinamiento de 2.0 kg/cm<sup>2</sup> y que para una compacidad con molde del 48.64% se incrementa 1.8 veces al ensayarse bajo este mismo esfuerzo de confinamiento.

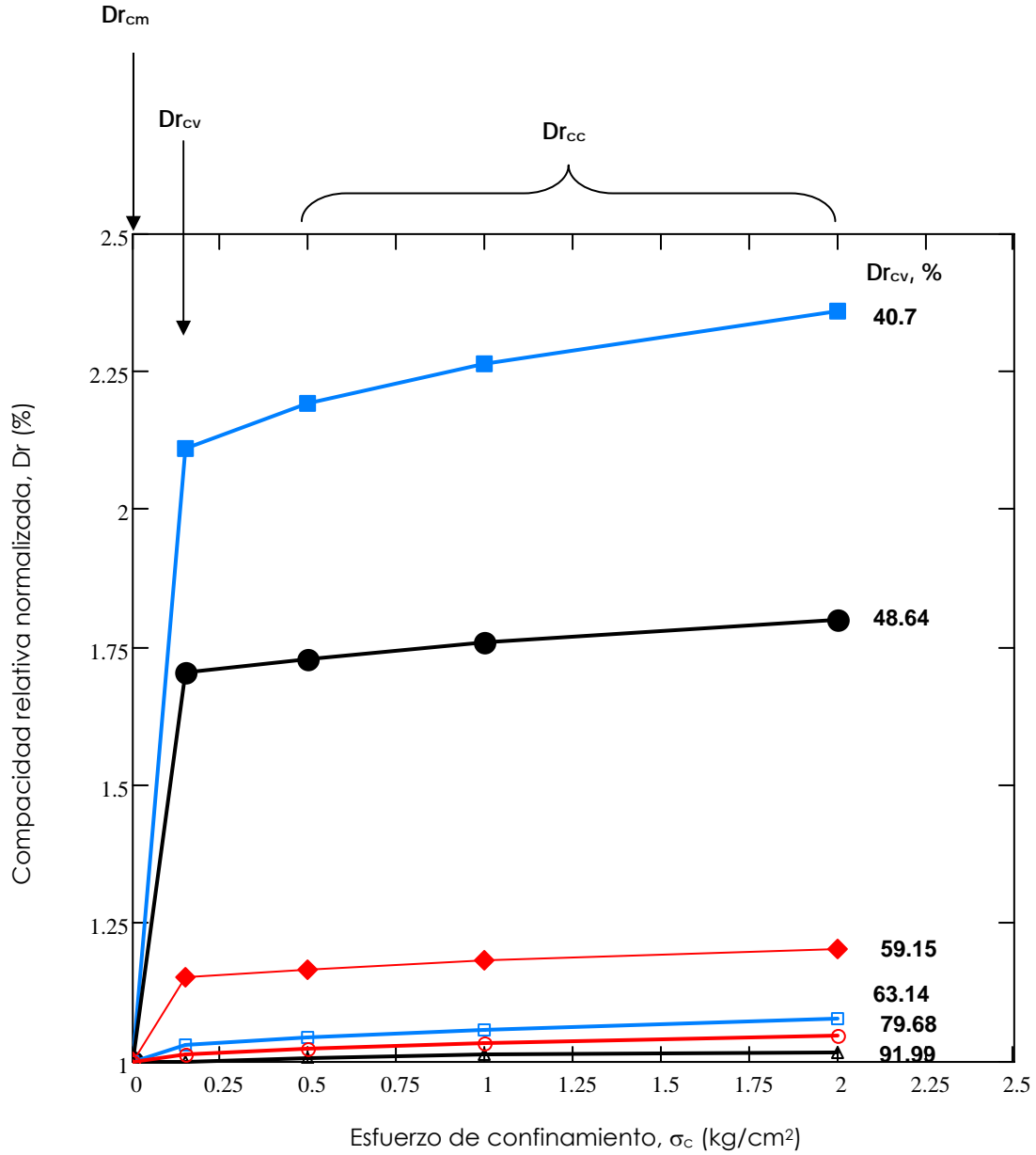
A medida que la compacidad relativa inicial es mayor, sufre un menor incremento. En la gráfica se puede apreciar que para compacidades relativas,  $Dr_{cm}$ , mayores a 60%, el incremento es menor al 20%.

En la figura 4.6b, para el material de Los Jales se observa que para una compacidad inicial de 37.74%, al ensayar la probeta y aplicarle un esfuerzo de confinamiento  $Dr_{cc}$  de 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, la compacidad relativa se incrementa 1.86 veces, respecto a la compacidad relativa con molde  $Dr_{cm}$ , mientras que para una compacidad relativa inicial de 44.85 %, la compacidad aumenta 1.23 veces respecto a la compacidad relativa inicial. Para compacidades relativas iniciales arriba del 60 %, el incremento que experimenta la compacidad relativa es del orden del 10 %.



### LA PAROTA

a).- Variación de la compacidad relativa, desde la formación, montaje y ensaye de las probetas

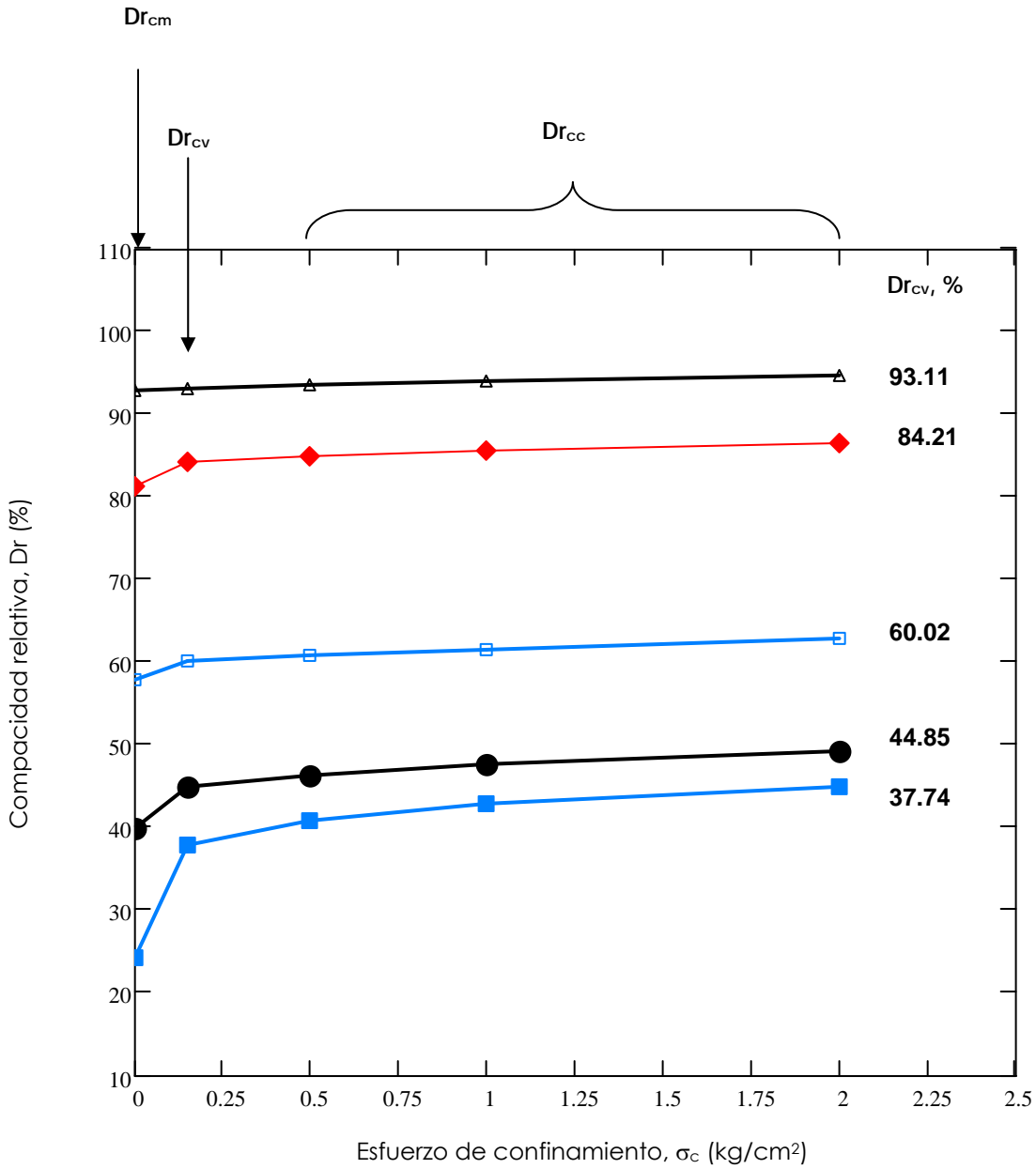


**LA PAROTA**

b).- Normalización de las compacidades relativas, respecto a la compacidad relativa con molde,  $Dr_{cm}$

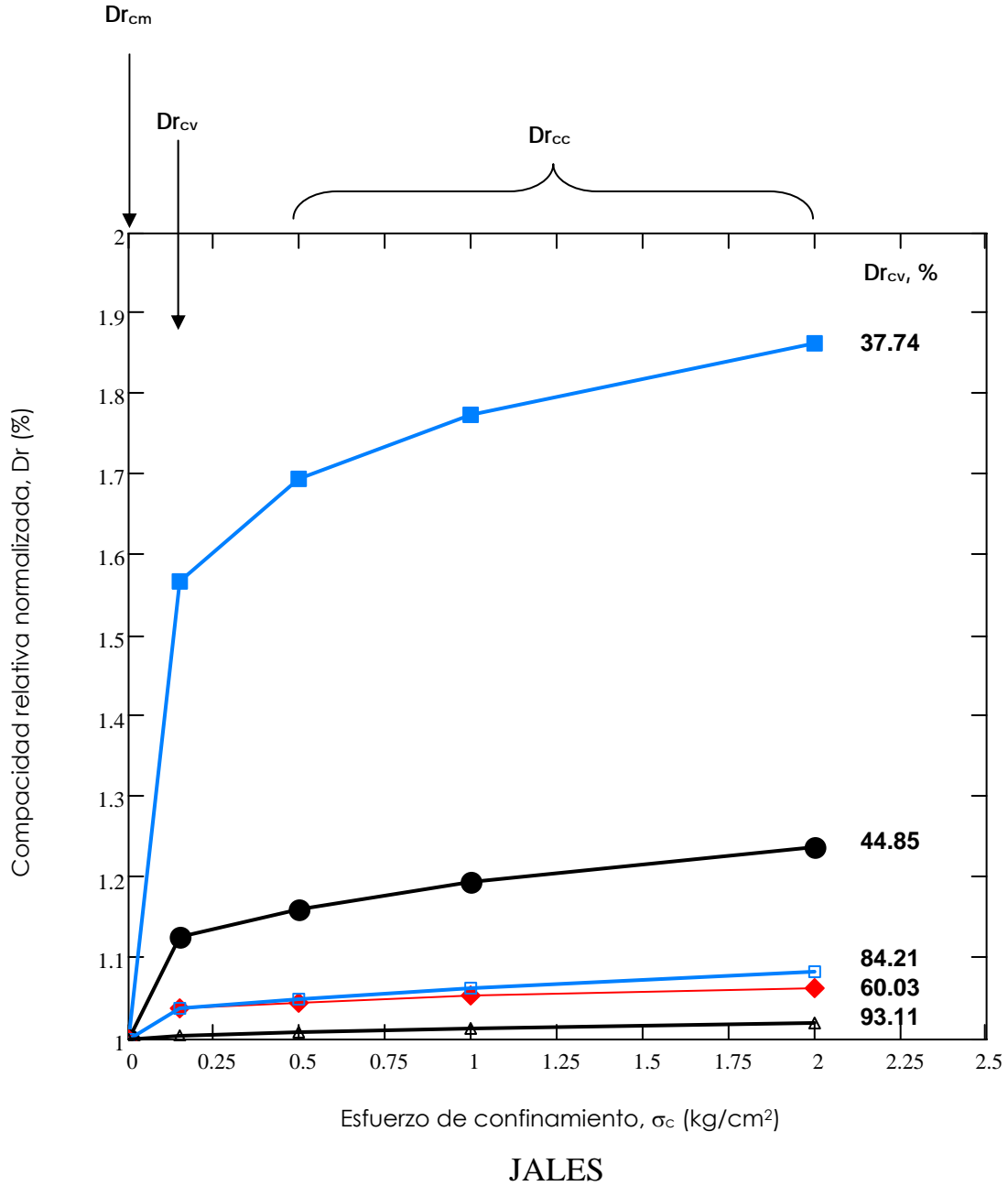
Figura 4.5 Incremento de la compacidad relativa, para el material de La Parota





JALES

a).- Variación de la compacidad relativa, desde la formación, montaje y ensaye de las probetas



b).- Normalización de las compacidades relativas, respecto a la compacidad relativa con molde,  $D_{r_{cm}}$

Figura 4.6 Incremento de la compacidad relativa, para el material de Los Jales

### 4.3 Relación de Poisson

Para la determinación de los valores de la relación de Poisson,  $\nu$ , se graficaron las deformaciones unitarias axiales contra las radiales, de cada semi-amplitud aplicada en la etapa de ensaye, como se muestra en la figura 4.7, en la cual se muestra que conforme aumenta la semi-amplitud, también aumentan ambas deformaciones unitarias, se generó la línea de tendencia por regresión lineal, de acuerdo a la tendencia que presentan los resultados, la pendiente de esta línea equivale a la relación de Poisson media para las condiciones de compacidad relativa, contenido de agua y esfuerzo de confinamiento para la probeta ensayada.

En el anexo 1 se muestran las gráficas de todos los ensayos realizados para ambos materiales (La Parota y Los Jales), agrupados de tal forma que se pueda observar la variación de la relación de Poisson, respecto a las variables de análisis, contenido de agua,  $\omega$ , esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , y compacidad relativa,  $D_r$ .

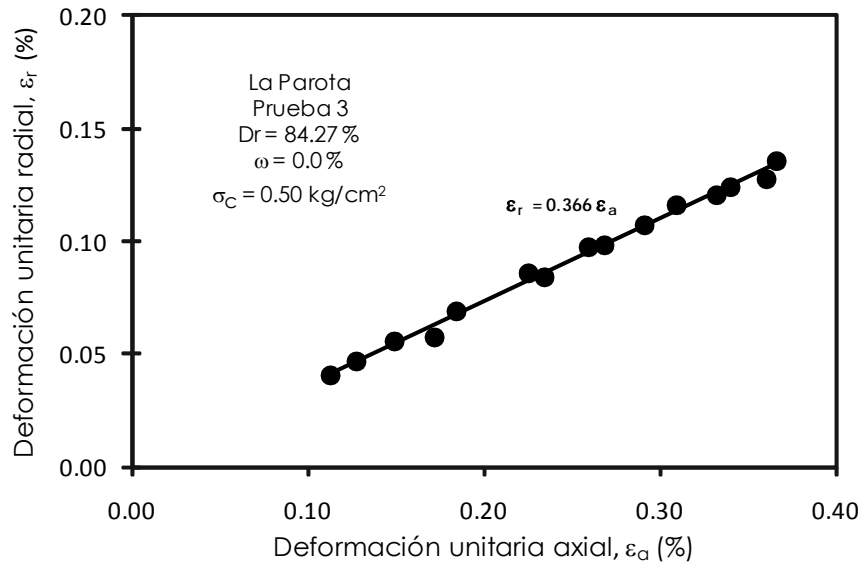


Figura 4.7 Obtención de la relación de Poisson

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

Se realizaron 35 ensayos triaxiales de tipo UU, analizando la influencia de tres variables, el contenido de agua (de 0 a 3.5%, se determinó este porcentaje con base en la figura 3.6 para obtener la mayor relación de vacíos), la compacidad relativa,  $Dr_{cc}$ , (de 43.67% a 97.60%) y el esfuerzo de confinamiento (de 0 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>) para determinar el comportamiento del material.

