



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE POISSON DINÁMICA EN SUELOS  
GRANULARES UTILIZANDO CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS Y  
MEDICIONES LOCALES

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. JESÚS ABEL SÁNCHEZ ARAMBURO

TUTOR:  
DR. OSVALDO FLORES CASTRELLÓN  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

MÉXICO, D. F., JUNIO DE 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Romo Organista Miguel Pedro.

Secretario: Dr. Ovando Shelley Efraín

Vocal: Dr. Flores Castellón Osvaldo

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Rivera Constantino Rigoberto

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Aguilar Becerril Héctor Raúl

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS

---

DR. FLORES CASTRELLÓN OSVALDO

# DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE POISSON DINÁMICA EN SUELOS GRANULARES UTILIZANDO CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS Y MEDICIONES LOCALES.

## ÍNDICE

	<u>Página</u>
Resumen .....	I
Objetivos.....	II
Nomenclatura .....	III
Lista de figuras .....	V
Lista de tablas .....	XV
Capítulo 1 ANTECEDENTES Y ESTUDIOS PREVIOS	
1.1. Introducción .....	1
1.1.1. Determinación de parámetros dinámicos en laboratorio.....	2
1.2. Funcionamiento de cristales piezoeléctricos (compresión y de flexión) .....	9
1.3. Estudios previos.....	11
Capítulo 2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN	
2.1 Características generales del equipo triaxial cíclico MTS.....	41
2.1.1 Sistema hidráulico de aplicación de carga.....	41
2.1.2 Panel de control .....	42
2.1.3 Sistema de aplicación de presión (confinante y contrapresión).....	43
2.1.4 Sistema automatizado, control y procesamiento de datos.....	44
2.1.5 Sistemas de mediciones locales en el tercio central de la probeta.....	44
2.2 Características del equipo de generación y de medición de ondas.....	45
2.2.1 Sistema automatizado del equipo (control de señal) .....	46
2.2.2 Generador de funciones.....	47
2.2.3 Osciloscopio .....	47
2.3 Instrumentación del equipo.....	48
2.4 Calibración del equipo .....	50
2.4.1 Calibración de sensores del equipo triaxial y de medición local .....	50
2.4.2 Calibración de equipo de generación y medición de ondas.....	55
2.5 Configuración de sistemas.....	57
2.5.1 Ensaye con el sistema de mediciones locales.....	58

	<u>Página</u>
2.5.2 Ensaye con el sistema de generación y medición de ondas.....	62
<b>Capítulo 3 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE</b>	
3.1 Descripción del material.....	64
3.2 Preparación y montaje de la probeta .....	65
3.2.1 Resultados de compactación .....	69
3.2.2 Relaciones de vacíos máxima y mínima de otras arenas .....	70
3.3 Procedimientos de ensaye e interpretación .....	71
3.4 Cálculo de parámetros .....	72
3.4.1 Relación de Poisson con el método de transmisión de ondas .....	72
3.4.2 Relación de Poisson con el método de medición local .....	73
<b>Capítulo 4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
4.1 Variación de la compacidad relativa en el proceso de la prueba.....	74
4.2 Comportamiento de señales compresibles p y cortantes s, en la variación de la frecuencia.....	75
4.3 Material sp-arena mal graduada (arena de sílice).....	78
4.4 Relación de Poisson con medición local (en el tercio central).....	79
4.5 Relación de Poisson con sistema de transmisión de ondas .....	80
4.6 Comportamiento de la variación de la relación de Poisson con ambos métodos.....	82
4.6.1 Efecto de la compacidad relativa.....	82
4.6.2 Efecto del contenido de agua .....	86
4.6.3 Comparación de la relación de Poisson, de los dos métodos aplicados en los ensayos .....	87
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>98</b>

## Resumen

Con el objetivo de determinar la relación de Poisson dinámica con cristales piezoeléctricos (elementos de expansión y de flexión) y compararlos con los obtenidos en el tercio central (implementación por Flores 2009) de probetas reconstituidas de suelos granulares, se instrumentó un equipo triaxial cíclico que opera con presión hidráulica, en el que es posible montar probetas de 10.14 cm de diámetro por 26 cm de altura. Dicha instrumentación consistió en instalar cristales piezoeléctricos (elementos de expansión y de flexión), los cuales fueron colocados en el pedestal y cabezal.

Se ensayó un material granular clasificado según el SUCS como *SP-Arena mal graduada*. La muestra de suelo se formó utilizando un método de compactación que consiste en formar la probeta en diez capas, con doce apisonadas aplicadas por peso propio por capa, utilizando un pisón de diámetro un poco mayor al radio de la muestra, con pesos que van de 0.50 a 6 kg-f y contenidos de agua en el suelo en un intervalo que cubre el correspondiente al óptimo.

Los ensayos se realizaron a desplazamiento controlado y se aplicaron veinte ciclos a una frecuencia de excitación de 1Hz. La semiamplitud de desplazamiento axial se incrementó entre cada serie de ciclos aplicados, hasta llevar a la probeta a la falla. Durante el ensaye se registró el desplazamiento axial en el cabezal superior y en las fronteras superior e inferior del tercio central, la deformación radial en la franja central, así como la carga axial en la base de la muestra. Previo al ensaye cíclico se realizaron los barridos con los elementos de expansión y flexión, con una amplitud de 200 voltios, con frecuencia de excitación de 4, 5, 6, 8 y 10 kHz.

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

## Objetivos

El objetivo general de la presente investigación es determinar la relación de Poisson, haciendo uso de dos metodologías experimentales: (I) medición local del desplazamiento axial y radial cíclico en el tercio central de la probeta de suelo y (II) medición de las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) y compresión ( $V_p$ ) con los cristales piezoeléctricos ubicados en la parte superior e inferior de la probeta de suelo.

Para alcanzar los objetivos planteados se definieron los siguientes objetivos particulares:

- Instrumentación del equipo triaxial cíclico MTS, con cristales piezoeléctricos para la determinación de las velocidades de onda de corte,  $V_s$ , y compresibles,  $V_p$ .
- Determinar el rango de la frecuencia óptima para el análisis del tiempo de arribo de dichas señales y calcular las velocidades de las mismas.
- Observar el comportamiento de ambas velocidades, con la variación del esfuerzo de confinamiento.
- Verificar el comportamiento de los resultados de la relación de Poisson con los dos métodos antes mencionados, variando el esfuerzo de confinamiento,  $\sigma$ , la compacidad relativa,  $D_r$ , y contenido de agua,  $\omega$ .

## Nomenclatura

%	Porcentaje
$\pi$	Pi
$\gamma_d$	Peso volumétrico seco
a	Aceleración de respuesta
$a_{m\acute{a}x}$	Aceleración de respuesta máxima
B	B de Skempton
BE	Elementos bender
CD	Prueba triaxial consolidada drenada
cm	Centímetro
CS	Desplazamiento en el cabezal
CU	Prueba triaxial consolidada no drenada
$D_{50}$	Diámetro en la curva granulométrica por debajo del cual se encuentra el 50% en peso de la muestra, en mm
	Distancia efectiva entre la señal emitida y la señal recibida.
$D_m$	Diámetro de muestra, mm
$D_r$	Compacidad relativa, %
$D_{r_{cv}}$	Compacidad relativa con vacío, %
$D_{r_{sv}}$	Compacidad relativa sin vacío, %
E	Módulo de elasticidad
$E_h$	Elasticidad horizontal
$e_{m\acute{a}x}$	Relación de vacíos máxima
$e_{m\acute{i}n}$	Relación de vacíos mínima
$E_v$	Elasticidad vertical
F	Momento torsionante
$f_0$	Frecuencia de resonancia
$f_1$ y $f_2$	Aceleraciones con respecto al valor obtenido de $a_{m\acute{a}x} / \sqrt{2}$
$f_f$	Frecuencia final
$f_i$	Frecuencia inicial
G	Módulo de rigidez
$G_{m\acute{a}x}$	Módulo de rigidez máximo
$G_{m\acute{i}n}$	Módulo de rigidez mínimo
$G_s$	Densidad de sólidos
$G_{sec}$	Módulo de rigidez secante
Hz	Hertz
$I_m$	Inercia de la muestra
$I_s$	Sistema móvil
Kg	Kilogramo
$kg/cm^2$	Kilogramo por centímetro cuadrado
kHz	Kilohertz
$kN/m^3$	KiloNewton por metro cúbico
kPa	KiloPascal

L	Longitud de la muestra
LDT's	Local Deformation Transducers
$L_m$	Longitud de muestra
LVDT	Transductor de desplazamiento
m/s	Metro por segundo
$M_0$	Módulo de compresión máxima
mm	Milímetro
MPa	MegaPascal
P	Ondas de compresión
PD	Disco piezoeléctrico
PI	Índice de plasticidad
q	Esfuerzo desviador cíclico
$r_0$	Radio de la muestra
S	Ondas de cortante
SA	Semiampplitud de la señal
TMC	Tercio medio central
TMI	Tercio medio inferior
TMS	Tercio medio superior
$t_p$	Tiempo de arribo de la onda P
$t_s$	Tiempo de arribo de la onda S
UC	Prueba triaxial - compresión simple
UU	Prueba triaxial no consolidada no drenada
UV	Ultravioleta
$V_p$	Velocidad de la onda P
$V_s$	Velocidad de la onda S
$\omega$	contenido de agua
$\Delta f$	Incremento de frecuencia
$\Delta F$	Incremento de la fuerza de torsión
$\delta_{r1}$ y $\delta_{r2}$	Desplazamiento radial
$\epsilon_a$	Deformación axial
$\epsilon_h$	Deformación unitaria horizontal
$\epsilon_r$	Deformación radial
$\epsilon_v$	Deformación unitaria vertical
$\sigma'$	Esfuerzo efectivo de consolidación
$\gamma$	Distorsión angular
$\lambda$	Amortiguamiento
$\lambda_{m\acute{a}x}$	Amortiguamiento máximo
$\lambda_{m\acute{i}n}$	Amortiguamiento mínimo
$\nu$	Relación de Poisson
$\nu_{sec}$	Relación de Poisson secante
$\rho$	Densidad de sólidos
$\tau$	Esfuerzo cortante



## Lista de figuras

	Página
Figura 1.1 Fuerza de torsión aplicada y distorsiones que presenta la probeta durante la etapa de ensaye (Flores, 2009).....	3
Figura 1.2 curvas de respuesta bajo vibración forzada (Flores, 2009). ....	3
Figura 1.3 Cálculo de parámetros (muestra cilíndrica sólida) (Flores, 2009).....	4
Figura 1.4 Esfuerzo desviador cíclico aplicado a la probeta de suelo (Flores, 2009). ....	5
Figura 1.5 Condición de esfuerzos a la que se somete la probeta de suelo (Flores, 2009). ....	5
Figura 1.6 Cálculo de parámetro, prueba triaxial cíclica (Flores, 2009).....	5
Figura 1.7 Ciclo de histéresis (Flores, 2009).....	6
Figura 1.8 Distribución de elementos para obtener $G_{\max}$ con el método de transmisión de ondas (Brignoli <i>et al.</i> , 1996).....	7
Figura 1.9 Forma de ondas de arribo del 1 al 6 para corte y compresión (Brignoli <i>et al.</i> , 1996). ....	8
Figura 1.10 Recubrimiento con resina UV.....	10
Figura 1.11 Propagación de ondas cortantes y compresibles.....	10
Figura 1.12 Instrumentación local de la probeta de sección cuadrada (Hoque <i>et al.</i> , 1996). ....	13
Figura 1.13 Variación de la relación de Poisson con $\sigma_v/\sigma_h$ (Hoque <i>et al.</i> , 1996).....	13
Figura 1.14 Esquema general del equipo para ensayar probetas huecas (Chaudhary <i>et al.</i> , 2003).....	14
Figura 1.15 Esquema general del equipo para ensayar probetas sólidas (Chaudhary <i>et al.</i> , 2003).....	15
Figura 1.16 Posiciones y direcciones en las que se registraron las velocidades de onda de cortante (Chaudhary <i>et al.</i> , 2003).....	16
Figura 1.17 Relación de Poisson para las muestras huecas y sólidas durante la consolidación y en la etapa de ensaye, en un plano $p'$ constante (Chaudhary <i>et al.</i> , 2003).....	17
Figura 1.18 Historia de la variación de la compacidad relativa en los materiales (Flores 2009). ....	18
Figura 1.19 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y el contenido de agua, materiales La Parota y Las Charcas (Flores 2009).....	19
Figura 1.20 La variación de la relación de Poisson con densidad relativa a diferentes presiones efectivas de confinamiento (Kumar y Madhusudhan, 2010).....	20
Figura 1.21 Variación de la relación de Poisson con respecto a la presión de confinamiento isotrópica en las muestras BR1 y BR2 (Valle, 2006).....	22
Figura 1.22 Esquema de las ondas polarizadas transmitidas por los transductores piezoeléctricos (Fioravante y Capoferri, 2001).....	22
Figura 1.23 Esquema de las ondas polarizadas transmitidas por los transductores piezoeléctricos (Fioravante y Capoferri, 2001).....	23
Figura 1.24 Cámara triaxial cíclica acondicionada para medir velocidades de ondas P y S (Tsukamoto <i>et al.</i> , 2002).....	24
Figura 1.25 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y la B de Skempton (Tsukamoto <i>et al.</i> , 2002). ....	26

Figura 1.26 Variación de la relación de Poisson con el grado de saturación (Gokhan <i>et al.</i> , 2001).....	29
Figura 1.27 Velocidades en muestras secas y saturadas en suelo de Troll. Los símbolos llenos corresponden a las velocidades de onda P y los vacíos a las S. Los triángulos corresponden a resultados con arena de Ottawa obtenidos por Han (1986), Yin (1993) y Domenico (1984). (Dvorkin y Nur, 1996).....	29
Figura 1.28 Relaciones de Poisson para muestras secas y saturadas de la arena de Troll (Dvorkin y Nur, 1996).....	31
Figura 1.29 Variación de la relaciones de Poisson con la porosidad, obtenidas con refracción sísmica (Salem, 2000). ....	31
Figura 1.30 Variación de la relación de Poisson con la presión de confinamiento (Fawaz <i>et al.</i> , 2002). ....	32
Figura 1.31 Variación de la relación de Poisson con la presión de confinamiento (Talesnick <i>et al.</i> , 2000). ....	32
Figura 1.32 Variación de la relación de Poisson y del módulo de elasticidad con la presión de confinamiento (Talesnick <i>et al.</i> , 2000). ....	33
Figura 1.33 Variación de la relación de Poisson obtenida en pruebas triaxiales monotónicas -ML- y cíclicas -CL- (Dong <i>et al.</i> , 1994). ....	34
Figura 1.34 Variación del módulo de rigidez y la relación de Poisson obtenidos en pruebas triaxiales cíclicas (Dong <i>et al.</i> , 1994). ....	35
Figura 1.35 Variación de la relación de Poisson obtenida en pruebas triaxiales cíclicas en muestra inalteradas y reconstituidas de grava (Yasuda <i>et al.</i> , 1994).....	36
Figura 1.36 Influencia de la relación de vacíos y el esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson (Rivera, 1988). ....	37
Figura 1.37 Influencia de la saturación y del esfuerzo efectivo en la relación de Poisson (Rivera, 1988). ....	38
Figura 1.38 Influencia del esfuerzo efectivo y la distorsión angular en la relación de Poisson (Rivera, 1988). ....	38
Figura 1.39 Arreglo de un bender y un bender-extender (Leong <i>et al.</i> , 2009). ....	40
Figura 2.1 Esquema general del equipo triaxial cíclico MTS (Flores, 2009). ....	41
Figura 2.2 Sistema hidráulico para aplicar presión al pistón del equipo.....	42
Figura 2.4 Tablero de regulador de presiones.....	43
Figura 2.5 Esquema de distribución de sensores de medición local (Flores, 2009). ....	45
Figura 2.6 Esquema del equipo de generación y medición de ondas. ....	46
Figura 2.7 Generador de funciones. ....	47
Figura 2.8 Osciloscopio. ....	47
Figura 2.9 Equipo de generación y medición de ondas.....	48
Figura 2.10 Elementos de expansión y de flexión antes y después del recubrimiento de resina ultra-violeta (UV). ....	49
Figura 2.11 Elementos de expansión y de flexión montados en cabezal y pedestal. ....	49
Figura 2.12 Esquema donde se muestra la posición de elementos de expansión y de flexión. ....	49
Figura 2.13 Menú de calibración de transductores.....	51