La tabla 4.3 muestra los ensayos realizados, las características de los mismos tales como compacidad relativa, contenido de agua y el esfuerzo de confinamiento.

En la figura 4.8 se presenta la variación del Peso Volumétrico Seco Máximo, ( $\gamma_d$ ), en relación con la Compacidad Relativa Inicial,  $Dr_{cv}$ , se observa que para las muestras de La Parota, ensayadas con contenidos de agua del 0.0 %, alcanzan Pesos Volumétricos Secos Máximos, ( $\gamma_d$ ), de 1.80 a 1.86 T/m<sup>3</sup> con compacidades relativas iniciales  $Dr_{cv}$ , en el intervalo de 81.40 a 95.56 %.

Para las muestras ensayadas con contenidos de agua de 2.5 y 3.5 %, le corresponden Pesos Volumétricos Secos Máximos en el rango de 1.6 a 1.8 T/m<sup>3</sup>, con compacidades relativas iniciales de 28.93 a 80 %.

Tabla 4.3 Ensayes realizados con el material de La Parota

No.	DATOS DE LA PROBETA							PARÁMETROS DE ENSAYE		
	D <sub>0</sub> cm	H <sub>0</sub> cm	W <sub>m</sub> g	ω %	A <sub>m</sub> cm <sup>2</sup>	γ <sub>m</sub> g/cm <sup>3</sup>	D <sub>rcc</sub> %	P <sub>p</sub> kg	σ <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>	ω %
1	10.14	25.80	3861.39	0.00	80.75	1.85	94.56	6.00	0.50	0.00
2	10.14	25.80	3841.79	0.00	80.75	1.84	92.48	4.00	0.50	0.00
3	10.14	25.80	3768.60	0.00	80.75	1.81	84.27	2.00	0.50	0.00
4	10.14	25.80	3762.63	0.00	80.75	1.81	84.90	0.50	0.50	0.00
5	10.15	25.60	3800.00	3.43	80.91	1.83	76.97	6.00	0.50	3.50
6	10.15	25.80	3720.00	3.41	80.91	1.78	64.38	4.00	0.50	3.50
7	10.15	25.70	3621.40	3.73	80.91	1.74	52.73	2.00	0.50	3.50
8	10.11	25.80	3575.43	3.61	80.28	1.73	49.46	2.00	0.50	3.50
9	10.15	25.70	3863.60	0.00	80.91	1.86	96.38	6.00	1.00	0.00
10	10.12	25.75	3819.26	0.00	80.44	1.84	93.10	3.00	1.00	0.00
11	10.15	25.75	3744.06	0.00	80.91	1.80	83.02	0.50	1.00	0.00
12	10.13	25.80	3779.80	2.17	80.58	1.82	78.33	6.00	0.50	2.50
13	10.15	25.80	3734.40	2.52	80.91	1.79	69.95	4.00	0.50	2.50
14	10.13	25.70	3645.16	2.28	80.56	1.76	63.89	2.00	0.50	2.50
15	9.93	25.70	3404.20	2.68	77.44	1.71	49.35	0.50	0.50	2.50
16	10.12	25.80	3800.00	2.32	80.44	1.83	81.40	6.00	1.00	2.50
17	10.13	25.75	3709.20	2.28	80.53	1.79	71.85	3.00	1.00	2.50
18	10.06	25.70	3545.30	1.75	79.49	1.74	60.55	0.50	1.00	2.50
19	10.16	25.75	3788.90	3.55	81.07	1.81	72.82	6.00	1.00	3.50
20	10.14	25.75	3712.90	3.77	80.69	1.79	64.90	3.00	1.00	3.50
21	9.92	25.70	3363.59	3.46	77.29	1.69	43.67	0.50	1.00	3.50
22	10.14	25.80	3866.70	0.00	80.75	1.86	96.43	6.00	2.00	0.00
23	10.15	25.75	3826.70	0.00	80.91	1.84	91.94	3.00	2.00	0.00
24	10.13	25.75	3763.10	0.00	80.60	1.81	87.18	0.50	2.00	0.00
25	10.15	25.75	3797.75	2.19	80.91	1.82	81.19	6.00	2.00	2.50
26	10.15	25.75	3719.00	2.56	80.91	1.78	71.03	3.00	2.00	2.50
27	10.00	25.65	3405.39	2.50	78.54	1.69	47.81	0.50	2.00	2.50
28	10.12	25.75	3808.50	3.70	80.40	1.84	79.06	6.00	2.00	3.50
29	10.12	25.75	3692.00	3.39	80.44	1.78	66.74	3.00	2.00	3.50
30	9.96	25.65	3377.37	3.57	77.91	1.69	44.72	0.50	2.00	3.50
31	10.13	25.70	3853.24	0.00	80.60	1.86	97.60	0.50	2.00	0.00
32	10.15	25.75	3803.10	2.55	80.91	1.83	80.39	0.50	2.00	2.50
33	10.02	25.75	3437.90	2.03	78.85	1.69	48.68	0.50	1.00	2.50

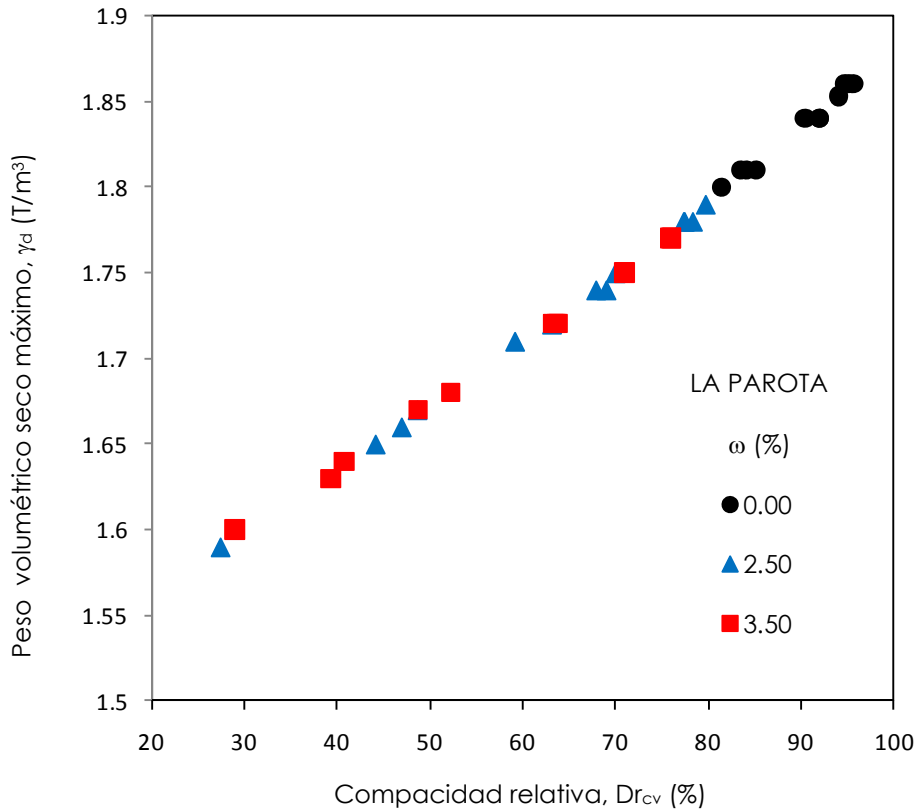


Figura 4.8 Relación del Peso Volumétrico Seco Máximo y la Compacidad relativa inicial, para el material de La Parota

Con el objeto de establecer el efecto que tienen las variables de análisis sobre la relación de Poisson se agruparon los resultados por compacidad relativa, contenido de agua y esfuerzo de confinamiento. La relación de Poisson se determinó como la pendiente de la regresión lineal que se obtiene al graficar los desplazamientos unitarios axiales,  $\varepsilon_a$  contra los radiales  $\varepsilon_r$ , cuyos valores se muestran en el anexo 1.

#### 4.3.1.1 Efecto de la compacidad relativa

En la figura 4.9 se muestra la variación de la relación de Poisson,  $\nu$ , con la influencia de los contenidos de agua, esfuerzos de confinamientos, y compacidad relativa; en la figura 4.9a, se muestra el comportamiento del material en condiciones secas, las muestras que se ensayaron con 0.50 kg/cm<sup>2</sup>, presentan una variación dispersa sin presentar una tendencia definida, se observa que para este esfuerzo de confinamiento los valores de la relación de Poisson se encuentran en el rango de 0.33 a 0.46.

Para las muestras ensayadas con 1.0 kg/cm<sup>2</sup> se observa que la variación de la compacidad relativa no establece una tendencia definida en la relación de Poisson, manteniéndose en el rango de 0.33 a 0.48 con compacidades relativas de 96.38 % y 93.10%, respectivamente.

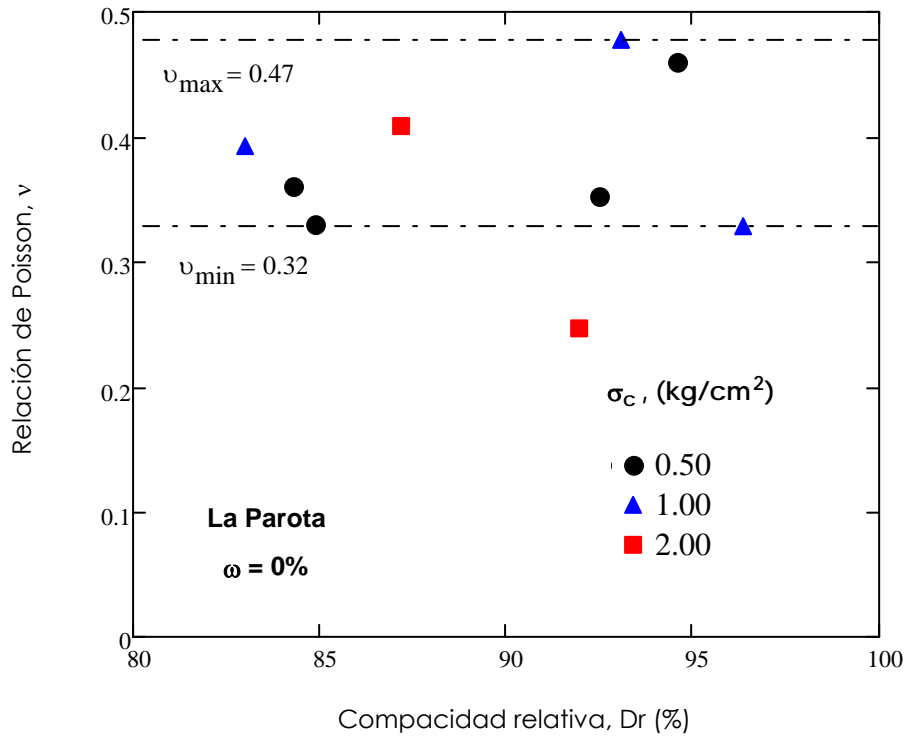
Para las probetas ensayadas con  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  de esfuerzo de confinamiento, se observa que la relación de Poisson muestra una tendencia a disminuir conforme aumenta la compacidad relativa presentando valores de 0.41 y 0.25 para compacidades relativas de 87.18% y 91.94%, respectivamente.

De acuerdo con el comportamiento del material en condiciones secas se observa que la variación de la compacidad relativa no presenta una tendencia marcada para la variación de la relación de Poisson; sin embargo, se puede establecer que para estas condiciones de ensaye, la relación de Poisson presenta una diferencia de 0.15, entre los valores máximos y mínimos.

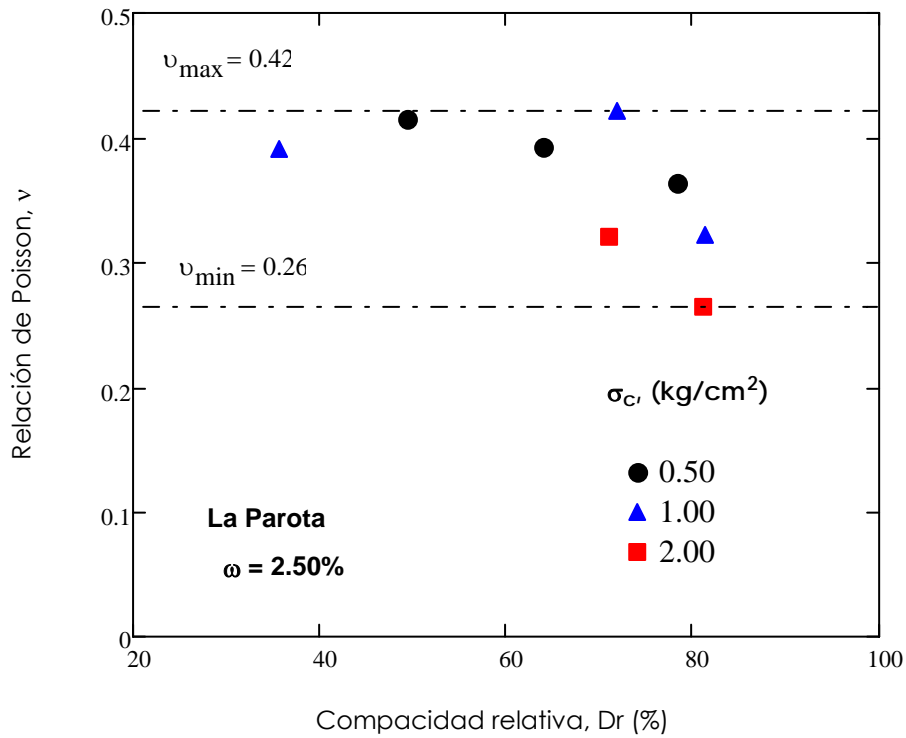
Para las muestras ensayadas con contenido de agua de 2.5%, y esfuerzo de confinamiento de  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  se observa que presenta una tendencia a disminuir la relación de Poisson conforme se incrementa la compacidad relativa, obteniendo valores de 0.41 a 0.36, con compacidades relativas de 49.35 a 78.33, respectivamente, para las probetas ensayadas con  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ , presenta una tendencia a disminuir la relación de Poisson conforme aumenta la compacidad relativa presentando valores Poisson de 0.39 a 0.32 para compacidades relativas de 35.65 a 81.40, respectivamente, para las pruebas ensayadas con el esfuerzo de confinamiento más alto  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ , la relación de Poisson disminuye de 0.32 a 0.26 para compacidades de 71.03 y 81.19%, la diferencia de Poisson máxima y mínima para este contenido de agua es de 0.15 al igual que para la condición en estado seco, (figura 4.9b).

Para las muestras ensayadas con contenido de agua de 3.5% y esfuerzo de confinamiento de  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ , la variación de  $\nu$  no presenta una tendencia definida, presentando valores de 0.31 y 0.34 para compacidades relativas de 33.37 y 64.38 %, para el confinamiento de  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ , la relación de Poisson obtenida es de 0.24 a 0.38, presentando una tendencia a aumentar conforme aumenta la compacidad relativa, con valores de 43.67 a 72.82%; con un esfuerzo de confinamiento de  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ , se presenta una tendencia a aumentar la relación de Poisson, conforme aumenta la compacidad relativa,  $D_r$ , de igual forma que para el confinamiento de  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ , con valores de Poisson de 0.15 a 0.33 para compacidades de 44.72 a 79%, las probetas ensayadas con este contenido de agua al igual que la condición seca no presenta una influencia definida de la compacidad relativa para la variación de la relación de Poisson, (figura 4.9c).