	Página
Figura 2.14 Selección del sensor a calibrar. ....	51
Figura 2.15 Calibración de un sensor de desplazamiento. ....	51
Figura 2.16 Cambiar constantes de calibración de un sensor. ....	52
Figura 2.17 Calibración de sensores axial 1 y 2.....	52
Figura 2.18 Calibración de sensores radial 1 y 2. ....	53
Figura 2.19 Verificación de sensor axial externo LVDT versus desplazamiento con tornillo milimétrico. ....	53
Figura 2.20 Calibración de sensores de confinamiento y contrapresión.....	54
Figura 2.21 Calibración de sensores axial externo MTS.....	54
Figura 2.22 Verificación de sensores axial 1 y 2 versus desplazamiento con tornillo milimétrico. ....	55
Figura 2.23 Verificación de sensores radial 1 y 2 versus desplazamiento con tornillo milimétrico. ....	55
Figura 2.24 Obtención de tiempo de retardo de la señal Vs. ....	56
Figura 2.25 Verificación del tiempo de retardo a distintas amplitudes de las señales Vs.....	56
Figura 2.26 Obtención de tiempo de retardo de la señal Vp.....	57
Figura 2.27 Verificación del tiempo de retardo a distintas amplitudes de las señales Vp.....	57
Figura 2.28 Programa controlador de equipo triaxial cíclico MTS.....	58
Figura 2.29 Seleccionador de intervalo y de operación del equipo.....	58
Figura 2.30 Seleccionador de tipo de prueba.....	59
Figura 2.31 Información general de la prueba.....	59
Figura 2.32 Selector de visualizadores. ....	60
Figura 2.33 Visualizador de sensores. ....	60
Figura 2.34 Selector de patrón de excitación.....	61
Figura 2.35 Generador de los rangos de excitación.....	61
Figura 2.36 Visualizador de los resultados en la etapa de ensaye. ....	62
Figura 2.37 Visualizador de los resultados en la etapa de ensaye. ....	62
Figura 2.38 Visualizador de los resultados en la etapa de ensaye. ....	63
Figura 3.1 Granulometría del material.....	64
Figura 3.2 Proceso de preparación del material seco a parcialmente saturado, a) material seco, b) aplicación de agua controlada por peso, c) homogenización del material. ....	65
Figura 3.3 Montaje de molde y llenado del mismo. ....	66
Figura 3.4 Colocación de cabezal. ....	67
Figura 3.5 Montaje de la probeta.....	68
Figura 3.6 Curvas de compactación del material. ....	69
Figura 3.7 Curvas de concentración de sólidos del material.....	69
Figura 3.8 Variación de em <sub>áx</sub> y em <sub>ín</sub> con el contenido de finos y D <sub>50</sub> (Cubrinovsky e Ishihara, 2002).....	71
Figura 3.9 Análisis de arribo de señales Vp y Vs.....	72
Figura 3.10 Resultados experimentales de desplazamientos axiales y radiales. ....	73
Figura 3.11 Determinación de la relación de Poisson dinámica.....	74
Figura 4.1 Historia de la variación de la compacidad relativa. ....	75
Figura 4.2 Medición de la variación de amplitud con respecto a la frecuencia. ....	76

	Página
Figura 4.3 Variación de la amplitud con respecto a la frecuencia. ....	77
Figura 4.4 Comportamiento de las velocidades compresibles y de corte con la frecuencia. ....	78
Figura 4.5 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	79
Figura 4.6 Resumen de las deformaciones unitarias axiales y radiales de los suelos ensayados. ....	80
Figura 4.7 Análisis de tiempo de arribo para señales compresibles. ....	80
Figura 4.8 Análisis de tiempo de arribo para señales de corte. ....	81
Figura 4.9 Historia de la variación de las velocidades con respecto al esfuerzo de confinamiento. ....	81
Figura 4.10 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa para diferentes valores de contenido de agua. ....	84
Figura 4.11 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa. ....	86
Figura 4.12 Influencia del contenido de agua en la relación de Poisson. ....	87
Figura 4.13 Regresión lineal con los dos métodos aplicados. ....	87
Figura A.1 Variación de la relación de vacíos y compacidad relativa, respecto al esfuerzo de confinamiento (serie 1). ....	98
Figura A.2 Amplitud de 0.20 mm. ....	99
Figura A.3 Amplitud de 0.30 mm. ....	99
Figura A.4 Amplitud de 0.40 mm. ....	99
Figura A.5 Amplitud de 0.50 mm. ....	99
Figura A.6 Amplitud de 0.60 mm. ....	100
Figura A.7 Amplitud de 0.70 mm. ....	100
Figura A.8 Amplitud de 0.80 mm. ....	100
Figura A.9 Amplitud de 0.90 mm. ....	100
Figura A.10 Amplitud de 1.00 mm. ....	101
Figura A.11 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	101
Figura A.12 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	101
Figura A.13 Amplitud de 0.20 mm. ....	102
Figura A.14 Amplitud de 0.30 mm. ....	102
Figura A.15 Amplitud de 0.40 mm. ....	102
Figura A.16 Amplitud de 0.50 mm. ....	102
Figura A.17 Amplitud de 0.60 mm. ....	103
Figura A.18 Amplitud de 0.70 mm. ....	103
Figura A.19 Amplitud de 0.80 mm. ....	103
Figura A.20 Amplitud de 0.90 mm. ....	103
Figura A.21 Amplitud de 1.00 mm. ....	104
Figura A.22 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	104
Figura A.23 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	104
Figura A.24 Amplitud de 0.20 mm. ....	105
Figura A.25 Amplitud de 0.30 mm. ....	105
Figura A.26 Amplitud de 0.40 mm. ....	105
Figura A.27 Amplitud de 0.50 mm. ....	105
Figura A.28 Amplitud de 0.60 mm. ....	106

	Página
Figura A.29 Amplitud de 0.70 mm. ....	106
Figura A.30 Amplitud de 0.80 mm. ....	106
Figura A.31 Amplitud de 0.90 mm. ....	106
Figura A.32 Amplitud de 1.00 mm. ....	107
Figura A.33 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	107
Figura A.34 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	107
Figura A.35 Amplitud de 0.20 mm. ....	108
Figura A.36 Amplitud de 0.30 mm. ....	108
Figura A.37 Amplitud de 0.40 mm. ....	108
Figura A.38 Amplitud de 0.50 mm. ....	108
Figura A.39 Amplitud de 0.60 mm. ....	109
Figura A.40 Amplitud de 0.70 mm. ....	109
Figura A.41 Amplitud de 0.80 mm. ....	109
Figura A.42 Amplitud de 0.90 mm. ....	109
Figura A.43 Amplitud de 1.00 mm. ....	110
Figura A.44 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	110
Figura A.45 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	110
Figura A.46 Amplitud de 0.20 mm. ....	111
Figura A.47 Amplitud de 0.30 mm. ....	111
Figura A.48 Amplitud de 0.40 mm. ....	111
Figura A.49 Amplitud de 0.50 mm. ....	111
Figura A.50 Amplitud de 0.60 mm. ....	112
Figura A.51 Amplitud de 0.70 mm. ....	112
Figura A.52 Amplitud de 0.80 mm. ....	112
Figura A.53 Amplitud de 0.90 mm. ....	112
Figura A.54 Amplitud de 1.00 mm. ....	113
Figura A.55 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	113
Figura A.56 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	113
A.57 Análisis de arribo de señales $V_p$ y $V_s$ (serie 1). ....	114
A.58 Comportamiento del tiempo de arribo y velocidad de onda con respecto al esfuerzo de confinamiento. ....	114
A.59 Comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento. ....	114
Figura A.60 Variación de la relación de vacíos y compacidad relativa, respecto al esfuerzo de confinamiento (serie 2). ....	115
Figura A.61 Amplitud de 0.20 mm. ....	116
Figura A.62 Amplitud de 0.30 mm. ....	116
Figura A.63 Amplitud de 0.40 mm. ....	116
Figura A.64 Amplitud de 0.50 mm. ....	116
Figura A.65 Amplitud de 0.60 mm. ....	117
Figura A.66 Amplitud de 0.70 mm. ....	117
Figura A.67 Amplitud de 0.80 mm. ....	117
Figura A.68 Amplitud de 0.90 mm. ....	117
Figura A.69 Amplitud de 1.00 mm. ....	118

	Página
Figura A.70 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	118
Figura A.71 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	118
Figura A.72 Amplitud de 0.20 mm. ....	119
Figura A.73 Amplitud de 0.30 mm. ....	119
Figura A.74 Amplitud de 0.40 mm. ....	119
Figura A.75 Amplitud de 0.50 mm. ....	119
Figura A.76 Amplitud de 0.60 mm. ....	120
Figura A.77 Amplitud de 0.70 mm. ....	120
Figura A.78 Amplitud de 0.80 mm. ....	120
Figura A.79 Amplitud de 0.90 mm. ....	120
Figura A.80 Amplitud de 1.00 mm. ....	121
Figura A.81 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	121
Figura A.82 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	121
Figura A.83 Amplitud de 0.20 mm. ....	122
Figura A.84 Amplitud de 0.30 mm. ....	122
Figura A.85 Amplitud de 0.40 mm. ....	122
Figura A.86 Amplitud de 0.50 mm. ....	122
Figura A.87 Amplitud de 0.60 mm. ....	123
Figura A.88 Amplitud de 0.70 mm. ....	123
Figura A.89 Amplitud de 0.80 mm. ....	123
Figura A.90 Amplitud de 0.90 mm. ....	123
Figura A.91 Amplitud de 1.00 mm. ....	124
Figura A.92 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	124
Figura A.93 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	124
Figura A.94 Amplitud de 0.20 mm. ....	125
Figura A.95 Amplitud de 0.30 mm. ....	125
Figura A.96 Amplitud de 0.40 mm. ....	125
Figura A.97 Amplitud de 0.50 mm. ....	125
Figura A.98 Amplitud de 0.60 mm. ....	126
Figura A.99 Amplitud de 0.70 mm. ....	126
Figura A.100 Amplitud de 0.80 mm. ....	126
Figura A.101 Amplitud de 0.90 mm. ....	126
Figura A.102 Amplitud de 1.00 mm. ....	127
Figura A.103 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	127
Figura A.104 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	127
Figura A.105 Amplitud de 0.20 mm. ....	128
Figura A.106 Amplitud de 0.30 mm. ....	128
Figura A.107 Amplitud de 0.40 mm. ....	128
Figura A.108 Amplitud de 0.50 mm. ....	128
Figura A.109 Amplitud de 0.60 mm. ....	129
Figura A.110 Amplitud de 0.70 mm. ....	129
Figura A.111 Amplitud de 0.80 mm. ....	129
Figura A.112 Amplitud de 0.90 mm. ....	129

	Página
Figura A.113 Amplitud de 1.00 mm. ....	130
Figura A.114 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	130
Figura A.115 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.....	130
A.116 Análisis de arribo de señales $V_p$ y $V_s$ (serie 2).....	131
A.117 Comportamiento del tiempo de arribo y velocidad de onda con respecto al esfuerzo de confinamiento. ....	131
A.118 Comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento. ....	131
Figura A.119 Variación de la relación de vacíos y compacidad relativa, respecto al esfuerzo de confinamiento (serie 3). ....	132
Figura A.120 Amplitud de 0.20 mm. ....	133
Figura A.121 Amplitud de 0.30 mm. ....	133
Figura A.122 Amplitud de 0.40 mm. ....	133
Figura A.123 Amplitud de 0.50 mm. ....	133
Figura A.124 Amplitud de 0.60 mm. ....	134
Figura A.125 Amplitud de 0.70 mm. ....	134
Figura A.126 Amplitud de 0.80 mm. ....	134
Figura A.127 Amplitud de 0.90 mm. ....	134
Figura A.128 Amplitud de 1.00 mm. ....	135
Figura A.129 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	135
Figura A.130 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.....	135
Figura A.131 Amplitud de 0.20 mm. ....	136
Figura A.132 Amplitud de 0.30 mm. ....	136
Figura A.133 Amplitud de 0.40 mm. ....	136
Figura A.134 Amplitud de 0.50 mm. ....	136
Figura A.135 Amplitud de 0.60 mm. ....	137
Figura A.136 Amplitud de 0.70 mm. ....	137
Figura A.137 Amplitud de 0.80 mm. ....	137
Figura A.138 Amplitud de 0.90 mm. ....	137
Figura A.139 Amplitud de 1.00 mm. ....	138
Figura A.140 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	138
Figura A.141 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.....	138
Figura A.142 Amplitud de 0.20 mm. ....	139
Figura A.143 Amplitud de 0.30 mm. ....	139
Figura A.144 Amplitud de 0.40 mm. ....	139
Figura A.145 Amplitud de 0.50 mm. ....	139
Figura A.146 Amplitud de 0.60 mm. ....	140
Figura A.147 Amplitud de 0.70 mm. ....	140
Figura A.148 Amplitud de 0.80 mm. ....	140
Figura A.149 Amplitud de 0.90 mm. ....	140
Figura A.150 Amplitud de 1.00 mm. ....	141
Figura A.151 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	141
Figura A.152 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.....	141

	Página
Figura A.153 Amplitud de 0.20 mm. ....	142
Figura A.154 Amplitud de 0.30 mm. ....	142
Figura A.155 Amplitud de 0.40 mm. ....	142
Figura A.156 Amplitud de 0.50 mm. ....	142
Figura A.157 Amplitud de 0.60 mm. ....	143
Figura A.158 Amplitud de 0.70 mm. ....	143
Figura A.159 Amplitud de 0.80 mm. ....	143
Figura A.160 Amplitud de 0.90 mm. ....	143
Figura A.161 Amplitud de 1.00 mm. ....	144
Figura A.162 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	144
Figura A.163 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	144
Figura A.164 Amplitud de 0.20 mm. ....	145
Figura A.165 Amplitud de 0.30 mm. ....	145
Figura A.166 Amplitud de 0.40 mm. ....	145
Figura A.167 Amplitud de 0.50 mm. ....	145
Figura A.168 Amplitud de 0.60 mm. ....	146
Figura A.169 Amplitud de 0.70 mm. ....	146
Figura A.170 Amplitud de 0.80 mm. ....	146
Figura A.171 Amplitud de 0.90 mm. ....	146
Figura A.172 Amplitud de 1.00 mm. ....	147
Figura A.173 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	147
Figura A.174 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	147
A.175 Análisis de arribo de señales Vp y Vs (serie 3).....	148
A.176 Comportamiento del tiempo de arribo y velocidad de onda con respecto al esfuerzo de confinamiento. ....	148
A.177 Comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento. ....	148
Figura A.178 Variación de la relación de vacíos y compacidad relativa, respecto al esfuerzo de confinamiento (serie 4). ....	149
Figura A.179 Amplitud de 0.20 mm. ....	150
Figura A.180 Amplitud de 0.30 mm. ....	150
Figura A.181 Amplitud de 0.40 mm. ....	150
Figura A.182 Amplitud de 0.50 mm. ....	150
Figura A.183 Amplitud de 0.60 mm. ....	151
Figura A.184 Amplitud de 0.70 mm. ....	151
Figura A.185 Amplitud de 0.80 mm. ....	151
Figura A.186 Amplitud de 0.90 mm. ....	151
Figura A.187 Amplitud de 1.00 mm. ....	152
Figura A.188 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	152
Figura A.189 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes. ....	152
Figura A.190 Amplitud de 0.20 mm. ....	153
Figura A.191 Amplitud de 0.30 mm. ....	153
Figura A.192 Amplitud de 0.40 mm. ....	153