En la figura 4.9d se muestra la influencia de los tres contenidos de agua sobre  $\nu$ , conforme aumenta la compacidad relativa,  $D_r$ , se puede apreciar que se pueden establecer fronteras máximas y mínimas obteniéndose valores de 0.41 y 0.24, para un rango de  $D_r$  de 32 a 97%, para los diferentes esfuerzos de confinamiento.

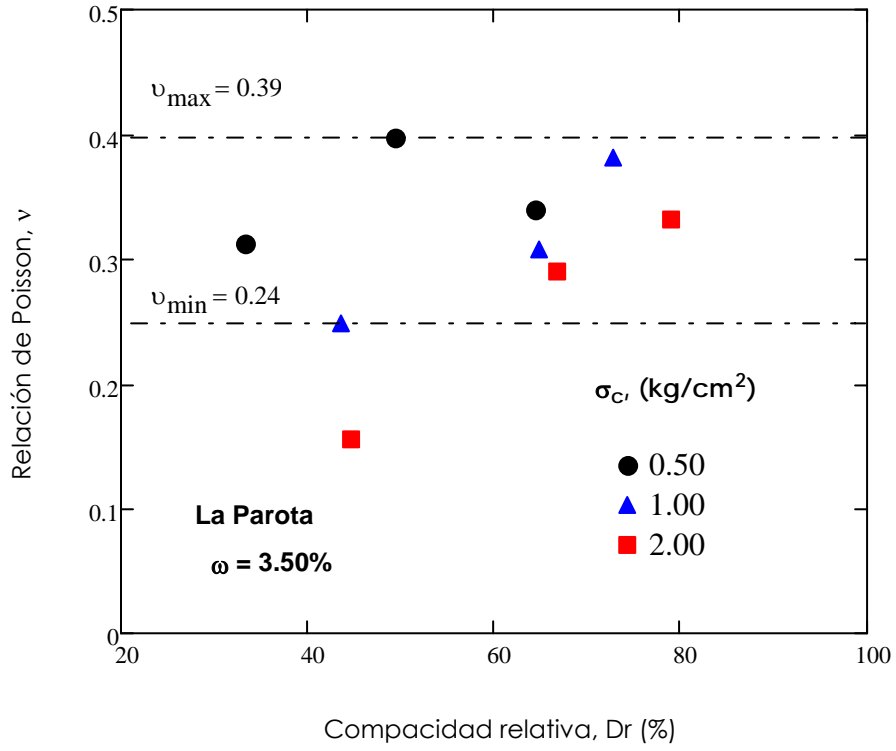


a)  $\omega = 0\%$

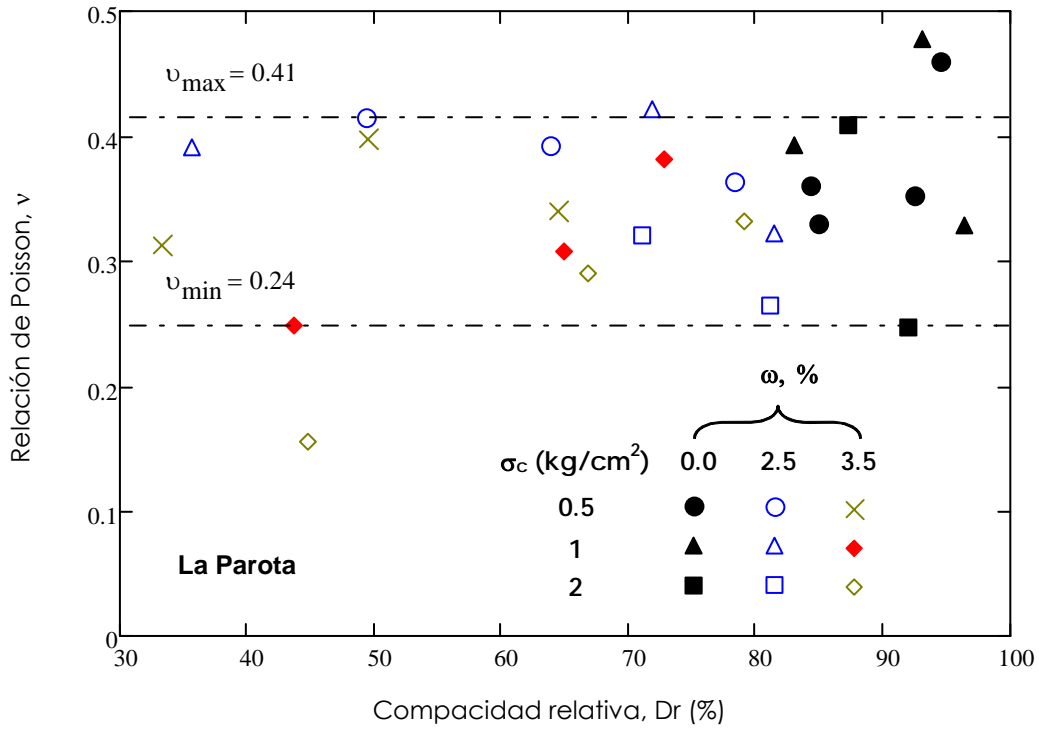


b)  $\omega = 2.50\%$





c)  $\omega = 3.50\%$



d)

Figura 4.9 Variación de la relación de Poisson,  $\nu$ , respecto a la compacidad relativa, con diferentes contenidos de agua

### 4.3.1.2 Efecto del contenido de agua.

Al agrupar los resultados de los ensayos realizados por contenido de agua y esfuerzo de confinamiento, se establecieron tres rangos de compacidades relativas, uno para cada  $\sigma_c$ , conformando cada rango por aquellos ensayos que presentaran  $D_r$  cercanas, en la figura 4.10, se muestra el comportamiento del material obtenido, se observa que conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento, la relación de Poisson tiende a disminuir, cuando el contenido de agua aumenta de de 1.0 a 2.5 %; de acuerdo con lo obtenido se puede establecer que el efecto del contenido de agua, no es un factor trascendente en la variación de la relación de Poisson, dado que no se muestra un patrón definido.

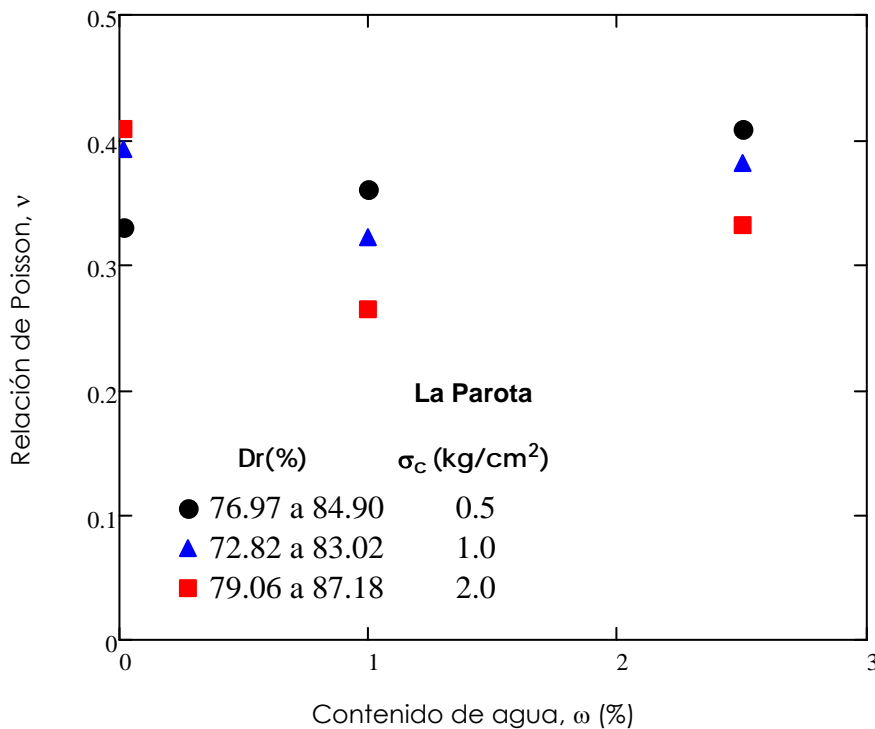


Figura 4.10 Variación de la relación de Poisson respecto al contenido de agua

### 4.3.1.3 Efecto del esfuerzo de confinamiento.

Para determinar la influencia del esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson se agruparon los resultados obtenidos considerando esta variable, seleccionando tres ensayos con compacidades relativas cercanas entre sí, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.11

En la figura 4.11a se muestran los resultados de las probetas ensayadas con un contenido de agua de 0%, se consideró un rango de compacidad relativa de 83 a 93.10 %, al graficar los valores de  $\nu$  contra  $\sigma_c$ , se establecieron fronteras máximas y mínimas

siguiendo la tendencia que presenta la dispersión de valores, estableciendo las siguientes ecuaciones obtenidas por regresión lineal,  $v_{\max} = -0.039\sigma_c + 0.495$ ,  $v_{\min} = -0.059\sigma_c + 0.371$ , se puede observar que conforme aumenta  $\sigma_c$ , disminuye  $v$ , la variación entre las fronteras es de 0.16.

Para el material con 2.5 % de contenido de agua se emplearon tres rangos de compacidades relativas, el primero de 47.81 a 60.55%, en este rango  $v$  aumenta de 0.41 a 0.47 y después disminuye a 0.15, conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , (0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>). El segundo rango establecido es de 69.95 a 71.85%, en éste se definieron valores de Poisson de 0.28, 0.42 y 0.32, al incrementarse el esfuerzo de confinamiento.

El tercer intervalo se estableció con el rango de 78.33 a 81.40 %, observándose que los valores de Poisson disminuyen de 0.36 a 0.26, al aumentar el  $\sigma_c$ .

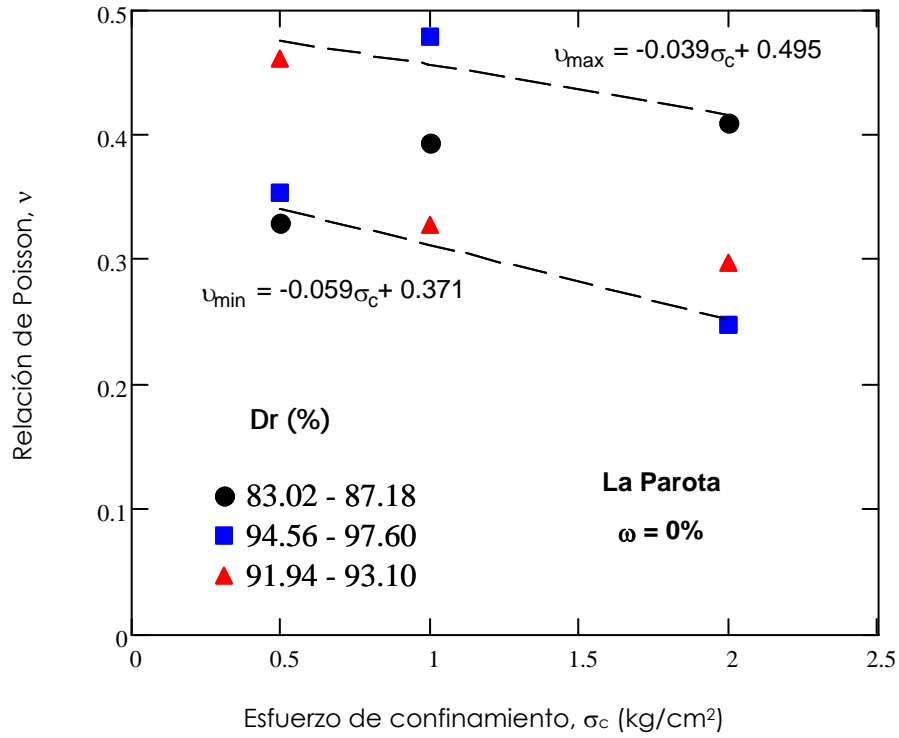
Al establecer la dispersión de los valores obtenidos para los tres rangos de compacidades relativas, se definieron al igual que para el material en estado seco, las fronteras para los valores máximos y mínimos de relación de Poisson, obteniéndose las siguientes ecuaciones:  $v_{\max} = -0.102\sigma_c + 0.524$ ,  $v_{\min} = -0.085\sigma_c + 0.327$ .

La variación entre las fronteras establecidas es al igual que para el material seco es de 0.16, figura 4.11 b.

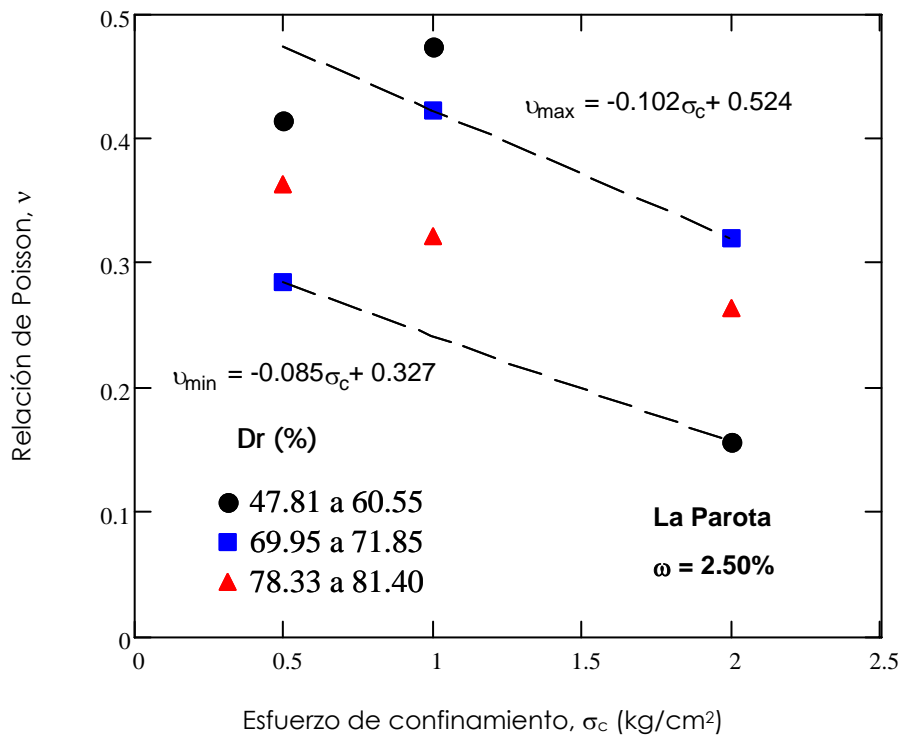
En el material con 3.5% de contenido de agua, se establecieron los siguientes rangos de compacidades relativas, para el análisis de resultados, primer rango de 43.67 a 49.46, se obtuvieron  $v$  de 0.39 para el primer confinamiento, 0.24 para el segundo y 0.15 para el confinamiento más alto. En el siguiente rango de 64.38 a 66.74 se obtuvieron las siguientes relaciones de Poisson, 0.34, 0.30 y 0.29, para los confinamientos 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>. Para el tercer rango de 72.82 a 79.06 los valores de  $v$  obtenidos son 0.40, 0.38 y 0.33, para los confinamientos en forma ascendentes.

El material con este contenido de agua muestra una tendencia más uniforme en todos los rangos planteados de disminuir la relación de Poisson conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento, las fronteras establecidas se definieron con las siguientes ecuaciones  $v_{\max} = -0.051\sigma_c + 0.433$ ,  $v_{\min} = -0.092\sigma_c + 0.34$ , la separación entre las fronteras es de 0.17, figura 4.11c.

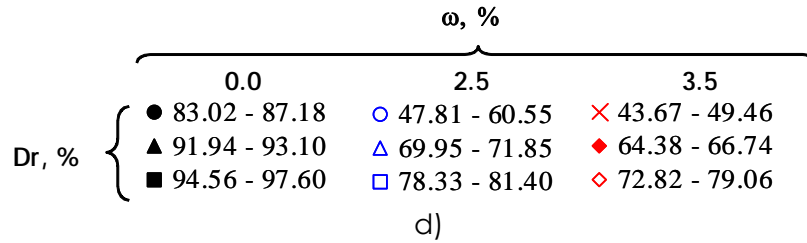
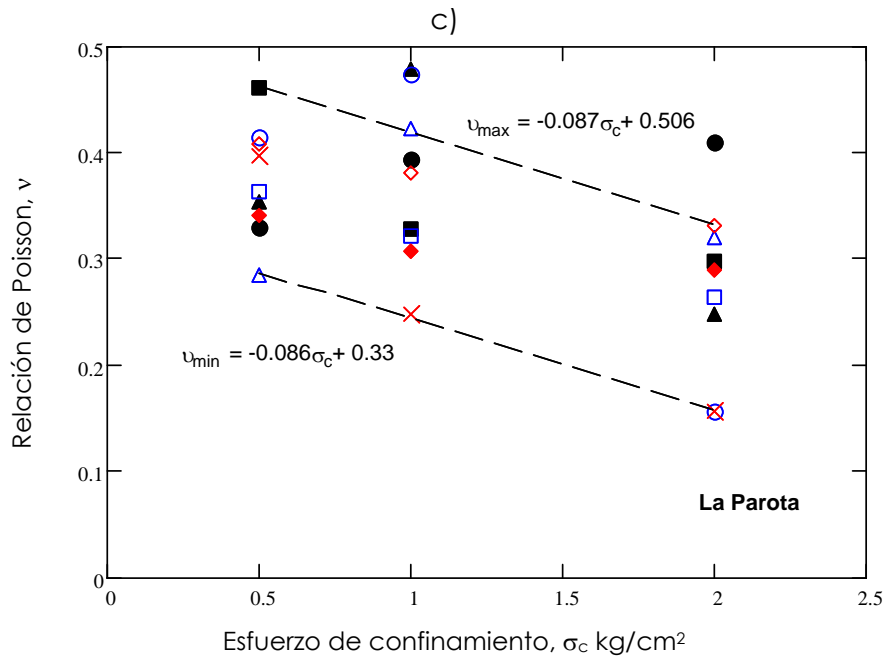
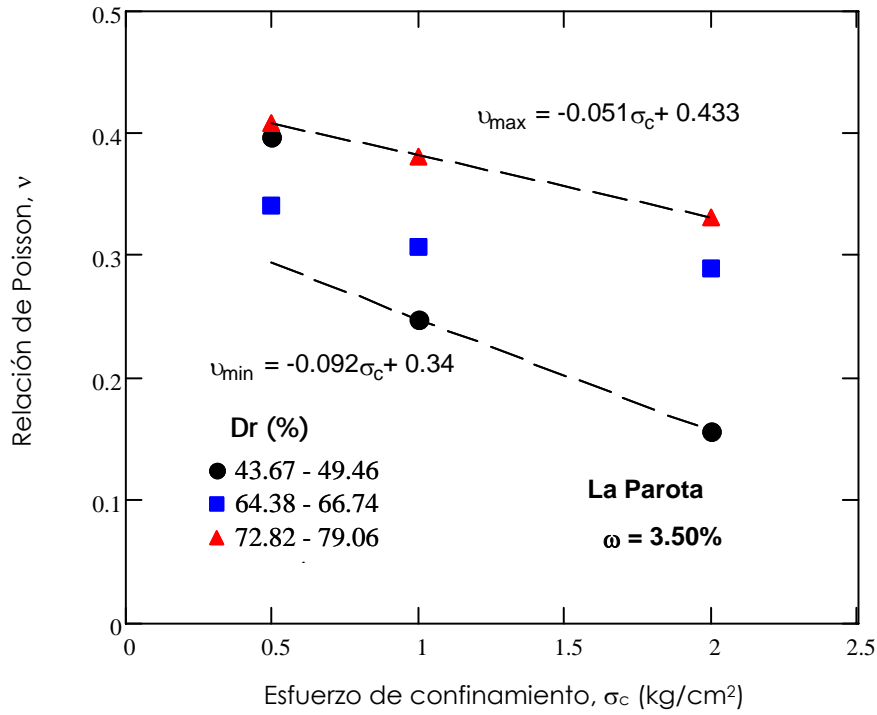
En la figura 4.11 d, se muestra un resumen del efecto del esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson para los ensayos realizados con los tres contenidos de agua, se establecieron las frontera máxima y mínima, siguiendo la tendencia de la dispersión de datos, obteniéndose que ambas son casi paralelas, presentando casi la misma pendiente, las ecuaciones que definen estas fronteras son las siguientes,  $v_{\max} = -0.087\sigma_c + 0.506$  y  $v_{\min} = -0.086\sigma_c + 0.33$ , la separación de los valores máximos y mínimos de  $v$ , considerando estas fronteras es de 0.17, de acuerdo con los resultados obtenidos se puede establecer que el esfuerzo de confinamiento tiene una influencia más incipiente en la relación de Poisson, que es la de disminuir conforme aumenta este factor.



a)



b)



d)

Figura 4.11 Variación de la relación de Poisson respecto al esfuerzo de confinamiento, con diferentes contenidos de agua

#### 4.3.1.4 Relación de Poisson obtenida por el método de regresión lineal múltiple, R.L.M.

Con el objetivo de generar una ecuación para determinar la relación de Poisson, en función de las variables de análisis que se plantearon en este trabajo, se utilizó el método de regresión lineal múltiple, estableciendo la relación de Poisson como variable dependiente, y como variables independientes la compacidad relativa,  $D_r$ , el contenido de agua,  $\omega$ , ambos valores en decimal y el esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Para realizar la regresión lineal se consideraron los datos de 26 de los 33 ensayos y con los datos de 4 ensayos se comprobó la ecuación obtenida.

La ecuación obtenida es la siguiente:

$$\nu = 0.351 - 0.069\sigma_c + 0.107D_r - 0.484\omega \quad (23)$$

Con esta expresión se pueden obtener valores de relación de Poisson de manera práctica para arenas con características similares al material de la Parota, con las siguientes consideraciones:

- Compacidad relativa,  $D_r =$  De 43.67 a 97.60%
- Contenido de agua,  $\omega =$  De 0 a 3.50%
- Esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c =$  De 0.5 a 2.0  $\text{kg}/\text{cm}^2$

En la figura 4.12 se muestran los valores de la relación de Poisson experimental y los valores obtenidos con la expresión determinada.

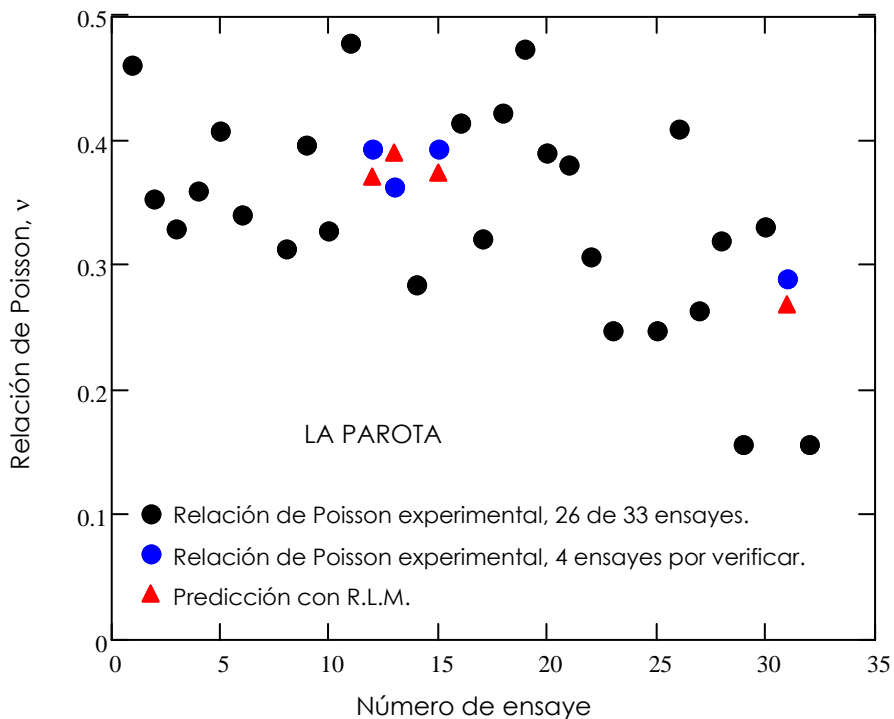


Figura 4.12 Relación de Poisson obtenidas con la ecuación de regresión lineal múltiple, para el material de La Parota

Considerando los resultados obtenidos se observa que de las tres variables de análisis, Densidad relativa,  $D_r$ , contenido de agua,  $w$ , y esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , ésta última es la que tiene mayor influencia en la determinación de la relación de Poisson,  $\nu$ .

En la figura 4.11d se obtuvieron fronteras máximas y mínimas para estimar la relación de Poisson,  $\nu$ , en función del esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ ; al determinar los valores medios de la relación de Poisson considerando dichas fronteras se observa lo siguiente:

Para materiales con características similares al material de La Parota, se pueden asignar valores de relaciones de Poisson dinámica promedio para condiciones no drenadas como se indica en la tabla 4.4 en la cual se señalan los valores promedio obtenidos de los resultados experimentales así como los valores promedio obtenidos con el procedimiento de regresión lineal múltiple para cada serie de probetas ensayadas con los mismos esfuerzos de confinamiento,  $\sigma_c$ , (0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>).

Tabla 4.4 Relación de Poisson promedio para el material La Parota

<b>LA PAROTA</b>		
$\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$\nu_p$	
	exp	RLM
0.5	0.36	0.38
1.0	0.33	0.33
2.0	0.23	0.28

$\nu_p$  = Relación de Poisson promedio

exp= Valores obtenidos en los ensayos experimentales

RLM= Valores obtenidos por Regresión Lineal Múltiple, ec. 23

### 4.3.2 Material SP-Arena limosa (Los Jales)

Se realizaron 18 ensayos triaxiales tipo UU, variando al igual que con el material de La Parota, el contenido de agua (de 0 a 6.5%, los cuales se determinaron de acuerdo con la figura 3.6 para obtener la mayor relación de vacíos), la compactación relativa (de 38.88 a 98.74%, y el esfuerzo de confinamiento (de 0 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>).

La tabla 4.5 muestra los ensayos realizados, las características de los mismos como lo son compactación relativa, contenido de agua y dimensiones de la probeta.

En la figura 4.13 se presenta la variación del Peso Volumétrico Seco Máximo, ( $\gamma_d$ ), en relación con la Compactación Relativa Inicial,  $Dr_{cv}$ , se observa que para las muestras de Los Jales ensayadas con contenidos de agua del 0.0 %, alcanzan Pesos Volumétricos Secos Máximos, ( $\gamma_d$ ), de 1.73 a 1.86 T/m<sup>3</sup> con compactaciones relativas iniciales  $Dr_{cv}$ , en el intervalo de 84.20 a 96.99 %.

Para las muestras del material de Los Jales ensayadas con contenido de agua de 6.5 %, le corresponden Pesos Volumétricos Secos Máximos en el rango de 1.35 a 1.53 T/m<sup>3</sup>, con compactaciones relativas iniciales de 31.11 a 60.33 %.

Tabla 4.5 Ensayos realizados con el material Los Jales

No.	DATOS DE LA PROBETA							PARÁMETROS DE ENSAYE		
	D <sub>0</sub> cm	H <sub>0</sub> cm	W <sub>m</sub> g	$\omega$ %	A <sub>m</sub> cm <sup>2</sup>	$\gamma_m$ g/cm <sup>3</sup>	Dr <sub>cc</sub> %	P <sub>p</sub> kg	$\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$\omega$ %
1	10.14	25.80	3865.00	0.00	80.75	1.86	97.90	6.00	0.50	0.00
2	10.13	25.75	3766.40	0.00	80.60	1.81	93.56	2.00	0.50	0.00
3	10.14	25.70	3658.28	0.00	80.75	1.76	88.30	0.50	0.50	0.00
4	10.14	25.80	3865.00	0.00	80.75	1.86	98.06	6.00	1.00	0.00
5	10.12	25.65	3630.00	0.00	80.44	1.76	88.55	2.00	1.00	0.00
6	10.07	25.70	3538.46	0.00	79.64	1.73	85.56	0.50	1.00	0.00
7	10.14	25.80	3865.00	0.00	80.75	1.86	98.74	6.00	2.00	0.00
8	10.12	25.70	3663.00	0.00	80.44	1.77	90.47	2.00	2.00	0.00
9	10.09	25.70	3585.60	0.00	79.96	1.74	87.92	0.50	2.00	0.00
10	10.15	25.75	3377.30	5.93	80.91	1.62	60.54	6.00	0.50	6.50
11	10.03	25.75	3110.84	6.97	79.01	1.53	46.26	2.00	0.50	6.50
12	9.52	25.75	2677.80	6.76	71.18	1.46	38.88	0.50	0.50	6.50
13	10.14	25.75	3395.51	6.46	80.75	1.63	61.83	6.00	1.00	6.50
14	10.00	25.70	3063.92	6.49	78.54	1.52	47.08	2.00	1.00	6.50
15	9.49	25.70	2598.82	6.07	70.73	1.43	39.32	0.50	1.00	6.50
16	10.09	25.75	3365.50	6.72	79.96	1.63	62.78	6.00	2.00	6.50
17	10.04	25.75	3091.80	6.67	79.17	1.52	48.45	2.00	2.00	6.50
18	9.37	25.60	2682.50	6.48	68.96	1.52	49.04	0.50	2.00	6.50



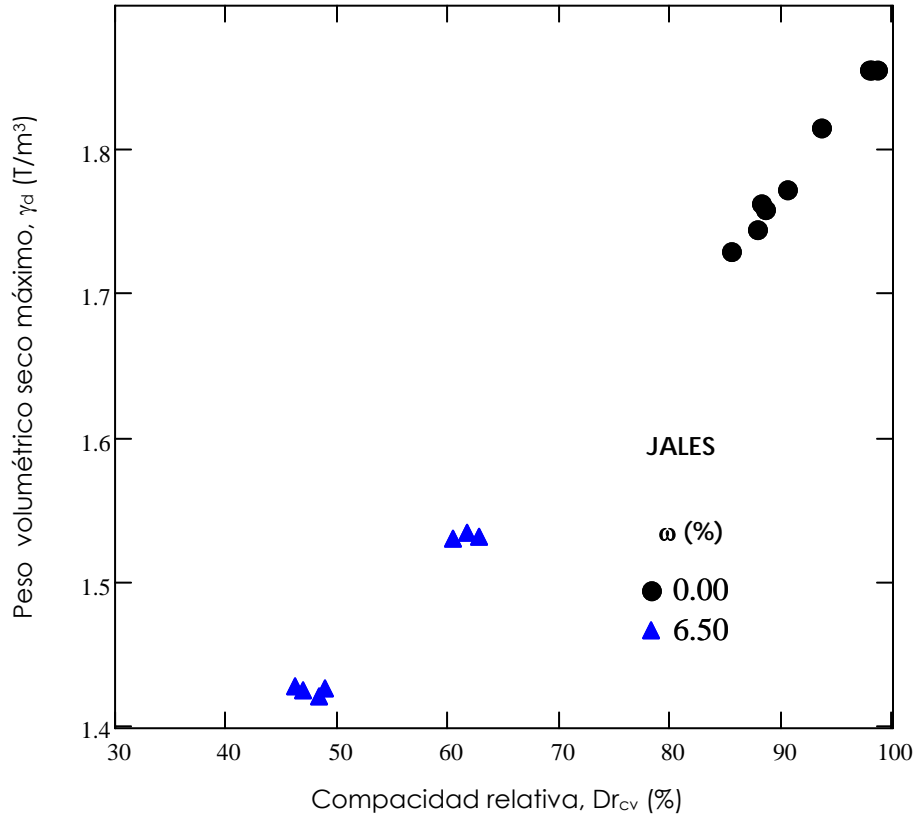


Figura 4.13 Relación del Peso Volumétrico Seco Máximo y la Compacidad relativa inicial, para el material de Los Jales