	Página
Figura A.193 Amplitud de 0.50 mm. ....	153
Figura A.194 Amplitud de 0.60 mm. ....	154
Figura A.195 Amplitud de 0.70 mm. ....	154
Figura A.196 Amplitud de 0.80 mm. ....	154
Figura A.197 Amplitud de 0.90 mm. ....	154
Figura A.198 Amplitud de 1.00 mm. ....	155
Figura A.199 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	155
Figura A.200 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.....	155
Figura A.201 Amplitud de 0.20 mm. ....	156
Figura A.202 Amplitud de 0.30 mm. ....	156
Figura A.203 Amplitud de 0.40 mm. ....	156
Figura A.204 Amplitud de 0.50 mm. ....	156
Figura A.205 Amplitud de 0.60 mm. ....	157
Figura A.206 Amplitud de 0.70 mm. ....	157
Figura A.207 Amplitud de 0.80 mm. ....	157
Figura A.208 Amplitud de 0.90 mm. ....	157
Figura A.209 Amplitud de 1.00 mm. ....	158
Figura A.210 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	158
Figura A.211 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.....	158
Figura A.212 Amplitud de 0.20 mm. ....	159
Figura A.213 Amplitud de 0.30 mm. ....	159
Figura A.214 Amplitud de 0.40 mm. ....	159
Figura A.215 Amplitud de 0.50 mm. ....	159
Figura A.216 Amplitud de 0.60 mm. ....	160
Figura A.217 Amplitud de 0.70 mm. ....	160
Figura A.218 Amplitud de 0.80 mm. ....	160
Figura A.219 Amplitud de 0.90 mm. ....	160
Figura A.220 Amplitud de 1.00 mm. ....	161
Figura A.221 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	161
Figura A.222 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.....	161
Figura A.223 Amplitud de 0.20 mm. ....	162
Figura A.224 Amplitud de 0.30 mm. ....	162
Figura A.225 Amplitud de 0.40 mm. ....	162
Figura A.226 Amplitud de 0.50 mm. ....	162
Figura A.227 Amplitud de 0.60 mm. ....	163
Figura A.228 Amplitud de 0.70 mm. ....	163
Figura A.229 Amplitud de 0.80 mm. ....	163
Figura A.230 Amplitud de 0.90 mm. ....	163
Figura A.231 Amplitud de 1.00 mm. ....	164
Figura A.232 Determinación de la relación de Poisson dinámica. ....	164
Figura A.233 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.....	164
A.234 Análisis de arribo de señales $V_p$ y $V_s$ (serie 4).....	165

A.235 Comportamiento del tiempo de arribo y velocidad de onda con respecto al esfuerzo de confinamiento. .... 165

A.236 Comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento. .... 165

## Lista de tablas

Página

Tabla 1-1 Pruebas de laboratorio para determinar parámetros dinámicos en suelos (Ishihara, 1996) .....	1
Tabla 1-2 Estimación de la relación de Poisson en muestras de arena seca BR1 y BR2, usando $V_p$ y $V_s$ (Valle, 2006).....	21
Tabla 2-1 Sensores instalados en el equipo triaxial cíclico (Flores, 2009).....	45
Tabla 2-2 Sensores piezo-eléctricos instalados en el equipo triaxial cíclico.....	48
Tabla 3-1 Granulometrías del material.....	64
Tabla 4-1 Variación de la capacidad relativa dividida en series.....	74
Tabla A-1 Resultados del contenido de agua obtenidos para la serie 1 .....	98
Tabla A-2 Resultados calculados (serie 1).....	98
Tabla A-3 Resultados del contenido de agua obtenidos para la serie 2 .....	115
Tabla A-4 Resultados calculados (serie 2).....	115
Tabla A-5 Resultados del contenido de agua obtenidos para la serie 3.....	132
Tabla A-6 Resultados calculados (serie 3).....	132
Tabla A-7 Resultados del contenido de agua obtenidos para la serie 4 .....	149
Tabla A-8 Resultados calculados (serie 4).....	149

---

# CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES Y ESTUDIOS PREVIOS

---

### 1.1. Introducción

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

Las características dinámicas de suelos pueden ser evaluadas mediante pruebas de laboratorio en las que generalmente se usa carga senoidal como fuerza de excitación y las pruebas se hacen a carga o desplazamiento controlado. Los equipos que comúnmente se usan en laboratorio son la columna resonante (genera deformaciones angulares entre  $10^{-5}$  y  $10^{-2}\%$ ), la cámara triaxial cíclica y el corte simple cíclico (ambos inducen deformaciones angulares entre  $10^{-3}$  y  $1\%$ , tal como se indica en la tabla 1.1)

Tabla 1-1 Pruebas de laboratorio para determinar parámetros dinámicos en suelos (Ishihara, 1996)

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

De acuerdo con lo mostrado en la tabla 1.1, se deduce que si se desea estudiar el comportamiento del suelo de niveles de distorsión muy pequeñas hasta la falla, es necesario evaluar los parámetros dinámicos como el módulo de rigidez,  $G$ , el amortiguamiento,  $\lambda$ , y la relación de Poisson,  $\nu$ , usando muestras gemelas en dos equipos.

Los resultados de una gran variedad de investigaciones experimentales muestran que los factores de mayor influencia en el comportamiento de suelos cohesivos son el esfuerzo efectivo de consolidación,  $\sigma'$ , y el índice de plasticidad,  $PI$ . En cuanto a los suelos granulares, el esfuerzo efectivo,  $\sigma'$ , y la compacidad relativa,  $Dr$ , son los

dominantes [e.g., Seed e Idriss, (1969)]. A éstos pueden agregarse el número de ciclos, el método para formar la muestra, la distribución granulométrica [e.g., Hardin y Richart, (1963)], y el tiempo de consolidación a que se somete el suelo [Mulilis *et al.*, (1976) y Troncoso, (1995)].

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

### **1.1.1. Determinación de parámetros dinámicos en laboratorio**

#### **1.1.1.1. Columna resonante**

Durante la etapa de ensaye se aplica un momento torsionante,  $F$ , en la parte superior del espécimen, mientras que su base se encuentra empotrada (figura 1.1); se registra la aceleración de respuesta,  $a$ , con un acelerómetro cuya magnitud dependerá de la rigidez del material ensayado; entre más rígido sea éste, menor será la aceleración de respuesta.

Con la fuerza  $F$  se excita la probeta a una frecuencia, definida como frecuencia inicial,  $f_i$ , y se registra la aceleración de respuesta, posteriormente se incrementa la frecuencia en valores  $\Delta f$  constantes, y en cada uno de ellos se registra la aceleración, hasta llegar a una frecuencia final,  $f_f$ . A estas lecturas de aceleración, desde  $f_i$  hasta  $f_f$  con incrementos  $\Delta f$ , se le llama barrido de frecuencias. Al terminar cada barrido de frecuencias se incrementa la fuerza de torsión en valores  $\Delta F$ , de manera que al final del ensaye se tendrá una serie de estos barridos, donde la fuerza de torsión va incrementándose entre cada uno de ellos.

Para los diferentes incrementos de frecuencia de excitación se obtienen los valores de aceleración y frecuencia correspondientes, con los cuales se forma la curva de aceleraciones versus frecuencia, como la mostrada en la figura 1.2. En ésta se presenta una serie de barridos de frecuencia; a cada una de estas curvas se le conoce como curva de respuesta o de aceleraciones totales bajo vibración forzada y cada una de ellas corresponde a una fuerza de torsión,  $F$ . Es claro que al incrementarse la fuerza  $F$ ,

aumenta la aceleración máxima,  $a_{m\acute{a}x}$ , y se reduce la frecuencia denominada de resonancia,  $f_0$ .

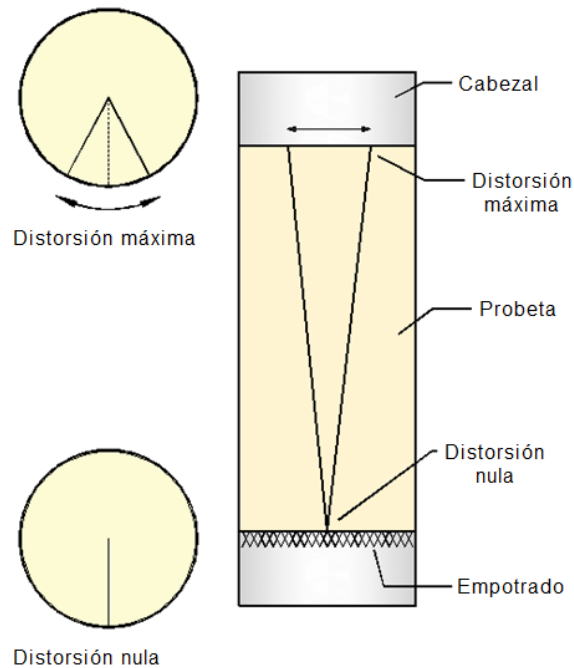


Figura 1.1 Fuerza de torsión aplicada y distorsiones que presenta la probeta durante la etapa de ensaye (Flores, 2009).

De cada curva de aceleraciones totales se registran  $a_{m\acute{a}x}$ ,  $f_0$ , y las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , correspondientes a la aceleración  $a_{m\acute{a}x} / \sqrt{2}$  (figura 1.2). Con los valores de  $f_0$ , la longitud de la muestra,  $L$ , y el valor de  $\beta$  calculado a partir de los momentos polares de inercia de la muestra,  $I_m$ , y del sistema móvil,  $I_s$ , se determinan el módulo de rigidez al cortante dinámico,  $G$ , el amortiguamiento (bajo vibración forzada),  $\lambda$ , y la distorsión angular,  $\gamma$ , tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 1.3.

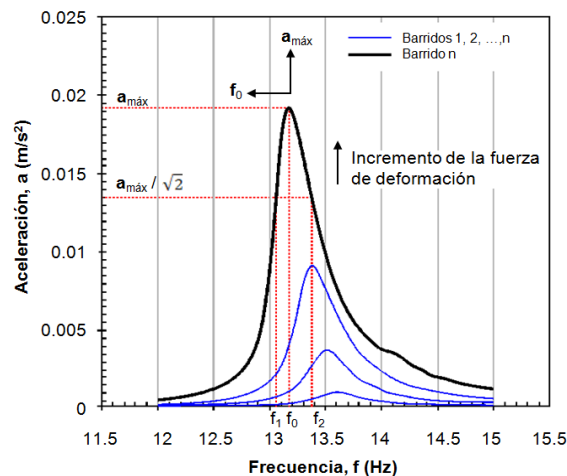


Figura 1.2 curvas de respuesta bajo vibración forzada (Flores, 2009).

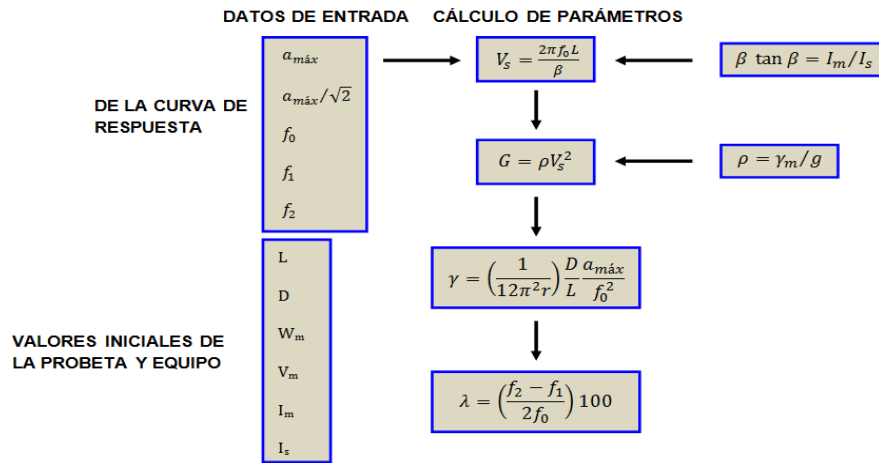


Figura 1.3 Cálculo de parámetros (muestra cilíndrica sólida) (Flores, 2009).

### 1.1.1.2. Triaxial cíclico

Se le aplica a la probeta una señal con patrón dinámico senoidal, a desplazamiento o esfuerzo controlado, como se muestra en la figura 1.4; se define el número de ciclos, N, la frecuencia de excitación, f (que generalmente no rebasa los 4 Hz), y la semiamplitud de la señal (SA). De los resultados, se definen los vectores de carga versus tiempo y desplazamiento versus tiempo. Para los siguientes patrones de carga se mantienen constantes N y f y se incrementa la SA, hasta llegar a la falla de la probeta.

La probeta de suelo se somete a una variación de esfuerzos desviadores y cortantes como el que se muestra en la figura 1.5. Se parte del esfuerzo  $\sigma_3$ , y se aplica un esfuerzo desviador cíclico, q, por medio de la señal periódica senoidal axial actuando en la parte superior de la muestra, lo que genera una variación cíclica de esfuerzos cortantes.

Para determinar los parámetros dinámicos del suelo se selecciona el mismo número de ciclo para todas las SA aplicadas. Con los resultados experimentales correspondientes a los vectores de carga y desplazamiento, y los datos volumétricos de la probeta se determinan los vectores de esfuerzo cortante y distorsión angular, según la secuencia de cálculo mostrado en la figura 1.6.

De los ciclos de histéresis como el mostrado en la figura 1.7, correspondiente a una SA, se determina el módulo de rigidez secante, G, el amortiguamiento,  $\lambda$ , y la distorsión angular,  $\gamma$ .

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



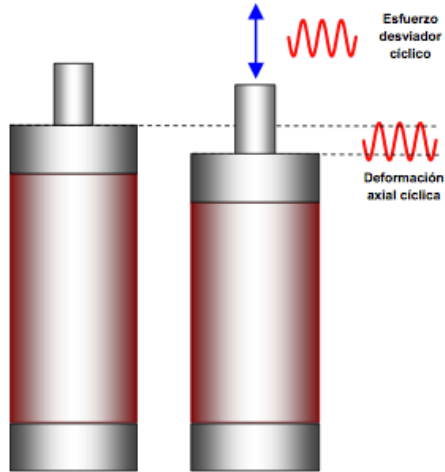


Figura 1.4 Esfuerzo desviador cíclico aplicado a la probeta de suelo (Flores, 2009).

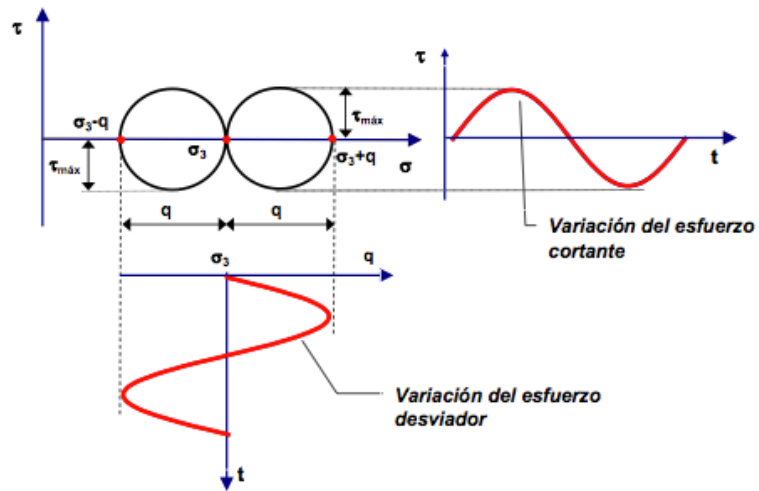


Figura 1.5 Condición de esfuerzos a la que se somete la probeta de suelo (Flores, 2009).

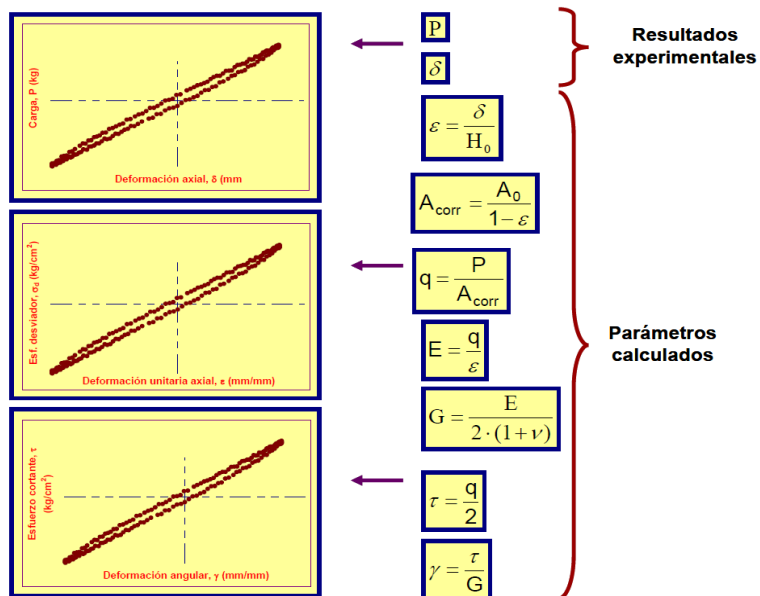


Figura 1.6 Cálculo de parámetro, prueba triaxial cíclica (Flores, 2009).