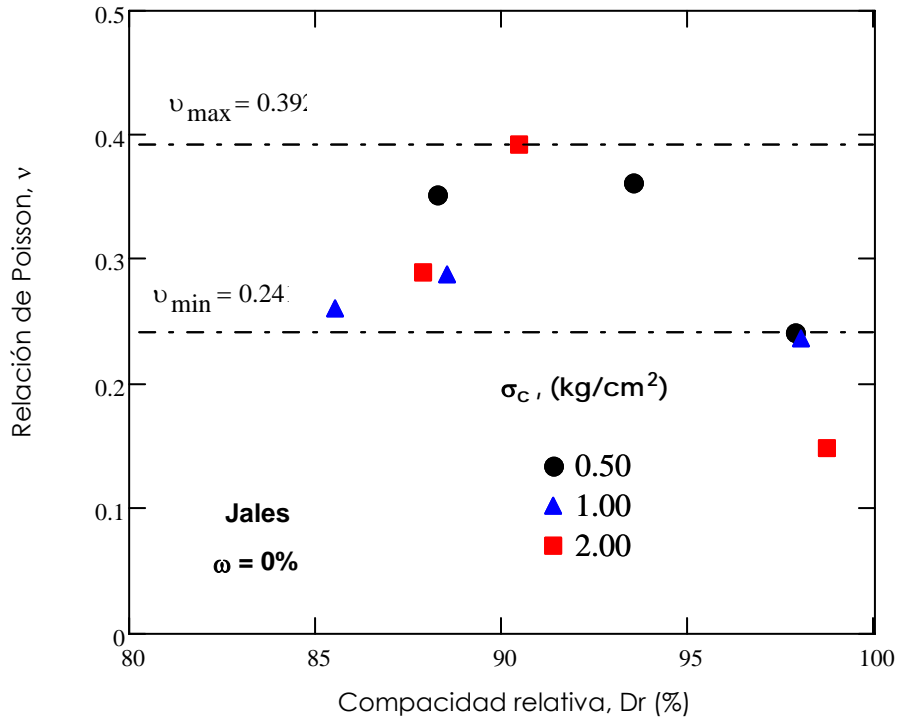
#### 4.3.2.1 Efecto de la compacidad relativa.

En la figura 4.14a se presentan los resultados de los ensayos con el material en estado seco, las muestras ensayadas con confinamiento de 0.50 kg/cm<sup>2</sup>, presentan las siguientes densidades relativas: 88.30, 93.56 y 97.90 %, siendo las más densas, con valores de relación de Poisson de 0.35, 0.36 y 0.24, para las muestras ensayadas con 1.0 kg/cm<sup>2</sup> de confinamiento las probetas presentan un rango similar de  $Dr$  a las ensayadas con 0.5 kg/cm<sup>2</sup>, de 85.5 a 98%, presentando poca variación en la relación de Poisson de 0.23 a 0.28, para los ensayos realizados con 2.0 kg/cm<sup>2</sup> de confinamiento presenta una mayor dispersión en la relación de Poisson en el rango de 0.39 a 0.15, para compacidades relativas de 90.47 y 98.74, respectivamente, en los tres casos de confinamiento se observa que el incremento de la compacidad relativa no influye notoriamente en la variación de la relación de Poisson, no obstante de la dispersión de datos se puede establecer que los valores obtenidos de Poisson se encuentran en el rango de 0.24 a 0.39.

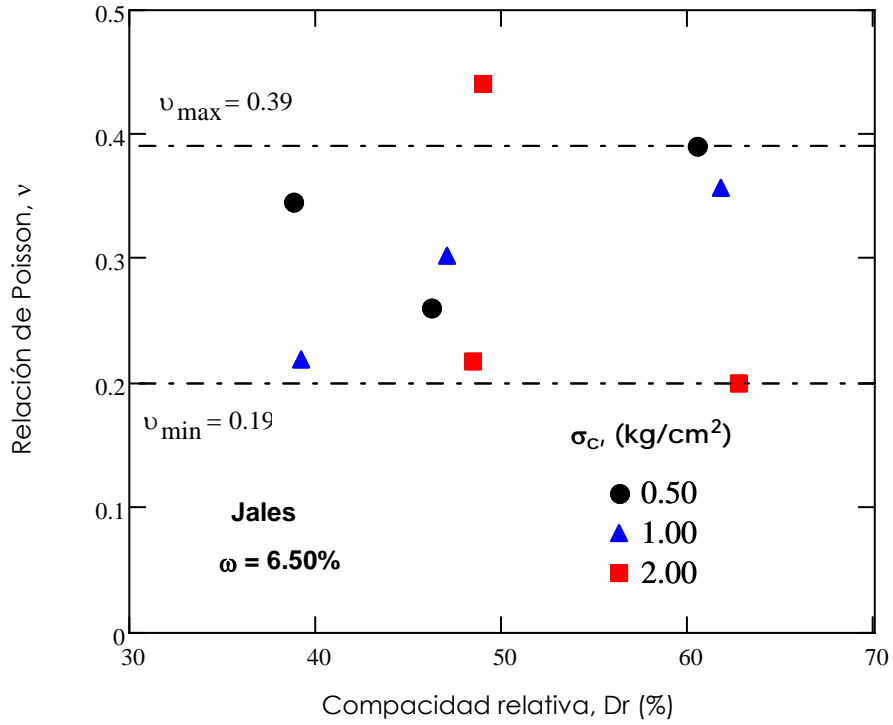
Para las muestras ensayadas con el segundo contenido de agua de 6.5 %, se observa que para los tres esfuerzos de confinamiento, 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, las compacidades relativas obtenidas se encuentran en el rango de 38 a 62%, con valores de relación de Poisson en el intervalo de 0.20 a 0.40, al igual que para el material en condición seca la

variación de la relación de Poisson no presenta una tendencia definida con la variación de la compacidad relativa, figura 4.14b.

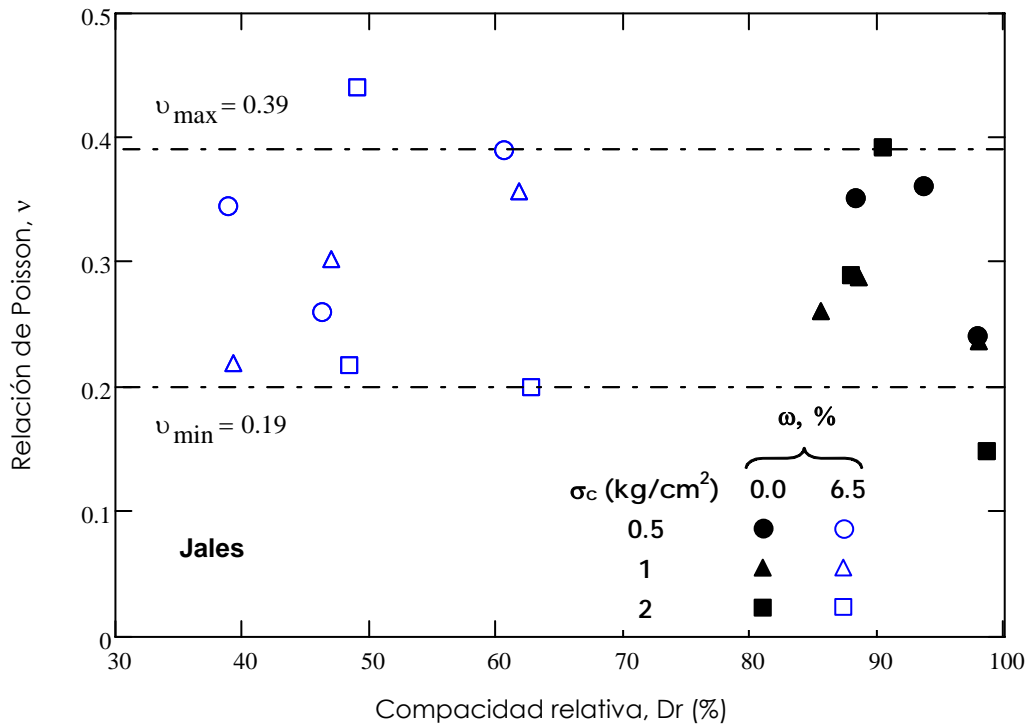
En la figura 4.14c, se muestra los resultados de los ensayos obtenidos para los dos contenidos de agua, 0 y 6.5%, en donde se aprecia que el intervalo de densidades relativas es de 38 a 98%, con valores de relación de Poisson de 0.19 a 0.39, sin presentar una tendencia definida.



a)  $\omega = 0\%$



b)  $\omega = 6.50\%$



c) Resumen de ensayos realizados con el material de Jales

Figura 4.14 Variación de la relación de Poisson respecto a la compacidad relativa, con diferentes contenidos de agua, para el material de Los Jales

#### 4.3.2.2 Efecto del contenido de agua.

Debido a que solamente se utilizaron dos contenidos de agua para este material, 0 y 6.5%, se obtuvieron rangos de densidades relativas bajos (de 38 a 62%) y altos (de 88 a 97%), no se tiene la suficiente variación tanto de contenido de agua como de densidades relativas, en un rango más completo para establecer el análisis de la variación de la relación de Poisson con respecto al contenido de agua,  $\omega$ .

#### 4.3.2.3 Efecto del esfuerzo de confinamiento.

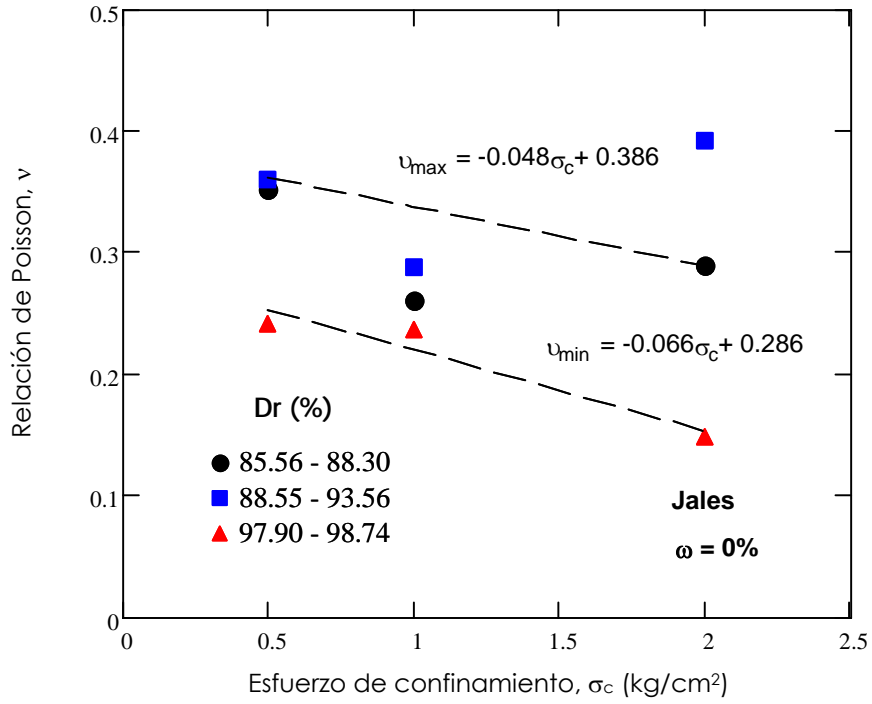
Con la finalidad de establecer el efecto del esfuerzo de confinamiento, se siguió el mismo procedimiento que el utilizado con el material de La Parota, obteniendo las gráficas de la figura 4.15.

En la figura 4.15a, se observa la influencia del confinamiento para el material en estado seco, se puede establecer que para el rango de compacidades de 85.5 a 98.7%, se pueden definir dos fronteras para determinar los valores máximos y mínimos de relación de Poisson, definidas por las siguientes ecuaciones  $\nu_{\max} = -0.048\sigma_c + 0.386$ ,  $\nu_{\min} = -0.066\sigma_c + 0.286$ , obteniéndose variaciones entre las fronteras de 0.10 para un  $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  y de 0.13 para un  $\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ , se observa que la relación de Poisson tiende a disminuir conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento.

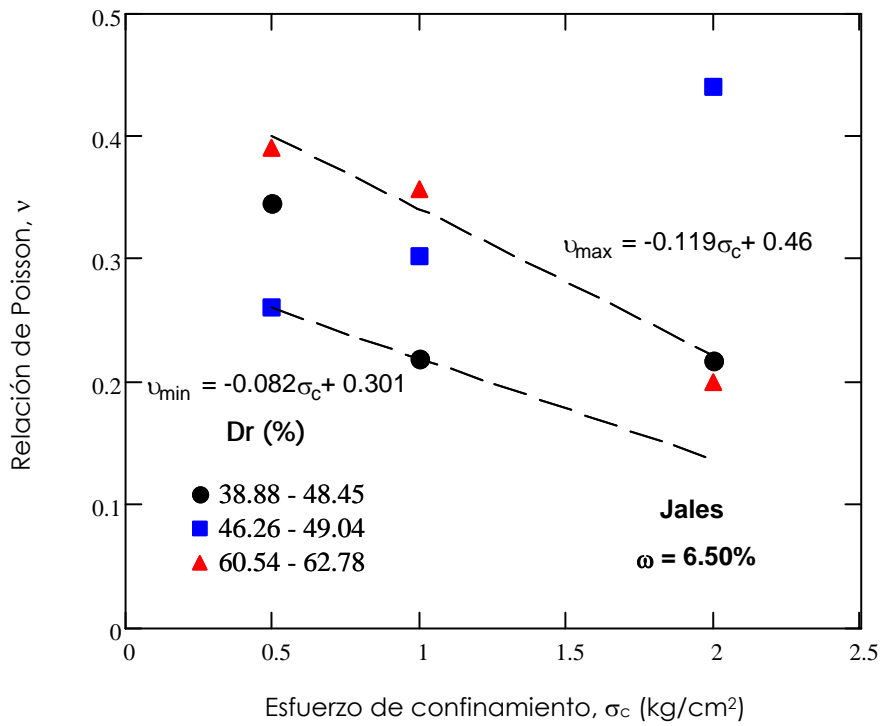
Los valores de relación de Poisson obtenidos para el material ensayado con 6.5% de contenido de agua presenta de igual forma una tendencia a disminuir con el incremento del confinamiento como se puede observar en la figura 4.15b, con los datos obtenidos se establecieron las fronteras máximas y mínimas, definidas por las siguientes ecuaciones:  $\nu_{\max} = -0.119\sigma_c + 0.46$ ,  $\nu_{\min} = -0.082\sigma_c + 0.301$ , con variaciones entre las fronteras de 0.14 para un  $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  y de 0.085 para un  $\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ .

Los resultados con ambos contenidos de agua se pueden observar de manera resumida en la figura 4.15c, en donde se observa que las fronteras definidas son casi paralelas, establecidas por las siguientes ecuaciones:  $\nu_{\max} = -0.06\sigma_c + 0.423$ ,  $\nu_{\min} = -0.063\sigma_c + 0.277$ , con una separación entre las fronteras de 0.14.

De acuerdo con lo observado se puede establecer que la variación de la relación de Poisson presenta una tendencia más definida con la variación del esfuerzo de confinamiento, y que la afectación de la compacidad relativa no es muy relevante.



a)



b)

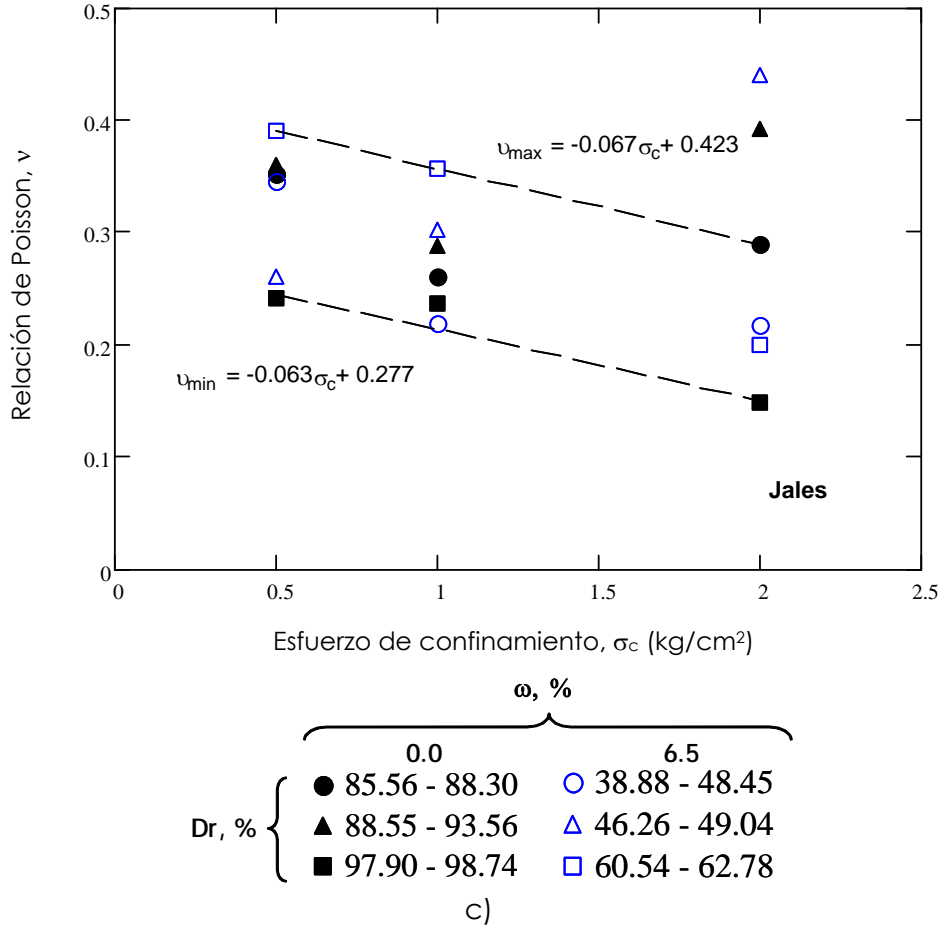


Figura 4.15 Variación de la relación de Poisson respecto al esfuerzo de confinamiento, con diferentes contenidos de agua, material Los Jales

#### 4.3.2.4 Relación de Poisson obtenida por el método de regresión lineal múltiple, R.L.M.

Siguiendo el mismo procedimiento que el utilizado el material de La Parota, se realizó el análisis de regresión lineal múltiple con los resultados de 14 de los 18 ensayos del material de Los Jales, y se comprobó la ecuación obtenida con los datos de 4 ensayos, la ecuación obtenida es la siguiente:

$$\nu = 0.327 - 0.025\sigma_c - 0.017D_r + 0.174\omega \quad (24)$$

Con esta expresión se pueden obtener valores de relación de Poisson de manera práctica para arenas con características similares al material de Los Jales, con las siguientes consideraciones:

- Compacidad relativa,  $D_r =$  De 38.88 a 98.74%
- Contenido de agua,  $\omega =$  De 0 a 6.50%
- Esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c =$  De 0.5 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>

En la figura 4.16 se muestran los valores de la relación de Poisson experimental y los valores obtenidos con la expresión determinada.

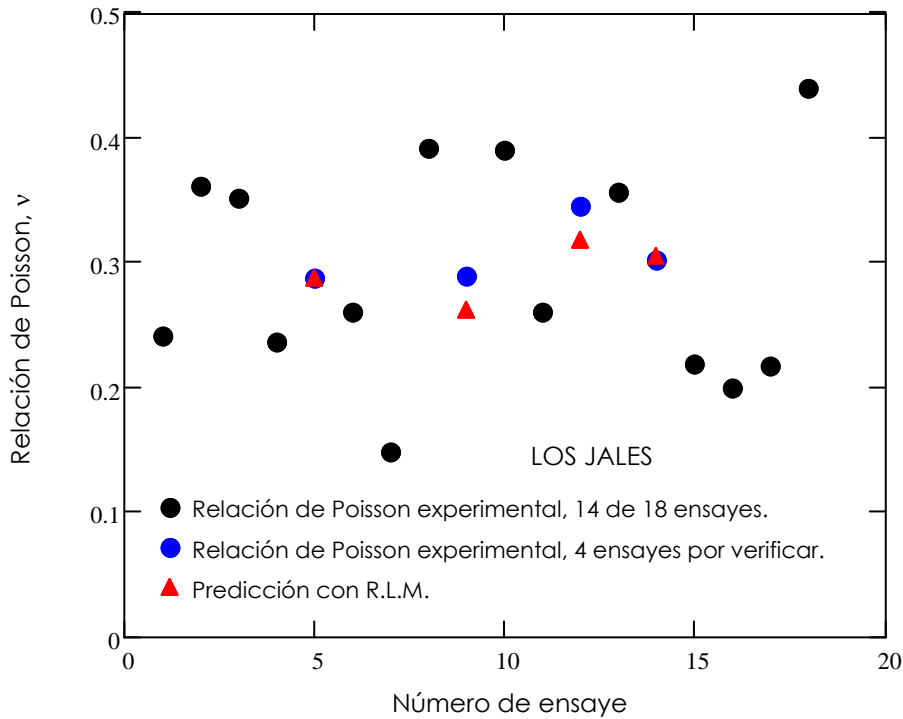


Figura 4.16 Relación de Poisson obtenidas con la ecuación de regresión lineal múltiple, para el material de Los Jales

Considerando los resultados obtenidos se observa que de las tres variables de análisis, Densidad relativa,  $D_r$ , contenido de agua,  $\omega$ , esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , esta última es la que tiene mayor influencia en la determinación de la relación de Poisson,  $\nu$ .

En la figura 4.15c se obtuvieron fronteras máximas y mínimas para estimar la relación de Poisson,  $\nu$ , en función del esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ ; al determinar los valores medios de la relación de Poisson considerando dichas fronteras se observa lo siguiente:

Para materiales con características similares al material de Los Jales, se pueden asignar valores de relaciones de Poisson dinámica promedio para condiciones no drenadas como se indica en la tabla 4.6 en la cual se señalan los valores promedio obtenidos de los resultados experimentales así como los valores promedio obtenidos con el procedimiento de regresión lineal múltiple para cada serie de probetas ensayadas con los mismos esfuerzos de confinamiento,  $\sigma_c$ , (0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>).

Tabla 4.6 Relación de Poisson promedio para el material Los Jales

$\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$\nu_p$	
	exp	RLM
0.5	0.31	0.31
1.0	0.28	0.29
2.0	0.22	0.27

$\nu_p$  = Relación de Poisson promedio

exp= Valores obtenidos en los ensayos experimentales

RLM= Valores obtenidos por Regresión Lineal Múltiple, ec. 24

De acuerdo con los resultados de algunos investigadores (Hoque *et al.*, 1996; Chaudhary *et al.*, 2003), la influencia del esfuerzo de confinamiento no es muy significativa en la variación de la relación de Poisson,  $\nu$ , no obstante, los resultados obtenidos en este trabajo indican una tendencia a disminuir la relación de Poisson, al aumentar el esfuerzo de confinamiento, presentando valores de 0.45 a 0.15, para el material de La Parota, figura 4.11; y de 0.40 a 0.15 para el material de Los Jales, figura 4.15; este comportamiento coincide con los trabajos de los autores Fawaz *et al.*, 2002 y Valle, 2006, en los cuales el intervalo que oscila la relación de Poisson,  $\nu$ , es de 0.45 a 0.23, para el primer autor, figura 1.25, mientras que el segundo autor reporta valores de Poisson,  $\nu$ , de 0.28 a 0.18, figura 1.32.

En la tabla 4.7 se indica la comparativa de los resultados obtenidos en este trabajo con otros estudios, considerando la influencia del esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , en la determinación de la relación de Poisson,  $\nu$ .

Tabla 4.7 Comparativa de los resultados obtenidos en este trabajo con otros estudios, ( $\sigma_c, \nu$ )

$\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	Resultados de este trabajo $\nu$	Fawaz, et al., 2002 $\nu$	Valle, 2006 $\nu$	Arena
0.5-2.0	0.45-0.15			La Parota, Guerrero, México
0.5-2.0	0.39-0.15			Los Jales, SLP, México
0.5-4.0		0.46-0.24		Hostun, Francia
0.3-3.9			0.28-0.18	Austin, Texas



En relación con la compacidad relativa Tsukamoto *et al.*, 2002, desarrollaron un trabajo comparativo en donde se puede apreciar que la relación de Poisson se mantiene en un intervalo entre 0.25 a 0.40, presentando una gran dispersión de valores sin seguir algún patrón definido para un grado de saturación entre 0 y 20%, para densidades relativas de 30, 40, 60 y 70%, lo cual indica que este parámetro no tiene una influencia muy fuerte en la variación de la relación de Poisson, figura 1.21.

Las muestras ensayadas para este trabajo de investigación se formaron con un grado de saturación entre 0 y 20%, obteniendo valores de Poisson entre 0.24 y 0.41 para el material de La Parota, figura 4.9, y valores entre 0.20 y 0.39 para el material de Los Jales, figura 4.14. Los valores de relación de Poisson obtenidos para ambos materiales no presentan alguna tendencia definida al aumentar la compacidad relativa, con base en lo anterior se concluye que este parámetro no presenta una influencia importante en la variación de la relación de Poisson. En la tabla 4.8 se indica la comparativa de los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos por Tsukamoto *et al.*, 2002., considerando la influencia de la compacidad relativa,  $D_r$ , en la determinación de la relación de Poisson,  $\nu$ .

Tabla 4.8 Comparativa de los resultados obtenidos en este trabajo con otros estudios, ( $D_r$ ,  $\nu$ )

Estudio realizado	$D_r$ , %	B, %	$\nu$	Arena
Resultados de este trabajo	32-97	0-20	0.24-0.41	La Parota, Guerrero México
Resultados de este trabajo	38-98	0-20	0.19-0.39	Los Jales, SLP, México
Tsukamoto <i>et al.</i>	30-70	0-20	0.22-0.44	Toyoura, Japón



## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se desprenden las siguientes conclusiones:

### INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO

Los desplazamientos axiales cíclicos que se pueden aplicar en el equipo triaxial, son generados por señales producidas por un equipo hidráulico; dicho equipo permitió aplicar valores de semiamplitud de 0.05mm, al aplicar esta semiamplitud en los especímenes ensayados con alturas de 260 mm, se obtienen deformaciones unitarias axiales del orden de 0.02%. Dado lo anterior fue posible estimar la relación de Poisson,  $\nu$ , en condiciones dinámicas para distorsiones más pequeñas que las generadas en probetas de menor altura y con esto garantizar que se encuentra en el rango elástico.

### FORMACIÓN DE LA MUESTRA

Durante el proceso de formación, montaje y ensaye, la probeta sufre en esencia dos procesos de densificación:

#### Durante la aplicación de vacío

Para mantener la estructura de la probeta, la máxima densificación se presentó en probetas con compacidades relativas iniciales de 20% incrementándose a 40%, para las probetas con compacidades relativas iniciales mayores a 60% no se presenta una gran influencia.

#### Durante la aplicación del esfuerzo de confinamiento, $\sigma_c$

Al retirar el vacío y aplicar el confinamiento las probetas sufren la segunda densificación la cual fue cuantificada del orden de 4 al 30%, para ambos materiales.

La influencia de las variables de análisis en la determinación de la relación de Poisson se indica a continuación:

#### Efecto de la Compacidad Relativa, $D_r$

##### La Parota

Para las muestras con contenido de agua  $\omega = 0$  y 3.5%, no se presentó una tendencia marcada de la variación de Poisson al aumentar la compacidad relativa,  $D_r$ , para las muestras ensayadas con  $\omega = 2.50$  % se presentó una disminución de la relación de Poisson.

Se observó que la variación de la compacidad relativa no es un parámetro muy influyente en la determinación de la relación de Poisson, presentando valores del orden de 0.25 a 0.42, para valores de  $D_r$  de 32 a 97%.

## Los Jales

De manera similar a los resultados obtenidos para el material de La Parota se observó que el intervalo de densidades relativas es de 38 a 98%, con valores de relación de Poisson de 0.19 a 0.39.

Los valores de la relación de Poisson,  $\nu$ , obtenidos en ambos materiales ensayados no presentaron una tendencia definida al incrementar la densidad relativa,  $D_r$ , este comportamiento concuerda con los resultados reportados por Tsukamoto *et al.*, 2002.

## Efecto del contenido de agua, $\omega$

### La Parota

Con base en los resultados obtenidos se observó que al aumentar el contenido de agua,  $\omega$ , de 1.0 a 2.5% se obtuvieron incrementos en la relación de Poisson; sin embargo, este comportamiento no se observó en las probetas en estado seco.

Los valores de Poisson obtenidos se encuentran en el rango de 0.26 a 0.40 para contenidos de agua,  $\omega$ , de 0, 1.0 y 2.5%.

## Efecto del esfuerzo de confinamiento, $\sigma_c$

### La Parota

De acuerdo con los resultados obtenidos se observó que este parámetro tiene una mayor influencia en la relación de Poisson, disminuyendo este último al aumentar el confinamiento, presentando una franja que tiende a disminuir con un ancho de 0.17.

## Los Jales

Los resultados obtenidos en este material indican que al igual que con el material de La Parota, la relación de Poisson presenta una tendencia a disminuir conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento, estableciendo dos franjas casi paralelas con una separación de 0.14.

La influencia del esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , en los valores de la relación de Poisson,  $\nu$ , obtenidos en este trabajo concuerdan con las tendencias reportadas por Fawaz, *et al.*, 2002 y por Valle, 2006.

## RECOMENDACIONES

La instrumentación que se realizó en la cámara triaxial cíclica con sensores de desplazamiento radial y axial es una manera alterna para poder determinar parámetros dinámicos en suelos, como lo son la relación de Poisson,  $\nu$ , Módulo de Elasticidad,  $E$ , Módulo de rigidez al cortante dinámico,  $G$ ; la instrumentación de la cámara permite ensayar cíclicamente especímenes y conocer la relación de Poisson,  $\nu$ , en sus tercios superior, medio e inferior, esta versatilidad de mediciones permitirá determinar con más precisión los parámetros a investigar en la totalidad de la muestra.

Esta instrumentación experimental puede permitir el desarrollo de líneas de investigación para describir las relaciones esfuerzo deformación en suelos.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Gokhan Inci *et al.*, (2001) y Tsukamoto, *et al.*, (2002), el grado de saturación de las muestras tiene una influencia considerable en la variación de la relación de Poisson,  $\nu$ , para abundar los resultados obtenidos en este trabajo, sería enriquecedor desarrollar otra línea de investigación realizando ensayos con mayor variación en el grado de saturación,  $B$  y poder establecer su influencia en este tipo de materiales.