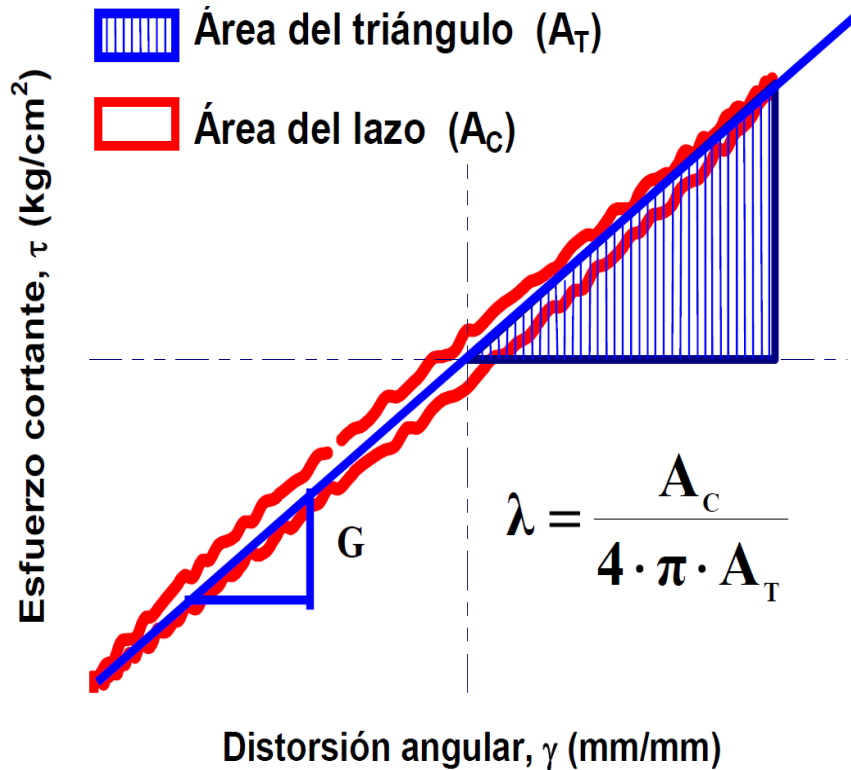


Figura 1.7 Ciclo de histéresis (Flores, 2009).

### 1.1.1.3. Método de transmisión de ondas

En este método se coloca el sensor emisor y el receptor en las caras opuestas de una muestra cilíndrica, tal como se ilustra en la figura 1.8. Estos sensores pueden ser elementos de expansión, que generan principalmente ondas de compresión (P) o elementos de flexión, que generan principalmente ondas de cortante (S). Utilizando un generador de funciones se emite un pulso en el emisor, las ondas de compresión y cortante viajan a través de la muestra y son registradas por el receptor. Ambas señales se graban en un osciloscopio y posteriormente se digitalizan para su análisis.

Se grafican las señales de entrada y salida (emisor y receptor) y se define de forma gráfica el momento de arribo de las ondas de compresión P y de cortante S, tal como se ilustran en la figura 1.9, los seis diferentes tipo de llegada de onda, las cuales propone como señales comunes en el uso de los elementos compresibles y de cortante, como también sugiere el punto de arribo para cada una ellas. Se observa que a veces es difícil recibir un claro arribo de las ondas S. Situación posible en que la primera llegada no corresponde a la onda S, sino a la onda P o cómo también al efecto de campo cercano.

En este tipo de ensayos, la muestra se somete a esfuerzos y deformaciones en el intervalo elástico, por lo que no sufre daños en su estructura y se asume que el módulo

de rigidez obtenido es el máximo,  $G_{m\acute{a}x}$ . Esto permite usar varias veces el mismo espécimen y determinar su módulo de rigidez a diferentes esfuerzos efectivos.

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

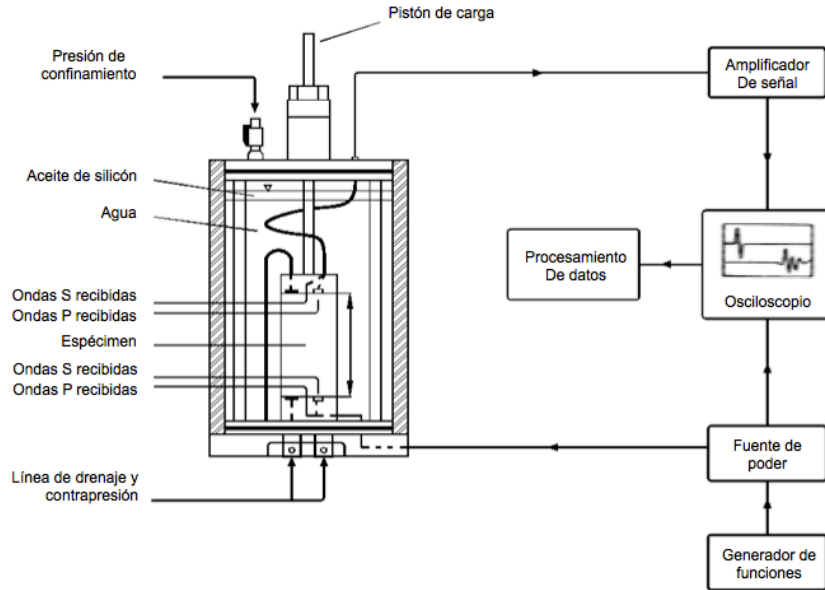
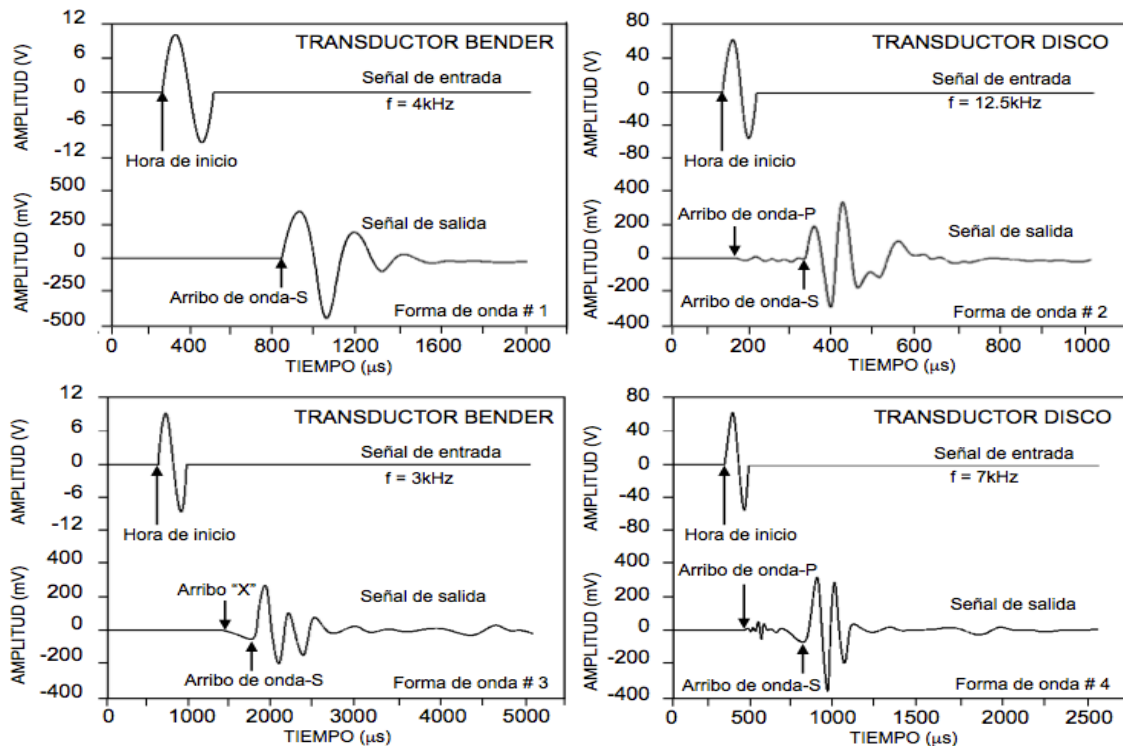


Figura 1.8 Distribución de elementos para obtener  $G_{m\acute{a}x}$  con el método de transmisión de ondas (Brignoli *et al.*, 1996).



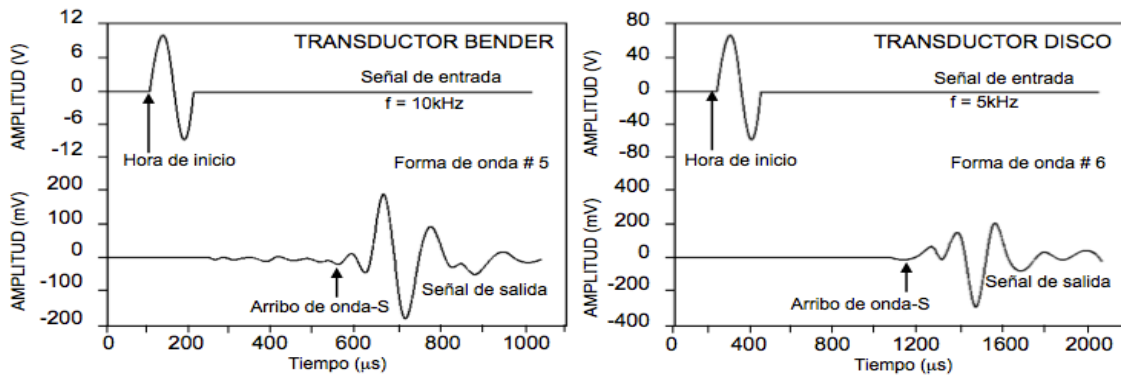


Figura 1.9 Forma de ondas de arribo del 1 al 6 para corte y compresión (Brignoli *et al.*, 1996).

Los elementos de flexión han tomado auge como un método alternativo en la determinación de las velocidades de ondas S (cortante), en muestras de laboratorio. El uso de estos elementos para la caracterización del suelo se le atribuye a Shirley (1977) y Shirley y Hampton (1978). Éstos consisten en dos placas rígidamente unidas, calzadas al centro con latón o chapa de acero inoxidable.

El uso de los elementos de flexión en el área de la Geotecnia fue descrito por Dyvik y Madshus (1985), quienes imitando el diseño Shirley y Hampton, anexaron un recubrimiento con resina epóxica, formando un cantiléver esbelto el cual se pudiera incrustar en el suelo. Aprovechando sus propiedades piezoeléctricas, la cual consiste en que los elementos de flexión son capaces de convertir un impulso eléctrico en una excitación mecánica, actuando como transmisor y receptor de la señal. Es por esto que con el uso de dos elementos de flexión como transmisor y receptor, respectivamente, se pueden propagar ondas de cortantes a través de muestras de suelos. Siendo las señales emitidas y recibidas por los elementos de flexión muy tenues, por lo general se registran en un osciloscopio.

Existen también los elementos de expansión, cuyo sistema es muy similar a los elementos de flexión, con la diferencia que con éstos se puede medir la ondas P (compresión), los cuales no son de uso común en pruebas de laboratorio de suelos, por dos razones: (I) el módulo de corte es más aplicable para describir el comportamiento de deformación del suelo, como el suelo se carga sobre todo en el modo de corte; y (II) se trata de un método ineficaz para medir la velocidad de la onda P en suelos saturados como el viaje de la onda P a través de la fase de agua más rápido que a través de la estructura del suelo. Sin embargo, con creciente interés en la Mecánica de Suelos no saturados, la medición de la velocidad de onda P se vuelve más importante ya que puede proporcionar una evaluación del grado de saturación, así como la porosidad de la muestra de suelo (Brignoli *et al.*, 1996).

Como ya se ha comentado, los elementos de expansión y de flexión ayudan a la medición de la velocidad de ondas P ( $V_p$ ) y de ondas S ( $V_s$ ), respectivamente (Brignoli *et al.*, 1996):

$$V_p = L/t_p \quad (1)$$

y

$$V_s = L/t_s \quad (2)$$

Donde L es la distancia efectiva entre la señal emitida y la señal recibida, y  $t_p$  y  $t_s$ , los tiempos de arribo de las ondas de compresión y cortante, respectivamente.

Con la velocidad de compresión se puede calcular el Módulo de compresión máxima,  $M_0$ , de la siguiente manera (Brignoli *et al.*, 1996):

$$M_0 = \rho \cdot V_p^2 \quad (3)$$

Donde  $\rho$  es la densidad de sólidos y  $V_p$  la velocidad de la onda de compresión.

Otro de los datos que se puede obtener con la velocidad de cortante es el Módulo de cortante máximo,  $G_{m\acute{a}x}$ , de la siguiente manera (Brignoli *et al.*, 1996):

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (4)$$

Donde  $V_s$  es la velocidad de la onda de cortante.

Con las velocidades de compresión y de cortante también se obtiene la variación de la relación de Poisson, haciendo uso de la siguiente expresión (Kumar y Madhusudhan, 2010):

$$\nu = \frac{(0.5V_p^2 - V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5)$$

## 1.2. Funcionamiento de cristales piezoeléctricos (compresión y de flexión)

El núcleo del sistema de medición es el transductor piezoeléctrico que consiste en dos placas delgadas de cerámica, rígidamente unidas a una placa metálica central, y dos finas capas conductoras (electrodos) que son aplicadas externamente. El aislamiento eléctrico y la impermeabilización del transductor se obtienen mediante la aplicación de una capa uniforme de resina ultravioleta (UV) como se muestra en la figura 1.10.

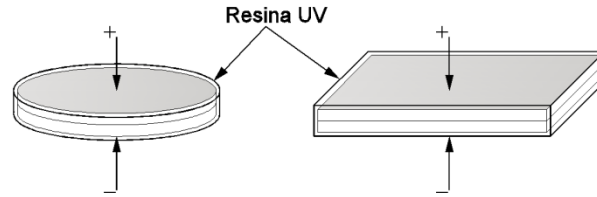


Figura 1.10 Recubrimiento con resina UV.

El principio de funcionamiento está relacionado con las propiedades de los materiales piezoeléctricos que generan una salida eléctrica cuando son sometidos a la deformación mecánica y viceversa.

Este tipo de transductores, llamado simplemente elementos de flexión que utilizan en laboratorios de Mecánica de suelos están integrados en el pedestal y el cabezal de la celda triaxial (Figs. 1.11a y 1.11b).

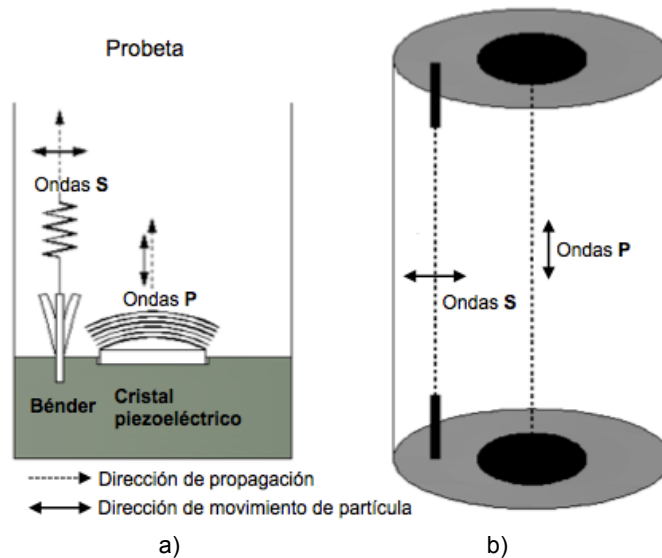


Figura 1.11 Propagación de ondas cortantes y compresibles.

Para generar ondas P los elementos de expansión se polarizan en la dirección del espesor y se colocan electrodos en la cara del elemento a la dirección de la polarización. Cuando un voltaje se aplica a los electrodos, los elementos se expanden y contraen en la dirección del espesor. Los transductores de compresión están incrustados en el pedestal y el cabezal de la cámara (Figs. 1.11a y 1.11b).

Para proteger a los transductores del agua dentro de la cámara triaxial se recubren con un material epóxico ultravioleta (UV) y los cables coaxiales eléctricos que se utilizan para la conexión con dispositivos externos se colocan dentro de las mangueras de plástico.

La longitud efectiva de viaje para los elementos de expansión y flexión piezoeléctricos se toma como la distancia entre las puntas de los elementos. Para las ondas inclinadas, la longitud efectiva se calcula entre los ángulos más cercanos de la placa. Los cambios de diámetro se establecerán a partir de la suposición de que la muestra es deformada como un cilindro recto.

### 1.3. Estudios previos

Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre estudios experimentales realizados en suelos granulares para la obtención de la relación de Poisson si se encontraron trabajos que reportan valores experimentales de este parámetro en suelos granulares, cuyos resultados se muestran en este capítulo. En la ejecución de los ensayos la relación de Poisson se determinó a partir de mediciones de deformación axial y radial de la probeta o utilizando sensores para generar y registrar señales de ondas de cortante (sensores laminares) y de compresión (cristales piezoeléctricos).