## REFERENCIAS

- **Airey, D. W. and Wood, D.M. 1987** "An evaluation of direct simple shear tests on clay", *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp 25-35.
- **Bates C. R., (1989)** "Dynamic soil property measurements during triaxial testing", *Geotechnique* 39, No. 4, 721-726.
- **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.
- **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.
- **Casagrande, A. y Shannon, W. L. (1948)**, "Stress deformation and strength characteristics of soils under dynamic loads", *Proc. of the second international conference on soil mechanics and foundations engineering, Rotterdam*, Vol. V, pp 29-34.
- **Cuccovillo T. y Coop R., 1997** "The measurement of local axial strains in triaxial tests using LVDTs", *Geotechnique* 47, No. 1, 167-171.
- **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.
- **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.
- **Díaz R. A., (2005)** "Dinámica de suelos", UNAM, Limusa.
- **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.
- **Dobry, R., Vasquez - Herrera, A., Mohammad, R. and Vucetic, M.(1985)**, "Liquefaction flow failure of silty sand by torsional cyclic test ", *Advances in the art of Testing Soils Under Cyclic Loading Conditions, ASCE, New York*, pp. 29 – 50.

- **Domenico, S.N., (1976)**, "Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated reservoir: Geophysics, 41, 882-894.
- **Drnevich, V. P., (1967)**, "Effect of strain history on the dynamic properties of sand", Ph. D. Dissertation, University of Michigan, 151 pp.
- **Drnevich, V. P., (1972)**, "Undrained cyclic shear of saturated sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM8, pp 807-825.
- **Fawaz, A., Boulon, M., y Flavigny, E. (2002)** "Parameters deduced from the pressuremeter test". Canadian Geotechnical Journal, Vol.39, November 2002, pp 1333-1340.
- **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., (2009)** "Módulo de rigidez y relación de Poisson dinámicos obtenidos de mediciones en la franja del tercio medio en probetas de suelo granular", Tesis doctoral, UNAM, enero.
- **Flores, O., (1996)**, "Propiedades dinámicas de jales", Tesis de maestría, División de estudios de posgrado, Facultad de ingeniería, UNAM.
- **Gazetas, G. (1991)**, "Foundation Vibrations", Foundation Engineering Handbook, Ch 15, H. Y. Fang, Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, NY, pp. 553 – 593.
- **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., and Sato, 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.
- **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.
- **Ishihara K., 1996** "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics", Oxford University Press.
- **Ishihara y Li, S., 1972** "Liquefaction of saturated sand in triaxial torsion shear test", *Soils and Foundations*, Vol. 12, No 2, pp. 19-39.
- **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.
- **Kovacs, W. D. and Leo, E. 1981**, "Cyclic simple shear of large-scale sand samples: Effects of diameter to height ratio" *Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Vol. 3, pp 897- 907.
- **Kramer Steven L. (1996)** "Geotechnical Earthquake Engineering", University of Washington.
- **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.
- **Marcuson, W. F. and Wahls, H. E., (1972)** "Time effects on dynamic shear modulus of clays", *Journal of Soils Mechanics and Foundations*, Div- ASCE, Vol. 98, No. SM12, USA, pp. 1359 - 1373.
- **Meyer, Z. y Kozlowski, T. (1998)** "Poisson coefficient analysis for organic soil", *Ground Improvement*, No. 2, pp 157-163.
- **Ran bachrach, Jack Dvorkin, and Amos M. Nur (2000)** "Seismic velocities and Poisson's ratio of shallow unconsolidates sands", *Geophysics*, Vol. 65, No. 2, (March - April 2000), pp 559-564
- **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.
- **Salem, H. S. (2000)** "Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments, determines from seismic compressional and shear wave velocities", *Geotechnique* 50, No. 4, 2000, pp 461-463.

- 
- **Stokoe, K.H. II, Hwang, H.K., Roesset, J.M., and Sun, C.W., (1994)**, "Laboratory Measurements of Small-Strain Material Damping Using a Free Resonant Column," Proceedings, Second International Conference on Earthquake Resistant Construction and Design, Berlin, Germany, June, pp.195-202.
  - **Strandenes, S., (1991)**, Rock physics analysis of the Brent Group Reservoir in the Oseberg Field: Stanford Rock Physics and Borehole Geophysics Project.
  - **Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., y Huang, Y. (2002)** "Resistance partly saturated and to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities" Soils and Foundations, Vol. 42, No. 6, December, pp 93-104.
  - **Vladimir Labudović (1984)** "The effect of Poisson's ratio on fracture height", Journal of Petroleum Technology, February 1984, pp 287-290.
  - **Valle C. (2006)** "Measurements of  $V_p$  and  $V_s$  in Dry, Unsaturated and Saturated Sand Specimens with Piezoelectric Transducers". Tesis doctoral, The University of Texas at Austin, USA.
  - **Yin, H., (1993)** "Acoustic velocity and attenuation of rocks: Isotropy, intrinsic anisotropy, and stress induced anisotropy". Ph. D. thesis, Stanford University.
  - **Zeevaert, L. (1983)** "Foundation Engineering For Difficult Subsoil Conditions". Second Edition, Van Nostrand Reinhold Company.

## **ANEXO 1**

### **RESULTADOS EXPERIMENTALES**



## ANEXO 1. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las tablas 4.3 y 4.5, del capítulo 4, se indican las características y parámetros de ensaye de los especímenes conformados con los materiales de La Parota y Los Jales, respectivamente, ensayados en la cámara triaxial MTS.

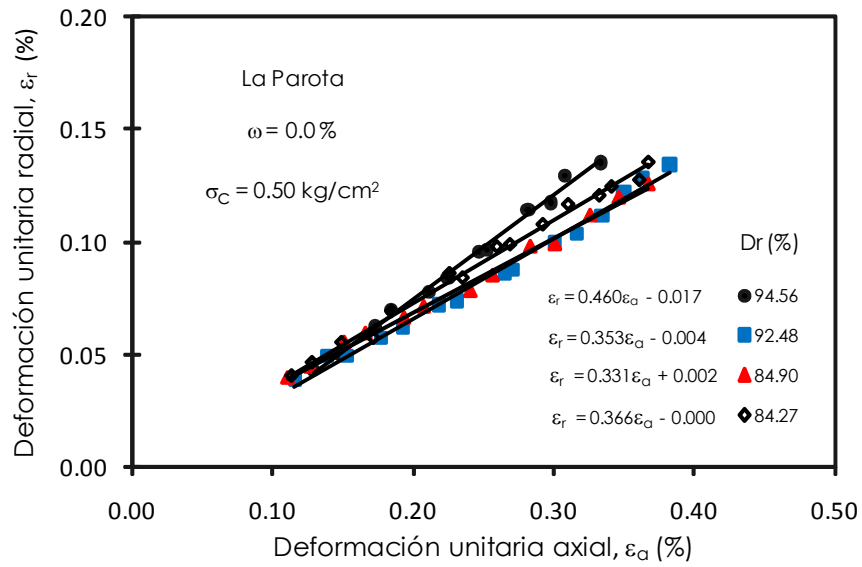
Las compacidades relativas indicadas en estas tablas,  $D_r$ , corresponden a los especímenes antes de aplicarles el esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ .

En la figura A1.1 se indica el efecto de la variación del esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_c$ , aplicado, (0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>), para los especímenes en estado seco,  $\omega = 0\%$ ; se elaboraron tres gráficas en las cuales se muestran los resultados obtenidos de dos a cuatro especímenes con diferentes compacidades relativas,  $D_r$ . De los resultados obtenidos de cada una de las muestras se realizó el procedimiento de regresión lineal, y se indican las ecuaciones de las rectas obtenidas, cuya pendiente corresponde a la relación de Poisson,  $\nu$ , de dicho espécimen.

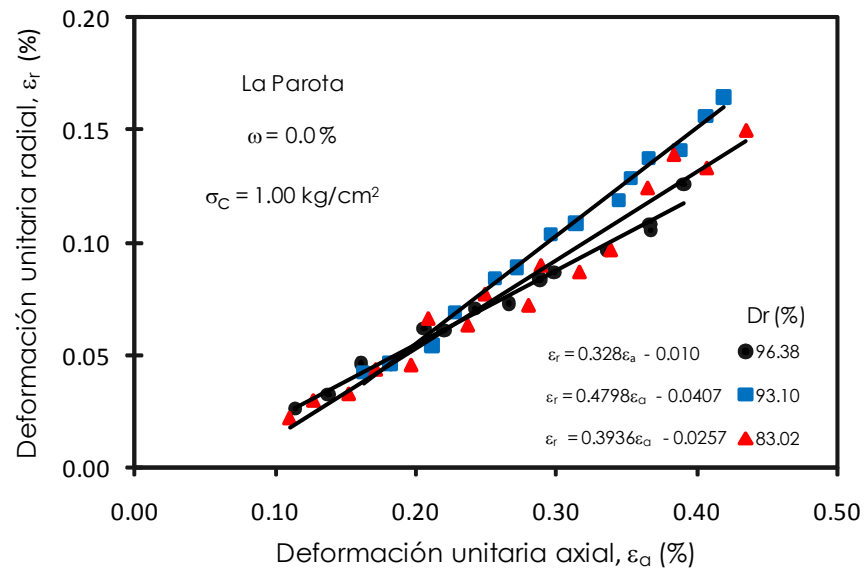
En las figuras A1.2 y A1.3 se presentan el mismo esquema de gráficos, para  $\omega$  de 2.5 y 3.5%, respectivamente, las gráficas A1.1, A1.2 y A1.3, muestran los resultados para los especímenes formados con el material de La Parota.

Las gráficas A1.4 y A1.5 corresponden a las probetas elaboradas con el material de Los Jales, se realizaron siguiendo el mismo planteamiento que las gráficas A1.1 a la A1.3, la gráfica A1.4, muestra el comportamiento de las probetas ensayadas en estado seco  $\omega = 0\%$ , mientras que la gráfica A1.5 muestra los resultados para los especímenes formados con  $\omega = 6.5\%$ .

La Parota

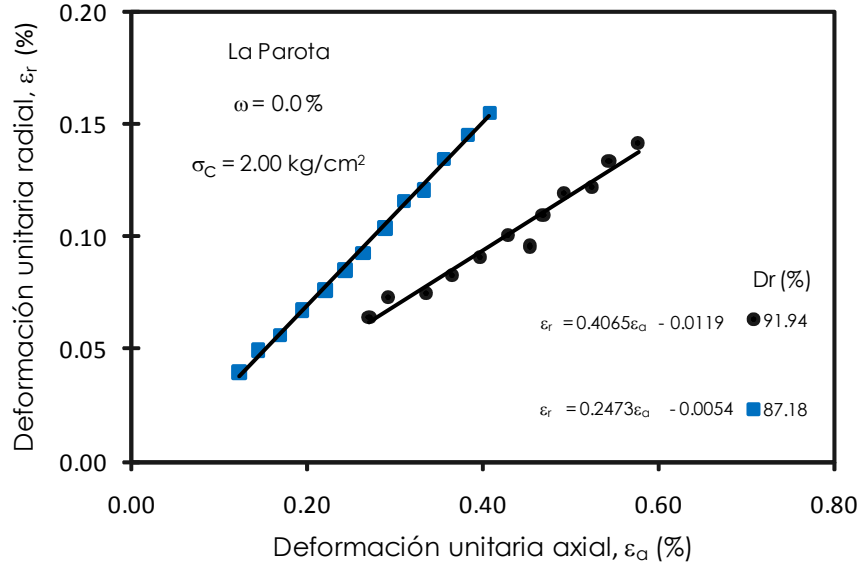


a).-  $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$



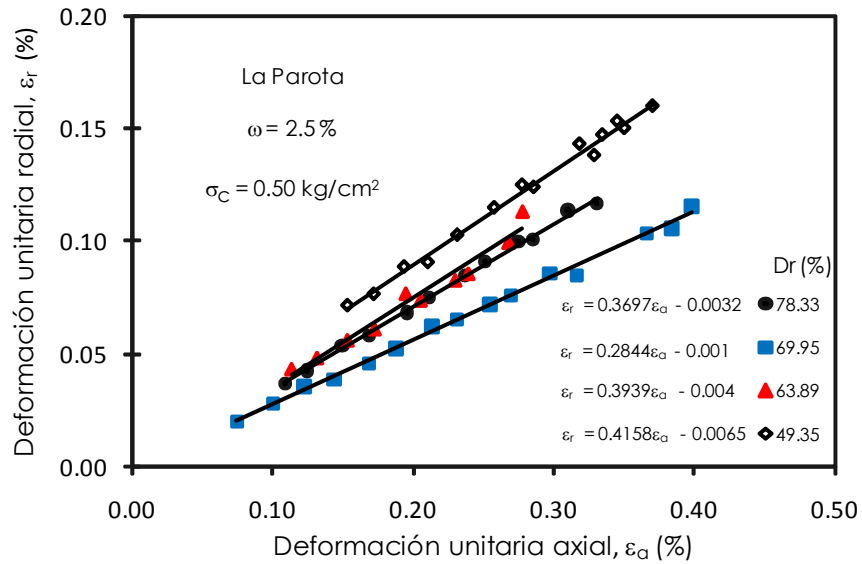
b).-  $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$



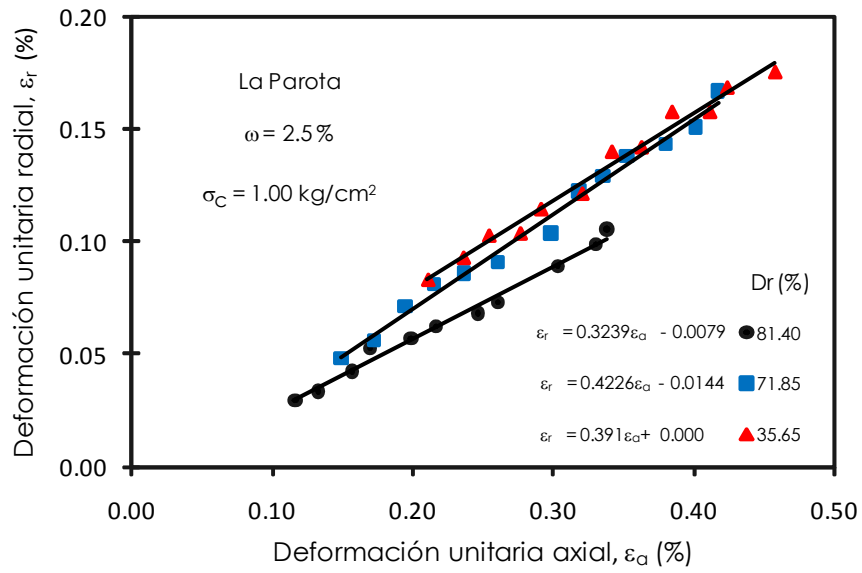


c).-  $\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

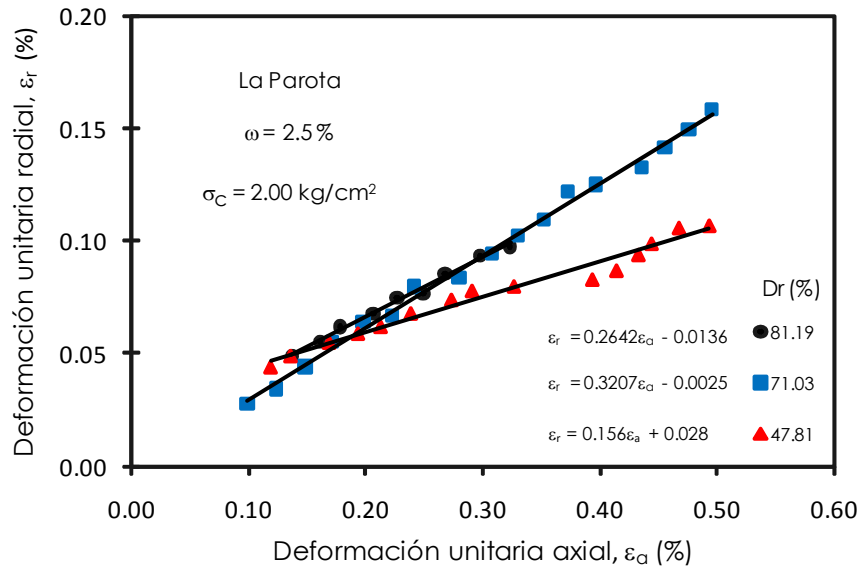
Figura A1.1 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para  $\omega = 0\%$ , La Parota