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

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

La cámara triaxial estaba equipada con una celda de carga sumergible y tenía la posibilidad de controlar de manera automática los esfuerzos principales verticales y horizontales para generar diferentes trayectorias de esfuerzos. Emplearon un par de LDT's (Local Deformation Transducers) para registrar el desplazamiento axial y dos pares para el desplazamiento lateral, colocados directamente sobre la membrana que cubre la probeta (Goto *et al.*, 1991). Utilizaron, además, dos sensores de aproximación

para registrar los desplazamientos axiales en el cabezal superior de la probeta y dos para los desplazamiento laterales a la altura media de la muestra, tal como se indica en la figura 1.12.

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

Los valores de deformación unitaria vertical,  $\varepsilon_v$ , y horizontal,  $\varepsilon_h$ , se obtuvieron promediando los valores de las dos lecturas de los LDT's verticales y los cuatro horizontales, respectivamente. En la figura 1.13 se muestra la variación de la relación de Poisson con el incremento de la relación de los esfuerzos principales vertical y horizontal,  $\sigma_v/\sigma_h$ , en la cual se puede observar que la relación de Poisson es poco sensible al incremento de la relación de esfuerzos ya que aumenta de 0.16 a 0.19, para un incremento de relación de esfuerzos de 0.50 a 2.0.

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

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



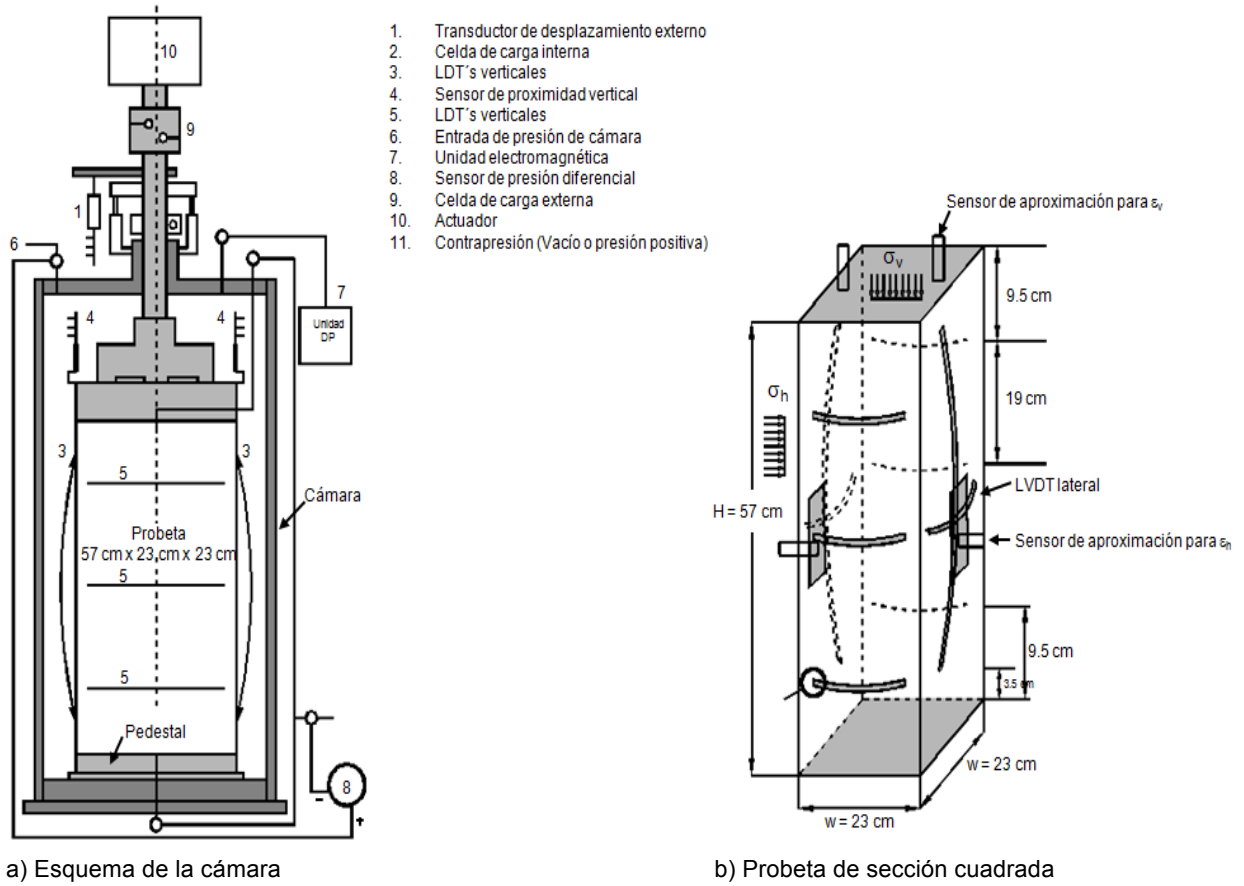


Figura 1.12 Instrumentación local de la probeta de sección cuadrada (Hoque *et al.*, 1996).

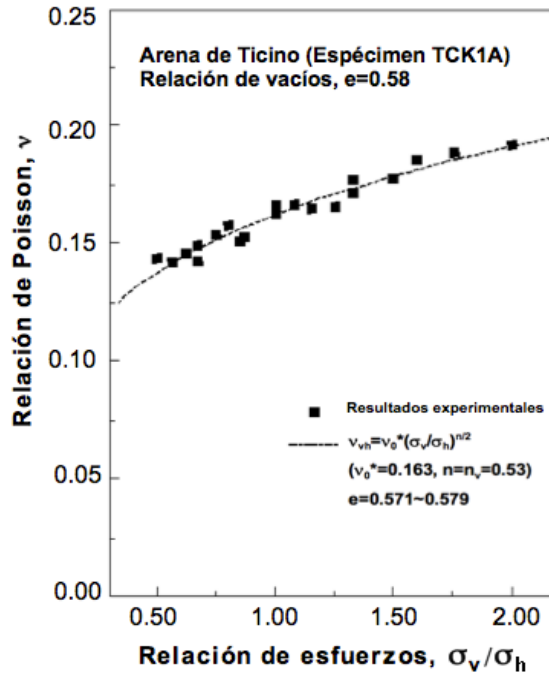


Figura 1.13 Variación de la relación de Poisson con  $\sigma_v/\sigma_h$  (Hoque *et al.*, 1996).

Un diagrama esquemático de la prueba cilíndrica hueca se muestra en la figura 1.14, la cual medía 20 cm de altura, radios interior y exterior de 3 y 5 cm, respectivamente. Los desplazamientos axiales y angulares fueron medidos por sensores de proximidad en la parte superior de la probeta, además de un transductor tipo *strain gage* colocado fuera de la cámara y otro tipo potenciométrico en el cabezal superior.

Se utilizó, además, para las probetas sólidas, un aparato triaxial estático convencional, donde se podían aplicar esfuerzos de contrapresión y confinamiento, además del esfuerzo desviador. El espécimen que se utilizó fue de 15 cm de altura por 7.5 cm de diámetro. El aparato estaba totalmente automatizado y era controlado por una computadora personal, la carga axial se medía con una celda de carga sumergible colocada en la parte superior de la probeta. El desplazamiento axial se midió localmente encima de la parte central del espécimen por un par de transductores locales de desplazamiento (LDT) y un par de LVDT's montados en lados diametralmente opuestos. El sistema correspondiente a este equipo se muestra en la figura 1.15.

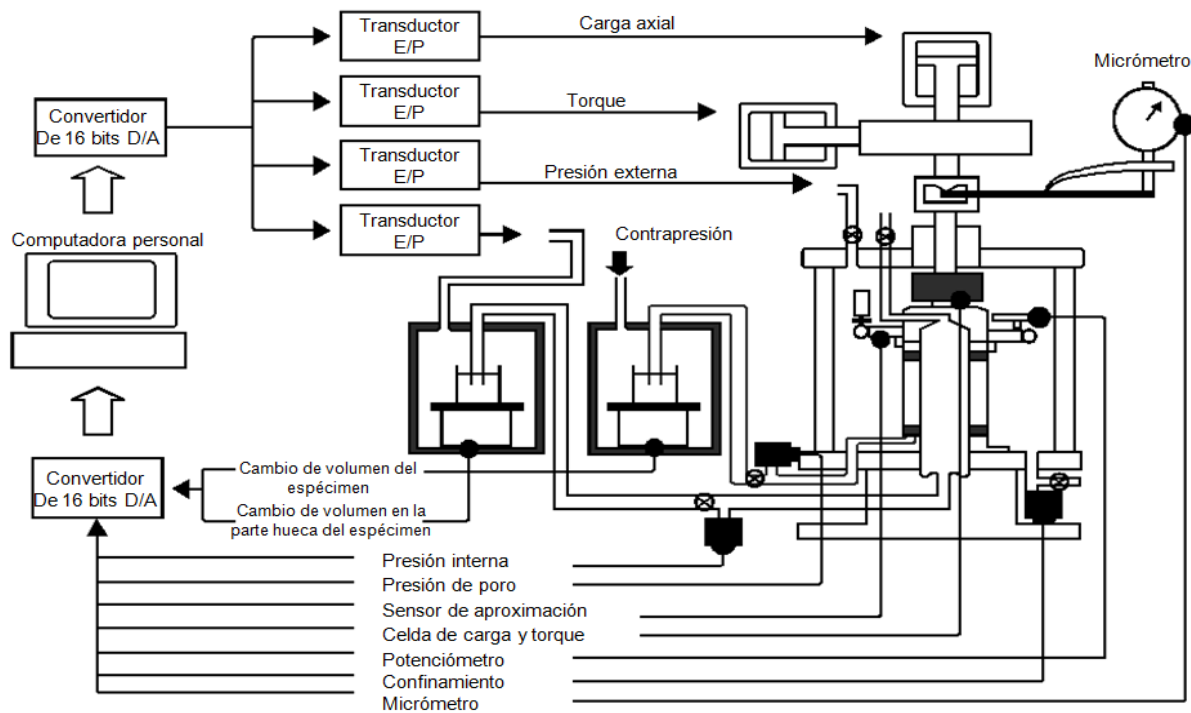


Figura 1.14 Esquema general del equipo para ensayar probetas huecas  
(Chaudhary *et al.*, 2003).

Para medir la velocidad de onda de cortante en el plano vertical y horizontal de la probeta se instalaron un par de elementos laminares en dirección vertical y otro par en dirección horizontal, tal como se ilustra en la figura 1.16.

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

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

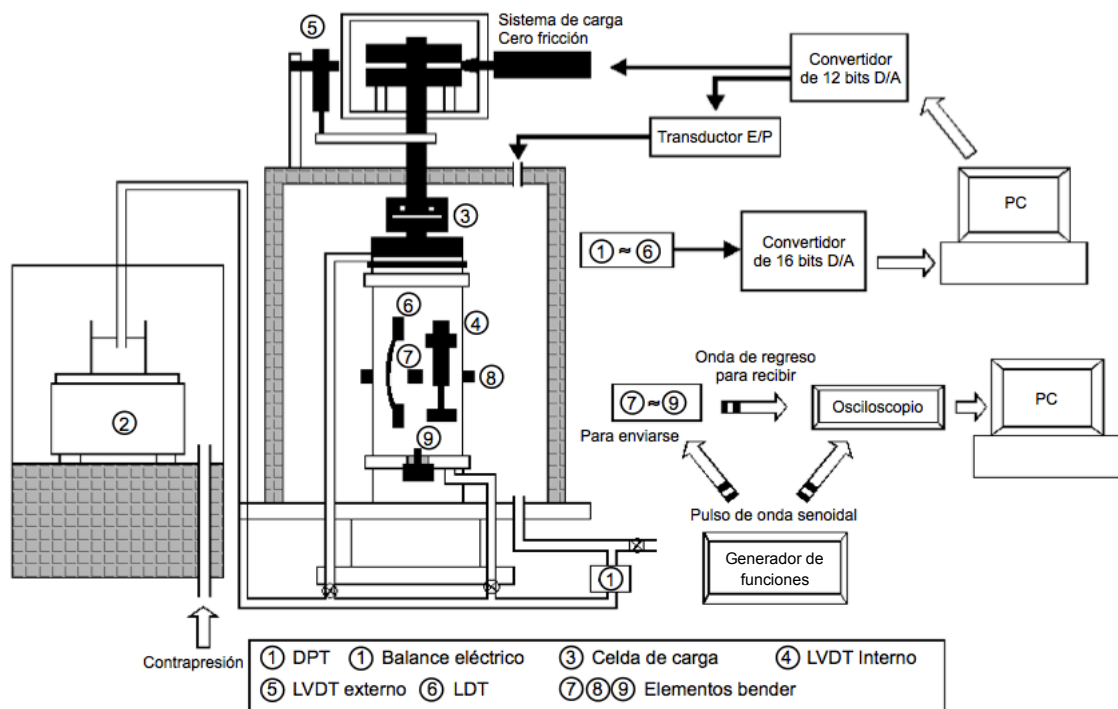


Figura 1.15 Esquema general del equipo para ensayar probetas sólidas (Chaudhary *et al.*, 2003).

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

Las relaciones de Poisson obtenidas durante la consolidación se muestran en la figura 1.17a. Los valores para ambos aparatos, cilindro hueco y cámara triaxial son similares y varían, en cada caso, entre 0.10 y 0.30, con una dispersión aproximadamente igual en ambos equipos. La deformación unitaria a la que se sometió a la probeta en la determinación de la relación de Poisson fue pequeña, del orden de 0.005%.

La relación de Poisson medida durante la compresión y extensión triaxial se muestra en la figura 1.17b, donde  $\tau_{m\acute{a}x} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  representa al esfuerzo cortante máximo, mientras que  $\tau_{m\acute{a}xf}$  es el esfuerzo cortante a la falla. Los valores de relación de Poisson oscilan entre 0.10 y 0.30, independiente de la forma de aplicar el esfuerzo cortante. Se puede apreciar que este valor no se ve afectado de manera importante por el nivel del esfuerzo cortante aplicado.

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

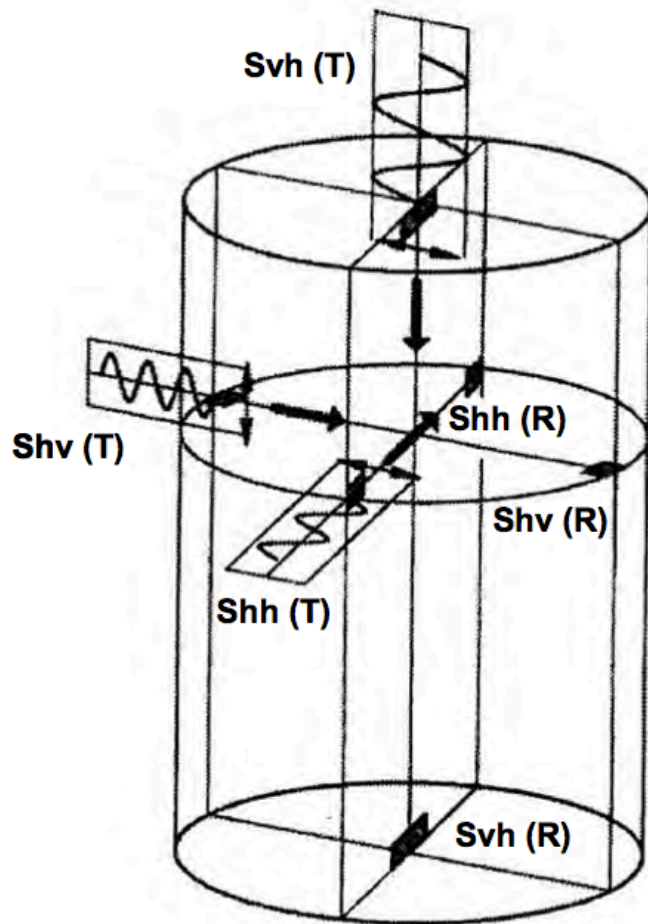


Figura 1.16 Posiciones y direcciones en las que se registraron las velocidades de onda de cortante (Chaudhary *et al.*, 2003).