a).-  $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

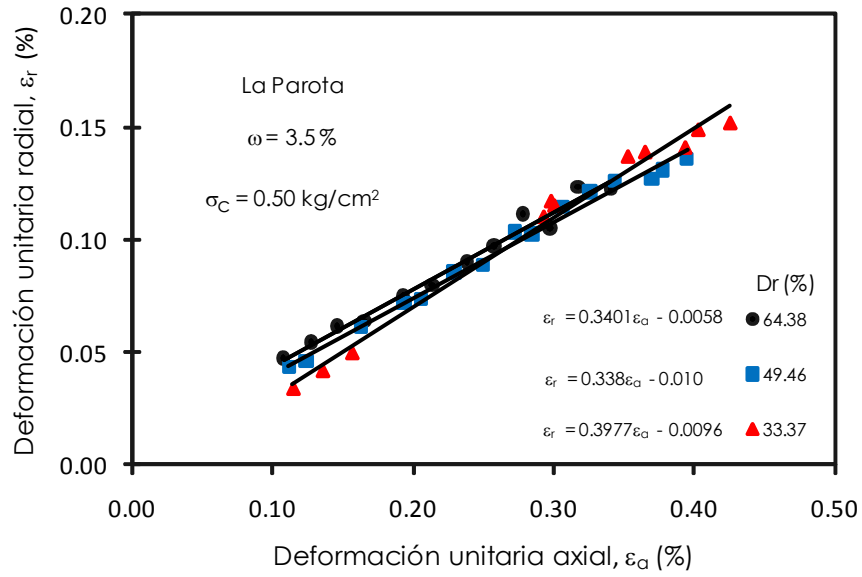


b).-  $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

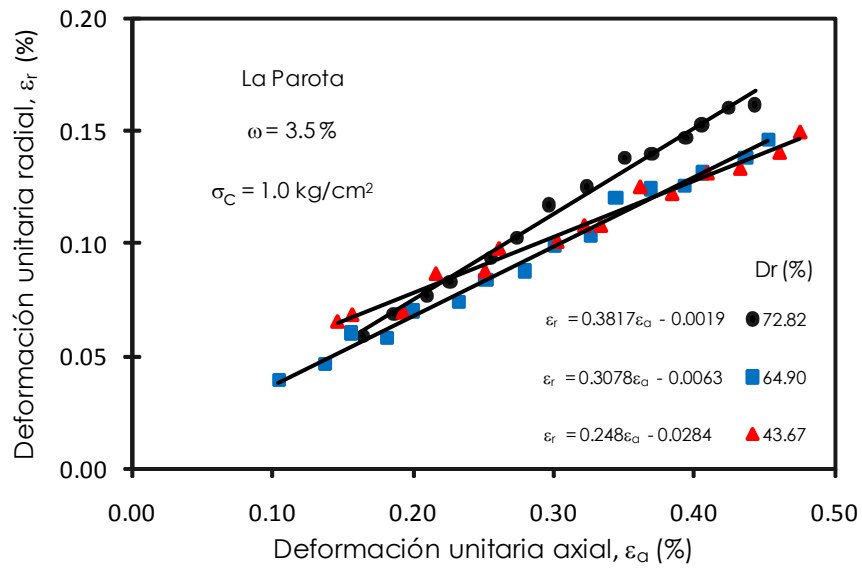


c).-  $\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

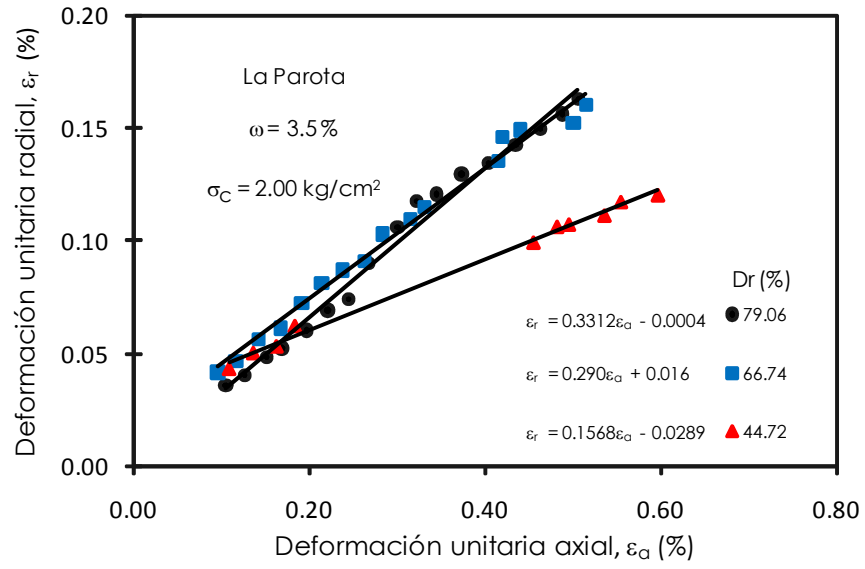
Figura A1.2 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para  $\omega = 2.5\%$ , La Parota



a).-  $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$



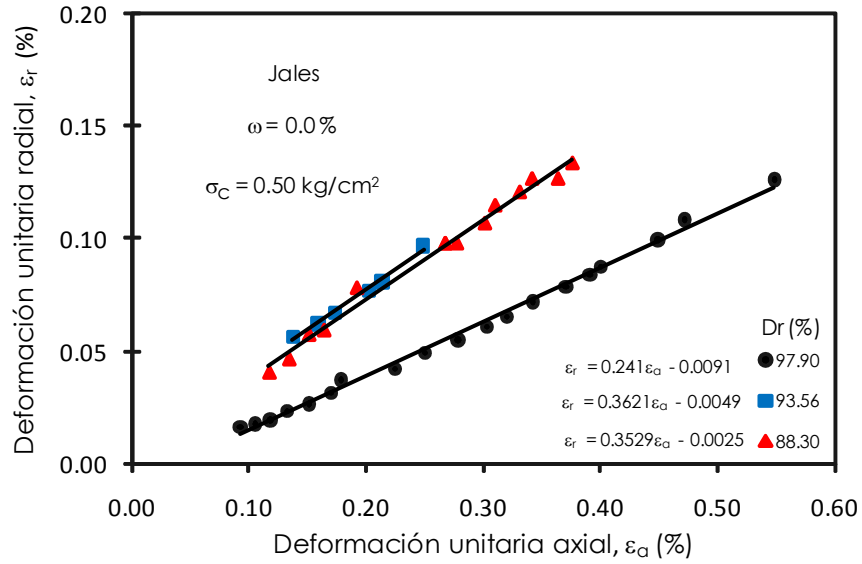
b).-  $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$



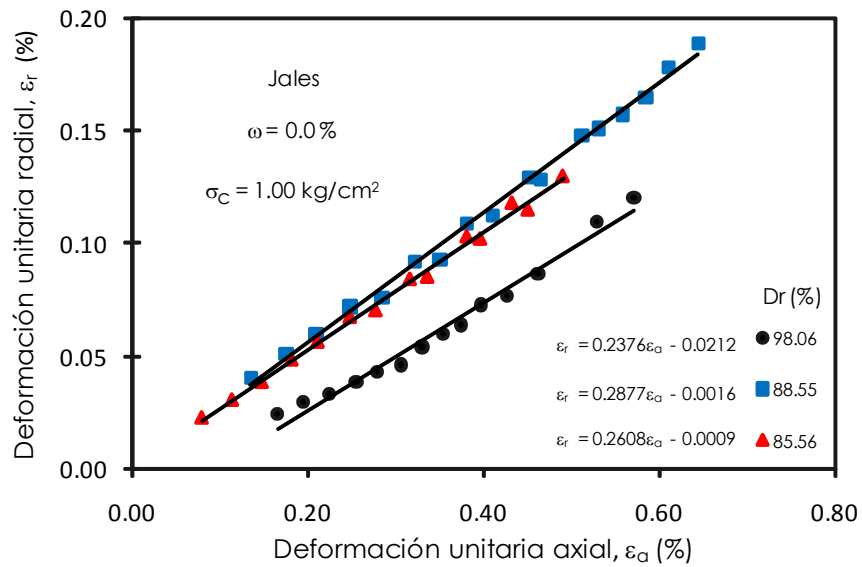
c).-  $\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

Figura A1.3 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para  $\omega = 3.5\%$ , La Parota

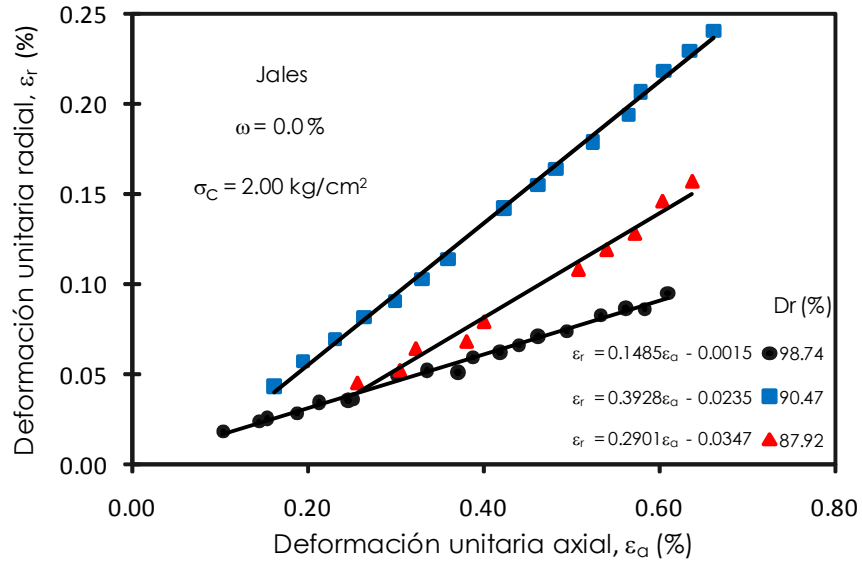
Jales



a).-  $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

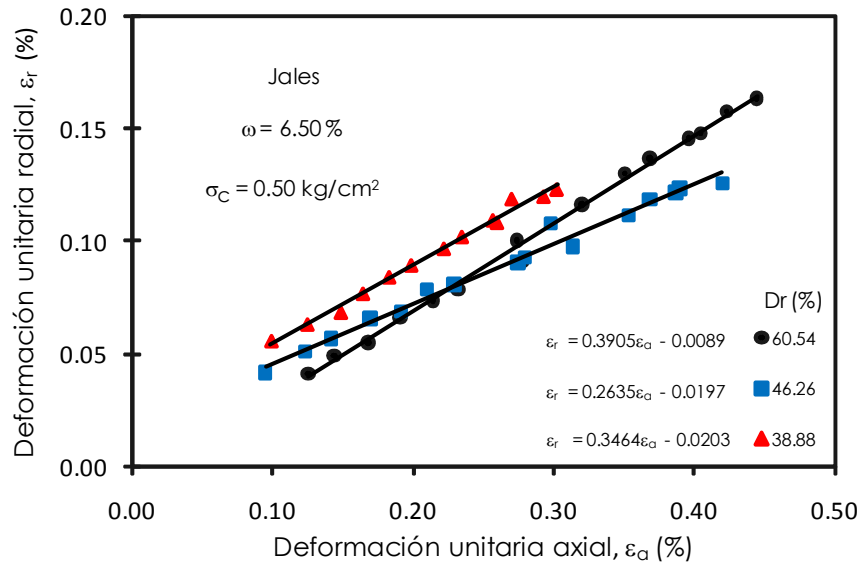


b).-  $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

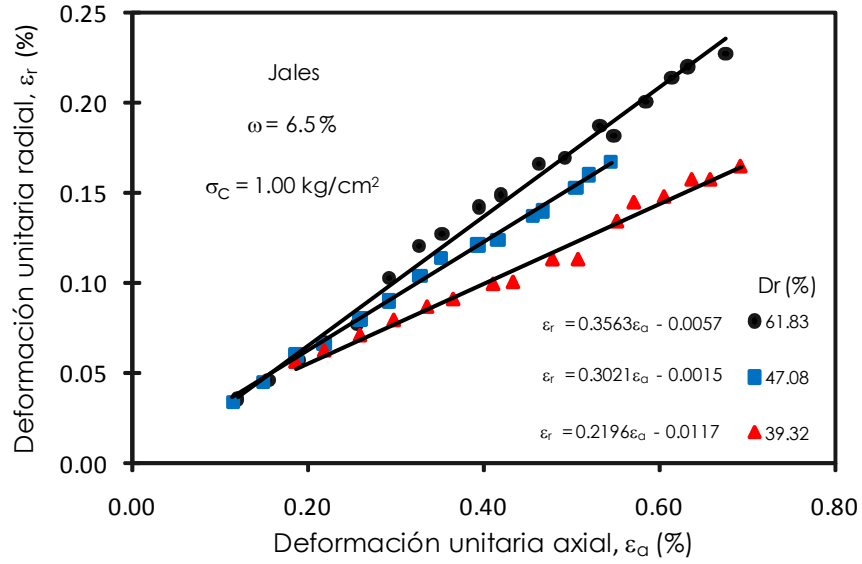


c).-  $\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

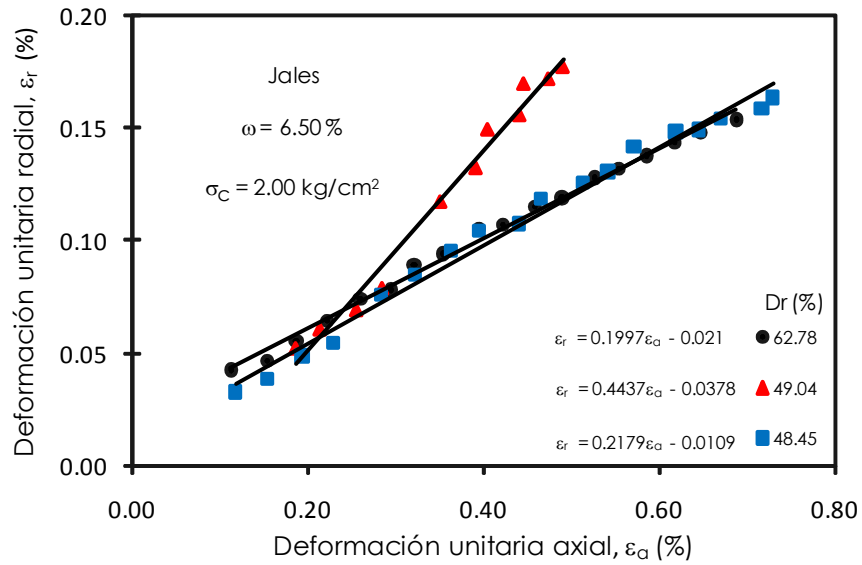
Figura A1.4 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para  $\omega = 0\%$ , Los Jales



a).-  $\sigma_c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$



b).-  $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$



c).-  $\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$

Figura A1.5 Efecto de la compacidad relativa en la relación de Poisson, para  $\omega = 6.50\%$ , Los Jales