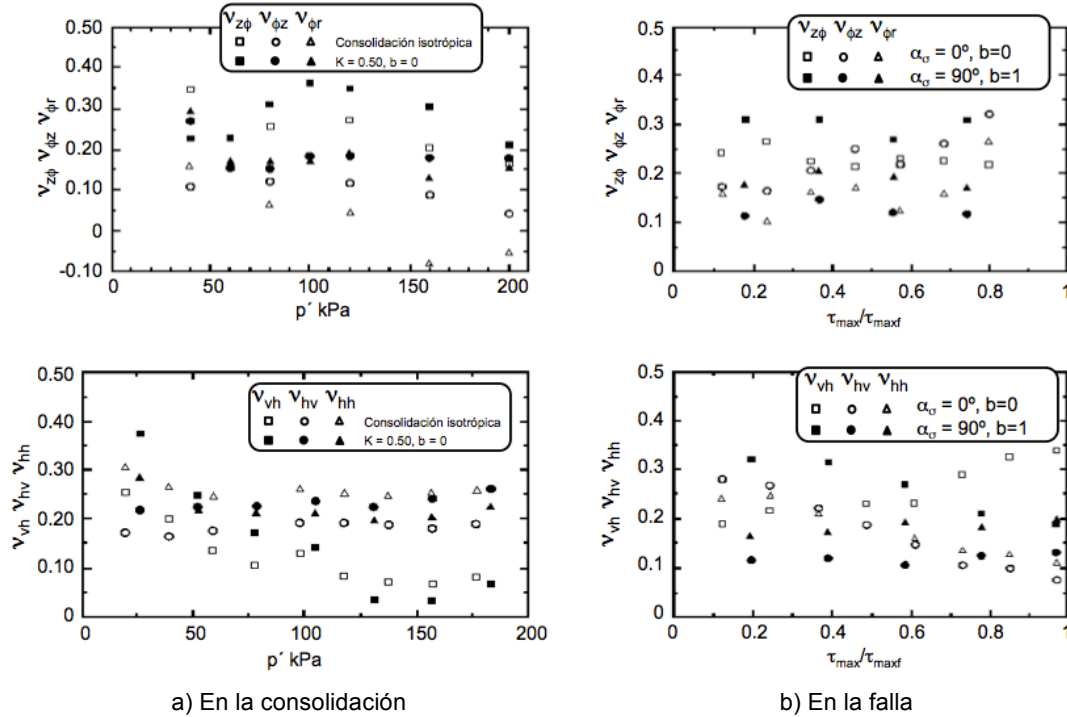


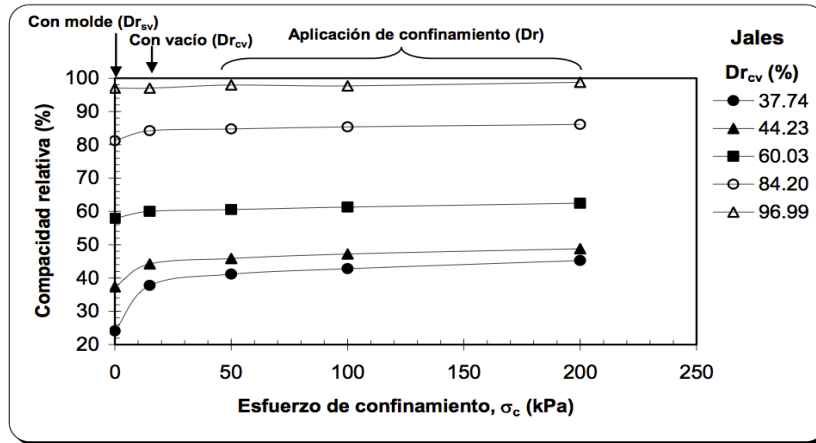
Figura 1.17 Relación de Poisson para las muestras huecas y sólidas durante la consolidación y en la etapa de ensaye, en un plano  $p'$  constante (Chaudhary *et al.*, 2003).

Con el propósito de medir la relación de Poisson con la deformación axial y radial en el tercio central, Flores (2009), realizó la instrumentación y automatización del equipo triaxial cíclico MTS utilizado en esta investigación (figura 2.1), en el cual se pueden ensayar probetas de 10.14 ó 15.24 cm de diámetro y de 26 ó 30 cm de altura, respectivamente.

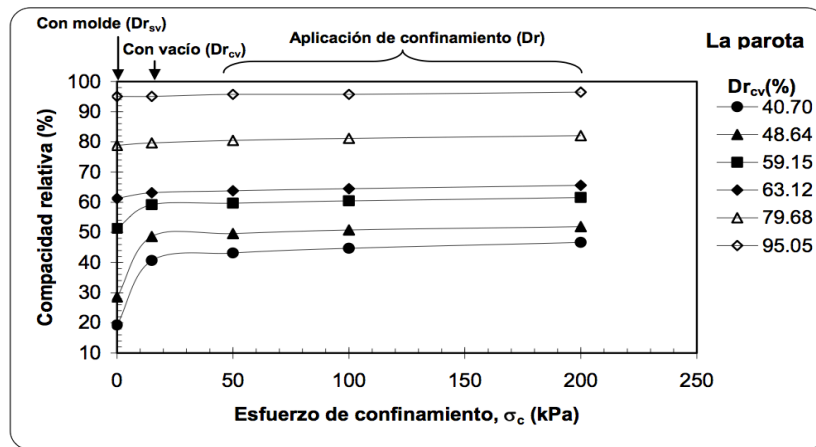
Se ensayaron dos materiales granulares: la arena de residuo minero de la unidad minera “Las Charcas” clasificación SUCS: *SM-Arena limosa*, con arista predominantemente angulosas, una densidad relativa de 3.02 y valores de relación de vacíos máxima y mínima de 1.55 y 0.60, respectivamente. El segundo material es “La Parota” tomado de un banco de material para construcción de presas con una clasificación del SUCS: *SP-Arena mal graduada*, siendo un material aluvial, de forma redondeada o subredondeada, con una densidad relativa de 2.69 y valores de relación de vacíos máximo y mínimo 0.80 y 0.42, respectivamente.

La muestra de suelo se formó utilizando un método de compactación estática que consiste en formar la probeta en diez capas, con doce apisonadas aplicadas por peso propio por capa, utilizando un pisón de diámetro un poco mayor al radio de la muestra, con pesos de pisón que van de 0.50 a 6 kg fuerza y contenidos de agua en el suelo en un intervalo que cubre el correspondiente al óptimo.

La probeta de suelo pasa por diferentes etapas, desde su montaje hasta la aplicación de la excitación dinámica, y en algunas de estas etapas sufre densificación. En este apartado se define la metodología para evaluar cuánto se densifica la muestra en las diferentes etapas del ensaye, desde la formación del espécimen hasta el inicio de la etapa de falla, lo cual se muestra en la figura 1.18.



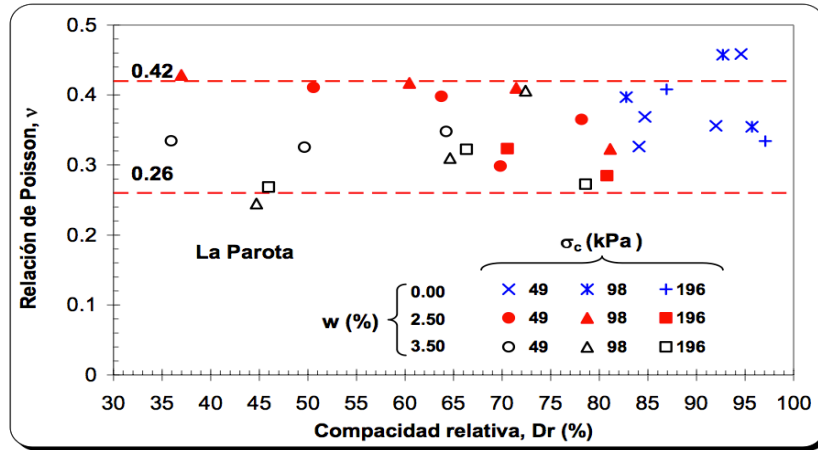
a) Material "Las Charcas"



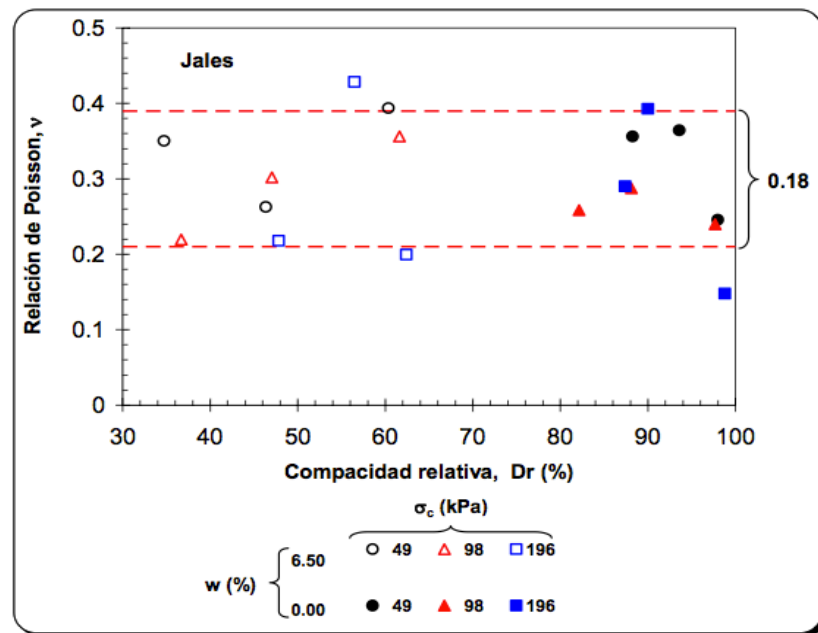
b) Material "la Parota"

Figura 1.18 Historia de la variación de la compacidad relativa en los materiales (Flores, 2009).

Al presentar los resultados de los tres contenidos de agua y cómo cambia con la compacidad relativa (figura 1.19a), se aprecia que el intervalo de variación de la relación de Poisson está entre 0.26 y 0.42, con un valor medio de 0.33, para las compacidades relativas que van de 35 a 97%, para los diferentes contenidos de agua y esfuerzos de confinamiento. En general se esperaría que conforme se incremente la compacidad relativa del material, la relación de Poisson fuese menor, pero vemos que para los suelos secos cuyas compacidades relativas son las más altas, los valores de relación de Poisson son relativamente más altos que para los contenidos de agua de 2.5 y 3.5%, tal como se indicó en el párrafo anterior.



a) La Parota



b) Las Charcas

Figura 1.19 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y el contenido de agua, materiales La Parota y Las Charcas (Flores, 2009).

Otros de los pocos autores que han estudiado la relación de Poisson en arenas son Kumar y Madhusudhan (2010), haciendo uso de elementos bender y exteder para medir las ondas P y S en probetas de arena seca montadas en una cámara resonante, las cuales fueron preparadas con un suelo homogéneo de 50 mm (diámetro) x 100 mm (altura) y formadas con el método de pluviación [Vaid y Negussey, (1984); Cresswell *et. al.*, (1999)]. usando tres diferentes rangos de tamaño en la partículas, para llevar a cabo todos los experimentos: arena gruesa (2.00 mm – 4.75 mm), grano medio (0.425 mm – 2.00 mm) y arena de grano fino (0.075 mm – 0.425 mm).

Para el análisis del tiempo de recorrido de las señales, fueron utilizados tres métodos diferentes: (a) primer tiempo de arribo, (b) el primer pico a pico, y (e) el método de correlación cruzada [Mancuso *et al.*, (1989); Viggiani y Atkinson, (1995)].

Se observó que en el caso de las mediciones de ondas P, la diferencia en los tiempos de recorrido obtenidos a partir de los tres diferentes métodos era muy marginal, por lo que se utilizó el promedio de las tres veces para el análisis de todos los resultados. Sin embargo, en el caso de las ondas S, se encontró que el primer tiempo de llegada era generalmente un poco más pequeño en comparación con los otros dos métodos, lo que fue quizás a causa de la generación de una señal de onda P menor por efectos de campo, que alcanzó el primer receptor e hizo los tiempos de recorrido ligeramente menores, que la obtenida a partir de los otros dos métodos. Por lo tanto, en el caso de las mediciones de la onda S, se promedió sólo dos veces, el cual se determinó a partir del primer pico a pico y los métodos de correlación cruzada, utilizando este promedio para analizar todos los resultados.

Las variaciones obtenidas de la relación de Poisson para un esfuerzo efectivo de confinamiento y diferentes rangos de densidad relativa se muestran en las figuras 1.20 (a), (b) y (c); estas figuras están asociadas con los tres diferentes rangos de tamaños de las partículas de la arena elegida.

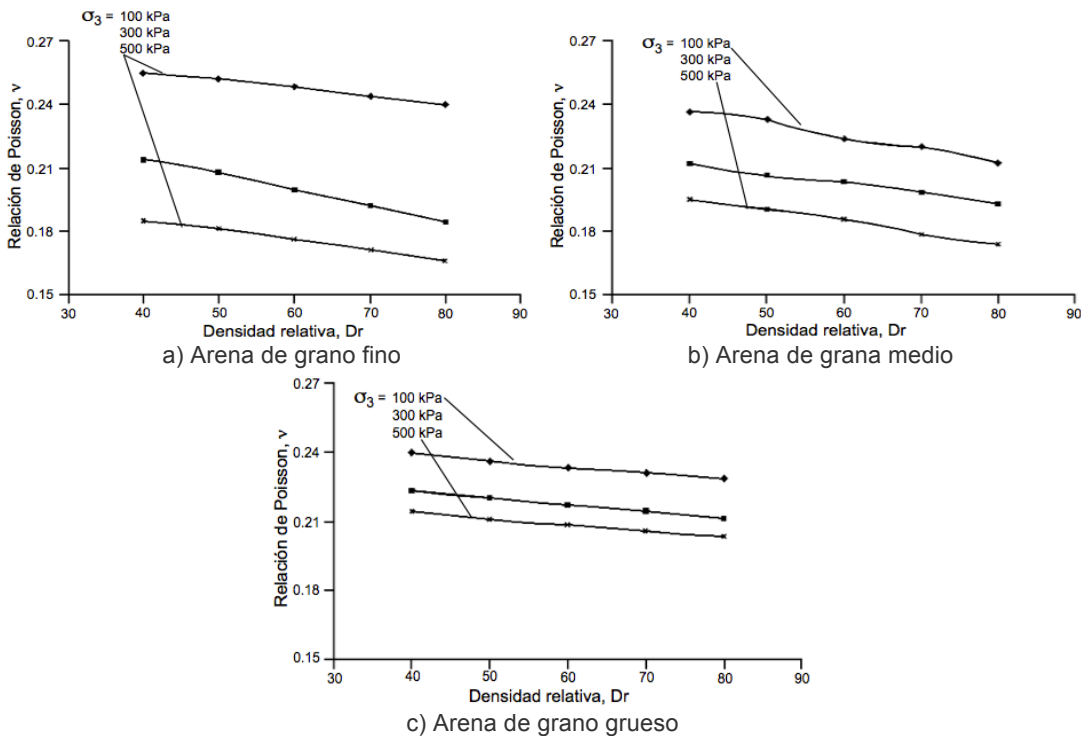


Figura 1.20 La variación de la relación de Poisson con densidad relativa a diferentes presiones efectivas de confinamiento (Kumar y Madhusudhan, 2010).



Otro de los autores que han analizado la relación de Poisson, utilizando cristales piezoeléctricos para medir las velocidades de onda en probetas de arena seca montada en una cámara resonante, fue Valle (2006). Usando disco piezoeléctrico, PD, para las mediciones de ondas compresibles y elementos bender BE en caso de las ondas de corte.

El material utilizado: Arena de mortero lavado obtenido de la llanura de inundación del río Colorado, con una clasificación SUCS: SP-Arena mal graduada, con un tamaño medio de grano  $D_{50} = 0.31$  mm, y un tamaño de grano efectivo de  $D_{10} = 0.16$  mm, una densidad relativa de 2.67, y relación de vacío máxima y mínima de 0.839 y 0.563, respectivamente.

Se ensayaron dos especímenes a los cuales le llamaron BR1 y BR2, con las características siguientes: BR1, con un diámetro de 6.32 cm y una altura de 14.22 cm y BR2, 6.27 cm de diámetro y 13.6 cm de altura, la compacidad relativa es de 55 y 64%, respectivamente, y una relación de vacíos 0.62 para BR1 y 0.60 para BR2.

Al espécimen BR1 se le aplicaron incrementos de presión de confinamiento 48-387 kPa. En el caso del espécimen BR2, los incrementos de presión de confinamiento fueron 14-387 kPa, las velocidades compresibles y de corte, obtenidas para ambas muestras se presentan en la tabla 1.2.

Tabla 1-2 Estimación de la relación de Poisson en muestras de arena seca BR1 y BR2, usando  $V_p$  y  $V_s$  (Valle, 2006).

Medición No.	Muestra BR1				Muestra BR2			
	Presión de confinamiento psi (kPa)	$V_p$ fps (m/s)	$V_s$ fps (m/s)	Poisson's Relación	Presión de confinamiento psi (kPa)	$V_p$ fps (m/s)	$V_s$ fps (m/s)	Poisson's Relación
1	7 (48)	1320 (402)	749 (228)	0.26	2 (14)	981 (294)	563 (187)	0.25
2	14 (97)	1554 (474)	895 (273)	0.25	4 (28)	1174 (358)	648 (226)	0.28
3	21 (145)	1650 (503)	969 (295)	0.24	7 (48)	1320 (402)	761 (253)	0.25
4	28 (93)	1791 (546)	1062 (324)	0.23	14 (97)	1571 (486)	911 (312)	0.25
5	35 (242)	1863 (568)	1124 (343)	0.21	28 (193)	1792 (546)	1046 (354)	0.24
6	56 (387)	2021 (616)	1268 (386)	0.18	56 (387)	2039 (608)	1252 (390)	0.20

Con los valores de  $V_p$  y  $V_s$ , obtenidos se calcularon las relaciones de Poisson ( $\nu$ ), para cada uno de los incrementos de presión de confinamiento aplicados en las muestras de arena seca BR1 y BR2, lo cual se presenta en la Figura 1.21 y los valores correspondientes se muestran en la Tabla 1.2. Es evidente que el valor de la relación de Poisson disminuye ligeramente a medida que aumenta la presión de confinamiento.

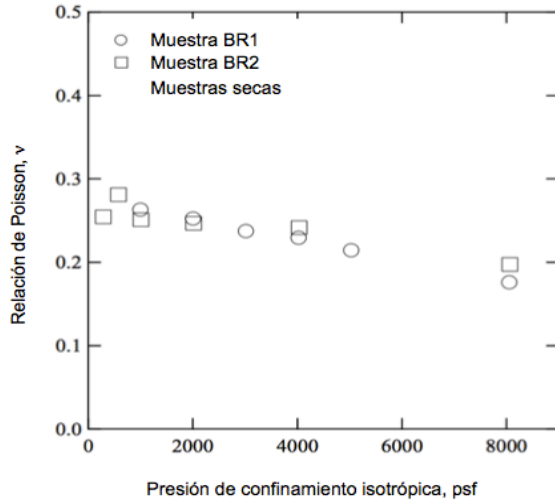


Figura 1.21 Variación de la relación de Poisson con respecto a la presión de confinamiento isotrópica en las muestras BR1 y BR2 (Valle, 2006).

En el mismo contexto, Fioravante (2000) instaló transductores piezoeléctricos (elementos bender BE y discos piezoeléctricos PD) en la base y cabezal de una cámara triaxial. Esta disposición de transductores permite la medición de las ondas en la probeta en la dirección vertical típica. Sin embargo, se establecieron elementos bender alrededor de los lados de la probeta con el fin de medir la onda de corte polarizado y ondas de compresión en dirección horizontal y oblicua, como se muestra en la figura 1.22. El objetivo principal fue evaluar el efecto de la anisotropía en los módulos ( $M_{\text{máx}}$  y  $G_{\text{máx}}$ ) en dos tipos de suelos granulares (Arenas de Ticino y Kenia).

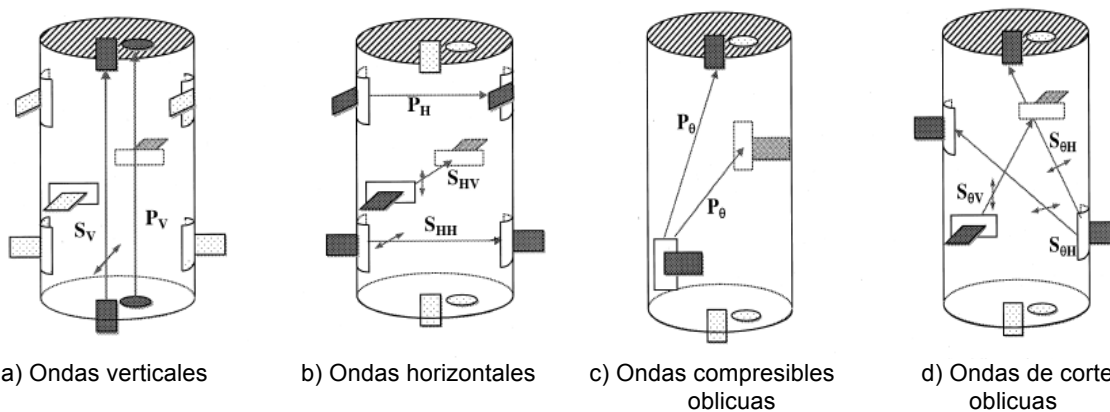


Figura 1.22 Esquema de las ondas polarizadas transmitidas por los transductores piezoeléctricos (Fioravante y Capoferri, 2001).

Para investigar la anisotropía interna, se realizaron dos ensayos triaxiales isotrópicos en la arena Ticino, las muestras se reconstituyeron por pluviación con casi el mismo índice de vacío inicial (medido valores: 0.86 y 0.90) y sometidos a presiones efectivas isotrópicas (medidas: 20, 25, 50 y 100 kPa). En cada paso, después de un periodo de

descanso de 10 min, las velocidades de ondas verticales, horizontales y oblicuas fueron determinadas, los resultados se presentan en la figura 1.23.

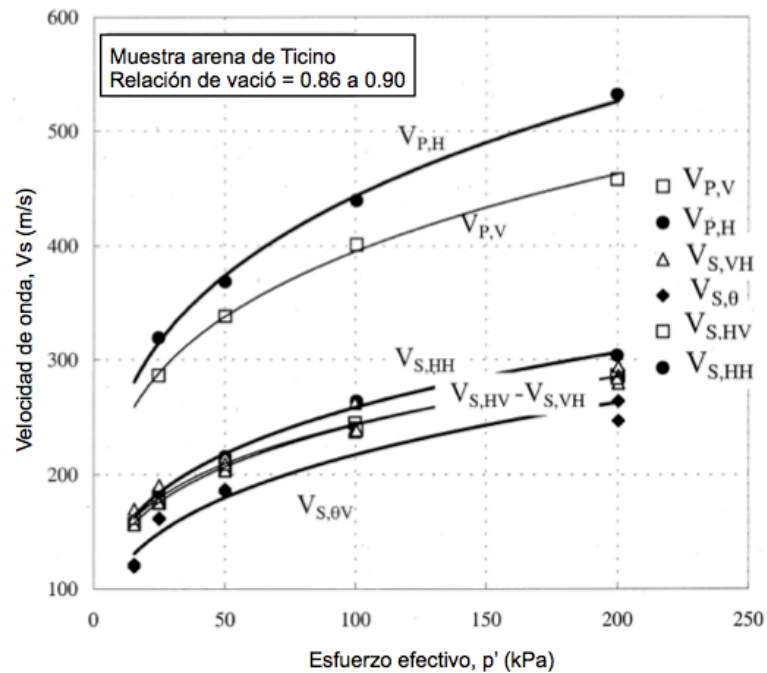
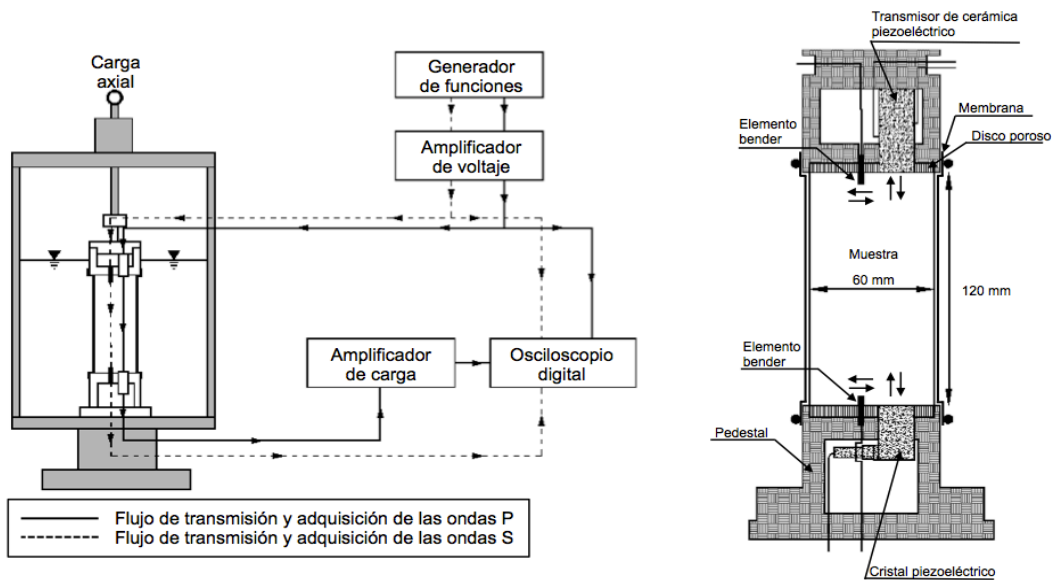


Figura 1.23 Esquema de las ondas polarizadas transmitidas por los transductores piezoeléctricos (Fioravante y Capoferri, 2001).

Con el propósito de evaluar la resistencia a la licuación de una arena parcialmente saturada, Tsukamoto, *et al.*, (2002) acondicionaron una cámara triaxial cíclica en la que se puede llevar a cabo pruebas triaxiales en condiciones de consolidación isotrópica y al mismo tiempo medir las velocidades de onda de compresión y de cortante, cuyo esquema se muestra en la figura 1.24. Estos investigadores llevaron a cabo una serie de ensayos donde se midió la variación de las velocidades de onda de compresión,  $P$ , con la variación del grado de saturación y el efecto de éste en la resistencia a la licuación, para lo cual ejecutaron ensayos triaxiales cíclicos inmediatamente después de realizar la medición de la velocidad de onda. Los resultados de las velocidades de onda  $P$  ( $V_p$ ) y de corte  $S$  ( $V_s$ ), indicaron que  $V_p$  tienden a incrementarse de 500 a 1800 m/s, aproximadamente, cuando el valor de  $B$  de Skempton se incrementa de 0 a 0.95, respectivamente, para un grado de saturación final entre 90 y 100%. Esto indica que el valor de  $V_p$  se puede expresar en función de dos variables principales, el valor de  $B$  y la relación de Poisson del esqueleto de suelo, el cual es definido por las pequeñas deformaciones registradas en la masa de suelo. De acuerdo con estos investigadores, la ventaja de usar las velocidades de onda  $P$  como vinculación para identificar el grado de saturación y por ende la resistencia a la licuación puede ser resumida como sigue:

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

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



a) Sistemas para obtener las velocidades de onda      b) Instrumentación del espécimen

Figura 1.24 Cámara triaxial cíclica acondicionada para medir velocidades de ondas P y S (Tsukamoto *et al.*, 2002).

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

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

Los transductores que generan el pulso de las ondas P son de cerámica piezoeléctrica de 1.5 cm de diámetro por 4.2 cm de altura, mientras que los receptores son acelerómetros piezoeléctricos de 1.75 cm de diámetro por 0.98 cm de altura. Estos elementos están fijos a los cabezales y en contacto directo con la probeta. Se colocaron

además un par de elementos laminares, uno como emisor y otro como receptor, para medir la velocidad de ondas de cortante del espécimen.

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

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

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \quad (6)$$

De los resultados experimentales que arrojó la investigación, mostrados en la figura 1.25, se puede observar que cuando el material está seco, la relación de Poisson oscila entre 0.22 y 0.44, para todas las densidades estudiadas, pero conforme aumenta el valor de la B de Skempton la banda de variación se va cerrando, hasta llegar al valor de 0.50, cuando  $B = 0.95$ .

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

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{2(1-\nu)}{3(1-2\nu)(1+B)} \quad (7)$$

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

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

Se formaron probetas compactadas con diferente contenido de agua, con el objetivo de obtener muestras con diferentes grados de saturación. Se ensayaron tres materiales:

los suelos 1 y 2 son de baja plasticidad y el 3 una mezcla de 25% de bentonita con el material del suelo 2, para tener un material con alta plasticidad.

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

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

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

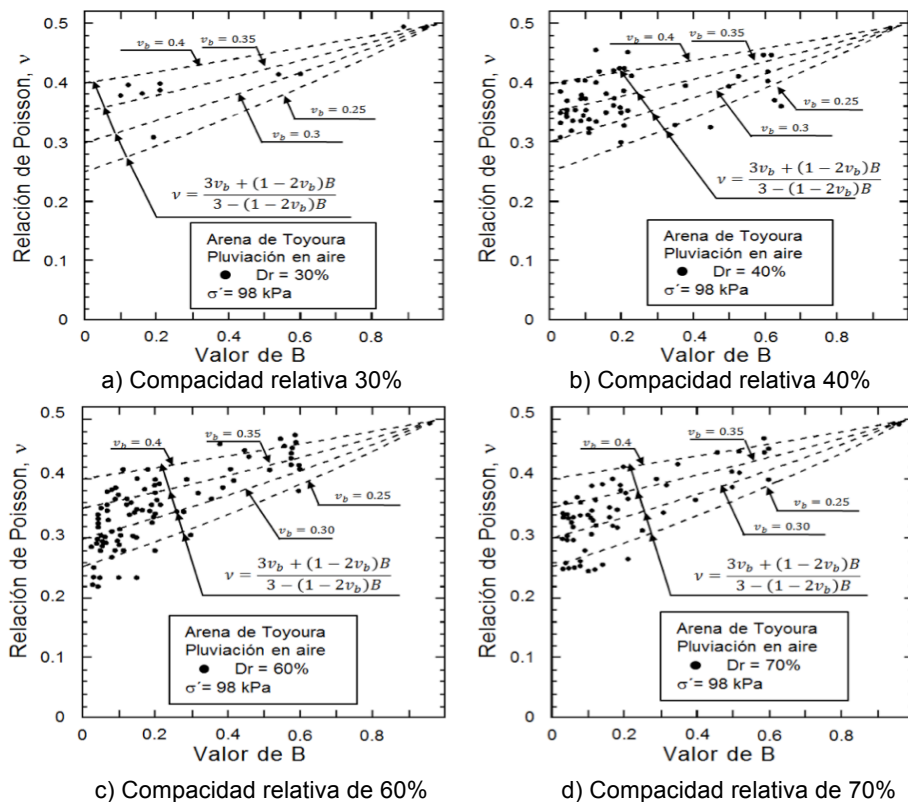


Figura 1.25 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa y la B de Skempton (Tsukamoto *et al.*, 2002).

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

Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la figura 1.26, donde se observa que para los tres materiales estudiados la variación de la relación de Poisson con el grado de saturación se muestra en forma de abanico, para los materiales menos saturados oscila entre 0.05 y 0.30 y conforme se satura la muestra, disminuye un poco la dispersión, hasta llegar a una variación entre 0.35 y 0.50 cerca de la saturación total. Estos resultados muestran una tendencia clara de aumento de la relación de Poisson con el grado de saturación, pero con una gran dispersión de los resultados.

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

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

Dvorkin y Nur en 1996, con el objetivo de analizar la influencia de la porosidad en la variación de las velocidades de compresión y cortante, ensayaron dos tipos de arenisca del Mar del Norte. El primer material es de la zona de Oseberg (Strandenes, 1991) el

cual tiene una alta anisotropía intrínseca con porosidades entre 0.13 y 0.32. Este material está formado principalmente de arenas de cuarzo.

El segundo material es una arena no consolidada de la zona de Troll, con porosidades entre 0.22 y 0.38 (Blangy *et al.*, 1993), con cementante prácticamente ausente. En la figura 1.27 se muestran los resultados experimentales de las velocidades de ondas S y P, para probetas sometidas a esfuerzos de confinamiento de 5, 10 y 30 MPa, con el material seco y saturado. Como se puede ver y como es de esperarse, las  $V_s$  no varían al saturar el material, mientras que las  $V_p$  sí se incrementan con la saturación de la muestra.

En la figura 1.28 se muestran los valores de la relación de Poisson para los mismos niveles de esfuerzo, en condiciones saturadas y secas. Se puede ver que la relación de Poisson, como lo demuestran otros estudios, es más alta para las muestras saturadas. Tanto para las muestras saturadas como secas, al incrementarse la porosidad en el intervalo experimental de ensaye de 0.20 a 0.40, aumenta la relación de Poisson, debido a que el material se encuentra en una condición más suelta.

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

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

Sin embargo, en un trabajo realizado por Salem en el año 2000 en el cual llevó a cabo mediciones de refracción sísmica en materiales principalmente arenosos, registró las velocidades de ondas P y S, para lo cual utilizó un sistema de 24 geófonos instalados en línea, con una separación de 2 m, lo cual permitió determinar la relación de Poisson y cuyos resultados se muestran en la figura 1.29. Se encontró que este parámetro tiene una relación lineal con la porosidad, conforme aumenta la porosidad, disminuye la relación de Poisson. La relación de Poisson positiva corresponde a materiales superficiales y materiales subyacentes, tales como limos y arcillas y los valores negativos indican suelos preconsolidados, con una fuerte anisotropía.



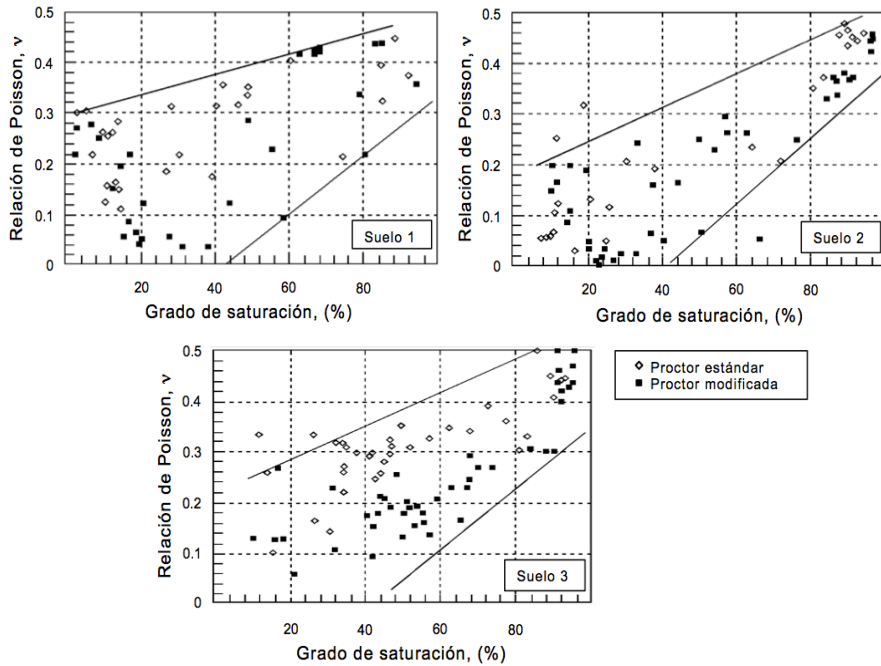


Figura 1.26 Variación de la relación de Poisson con el grado de saturación (Gokhan *et al.*, 2001).

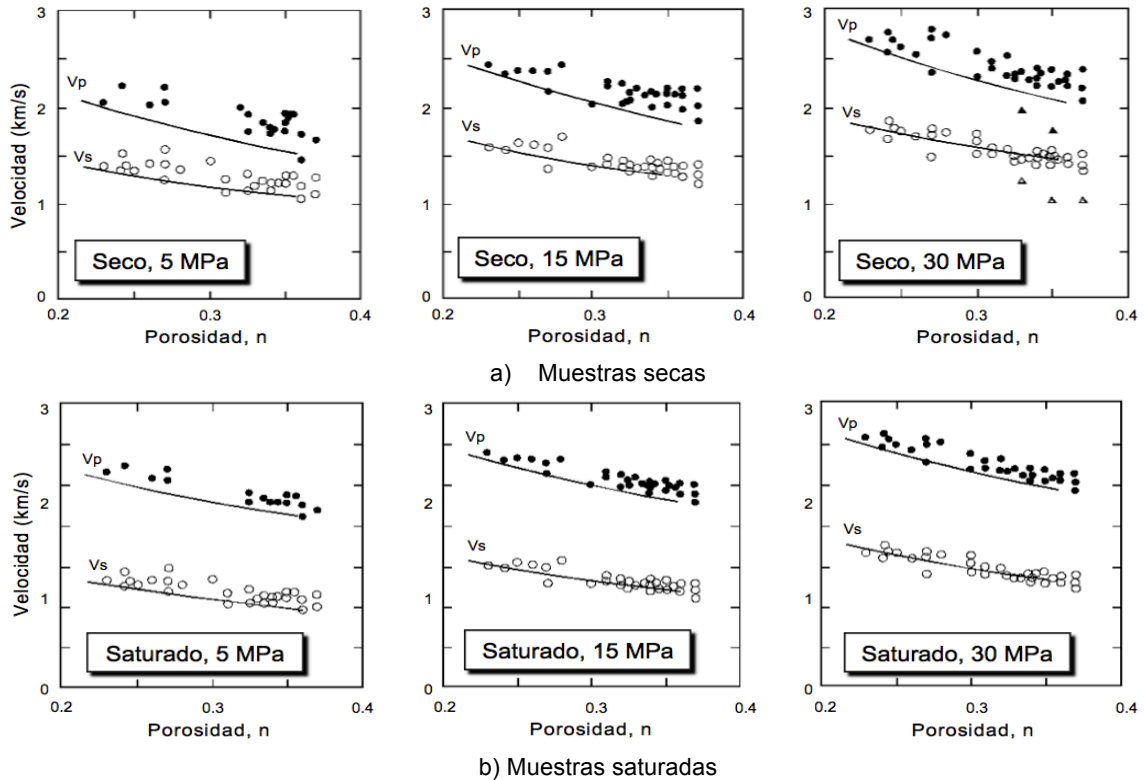


Figura 1.27 Velocidades en muestras secas y saturadas en suelo de Troll. Los símbolos llenos corresponden a las velocidades de onda P y los vacíos a las S. Los triángulos corresponden a resultados con arena de Ottawa obtenidos por Han (1986), Yin (1993) y Domenico (1984). (Dvorkin y Nur, 1996).

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

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

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

De acuerdo con los resultados que reportan, se observa que conforme se incrementa la presión de confinamiento en el intervalo descrito, el ángulo de fricción decrece de 41 a 37 grados, mientras el módulo de elasticidad inicial se incrementa de 10 a 250 MPa. Respecto a la relación de Poisson, ésta decrece de 0.45 a 0.22, tal como se ilustra en la figura 1.30.

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

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

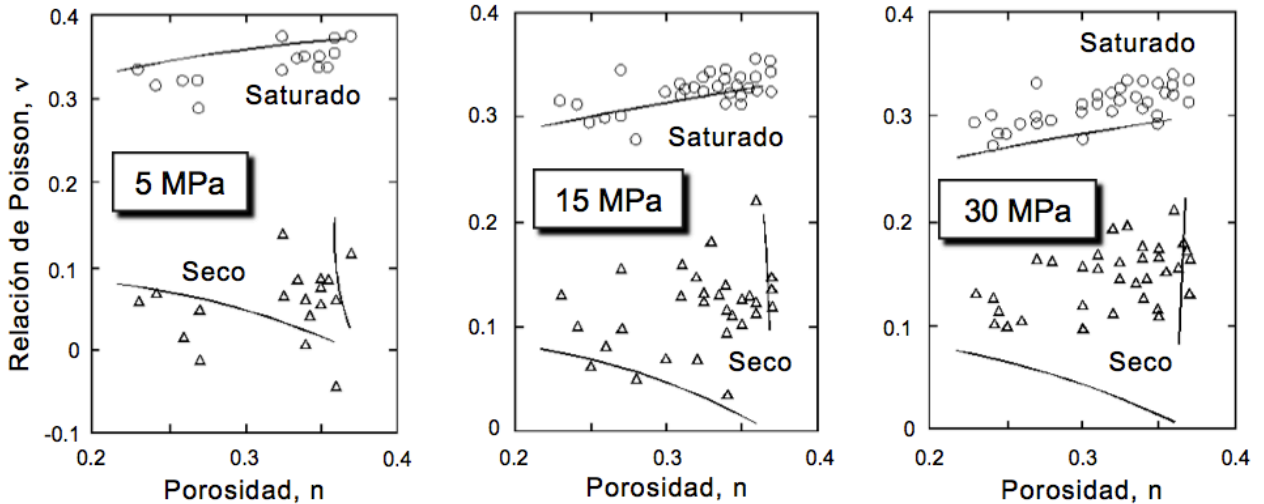


Figura 1.28 Relaciones de Poisson para muestras secas y saturadas de la arena de Troll (Dvorkin y Nur, 1996).

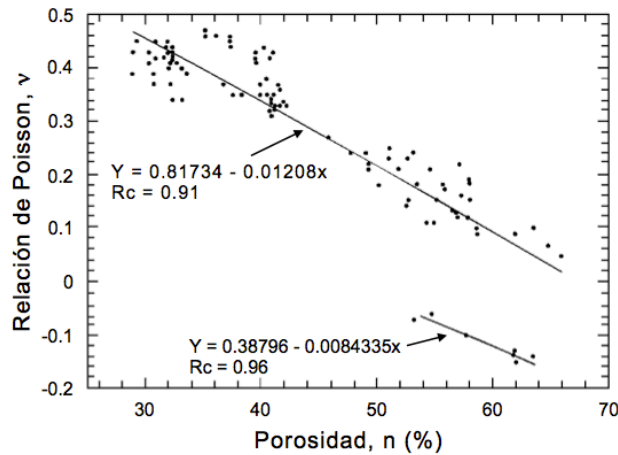


Figura 1.29 Variación de la relaciones de Poisson con la porosidad, obtenidas con refracción sísmica (Salem, 2000).

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

Las probetas se sometieron a presión axial, presión radial externa e interna y posteriormente a torsión en la parte superior de la probeta. Se instaló una serie de *strain gages* para registrar los desplazamientos en la periferia de la muestra, con la distribución mostrada en la figura 1.31.

Se determinó el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ) para tres especímenes (A\*, B\* y C\*) a los cuales se les aplicó un esfuerzo desviador axial incremental. Los resultados se muestran en la figura 1.32. Para el intervalo de esfuerzo desviador aplicado tanto el módulo de rigidez como la relación de Poisson se mantienen casi constantes. El módulo de elasticidad promedio está en el orden de 21,000 MPa y la relación de Poisson en 0.20.

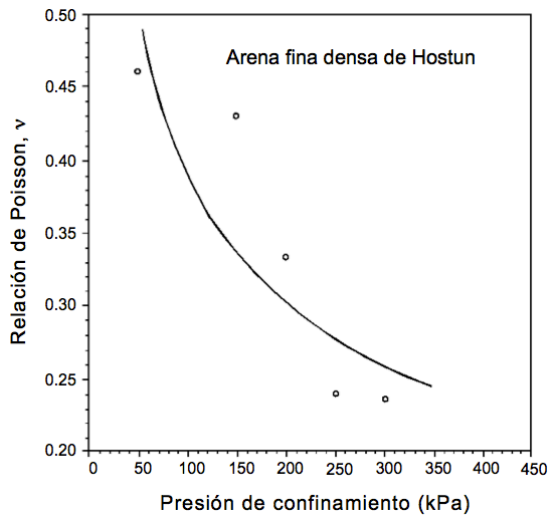


Figura 1.30 Variación de la relación de Poisson con la presión de confinamiento (Fawaz *et al.*, 2002).

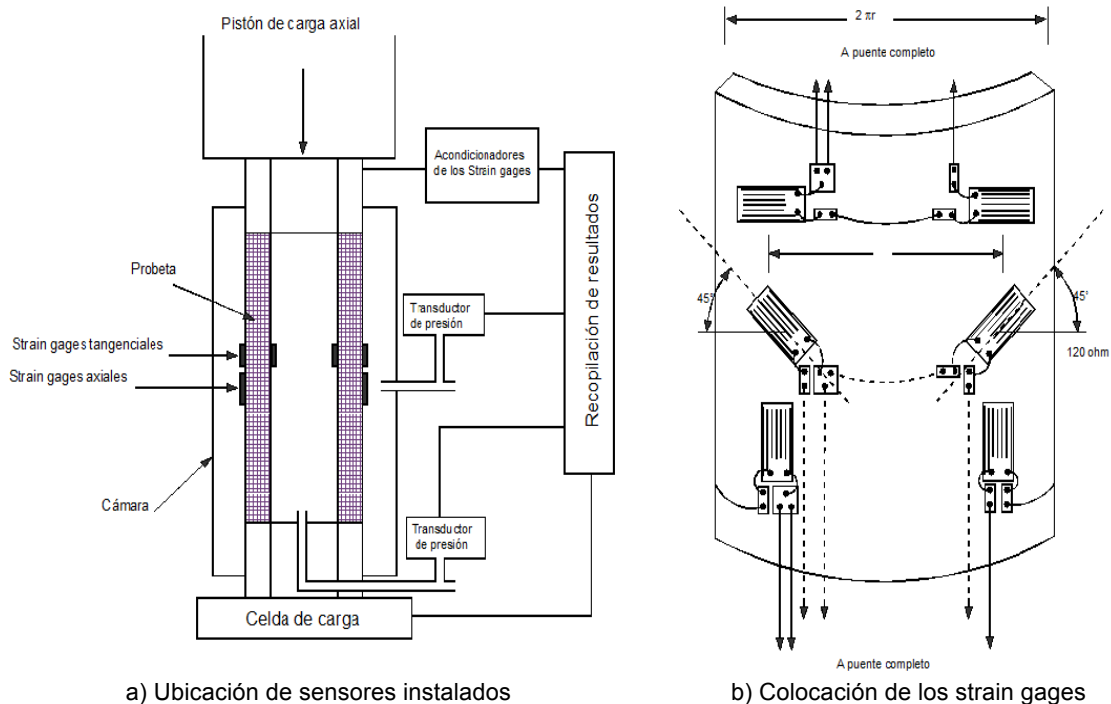


Figura 1.31 Variación de la relación de Poisson con la presión de confinamiento (Talesnick *et al.*, 2000).

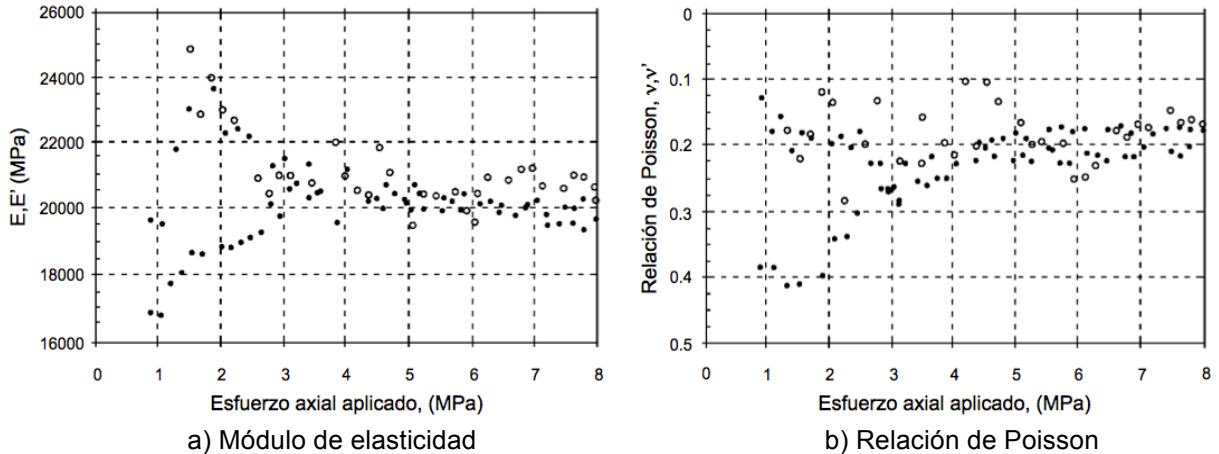


Figura 1.32 Variación de la relación de Poisson y del módulo de elasticidad con la presión de confinamiento (Talesnick *et al.*, 2000).

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

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

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

En el trabajo se reportan nueve ensayos, cuatro con carga monotónica (ML) y los cinco restantes con carga cíclica (CL). Los ensayos monotónicos se consolidaron a 78.5 kPa y se llevaron a la falla a una velocidad de deformación axial de 0.06 %/min. La distorsión angular,  $\gamma$ , y el esfuerzo cortante,  $\tau$ , se obtuvieron como  $\epsilon_a - \epsilon_r$  y  $(\sigma_a - \sigma_r)/2$ , respectivamente. El módulo de rigidez secante,  $G_{sec}$ , se obtuvo de la curva  $\tau$  vs  $\gamma$  y la relación de Poisson secante,  $v_{sec}$ , de la curva  $\epsilon_r$  vs  $\epsilon_a$  (figura 1.33).

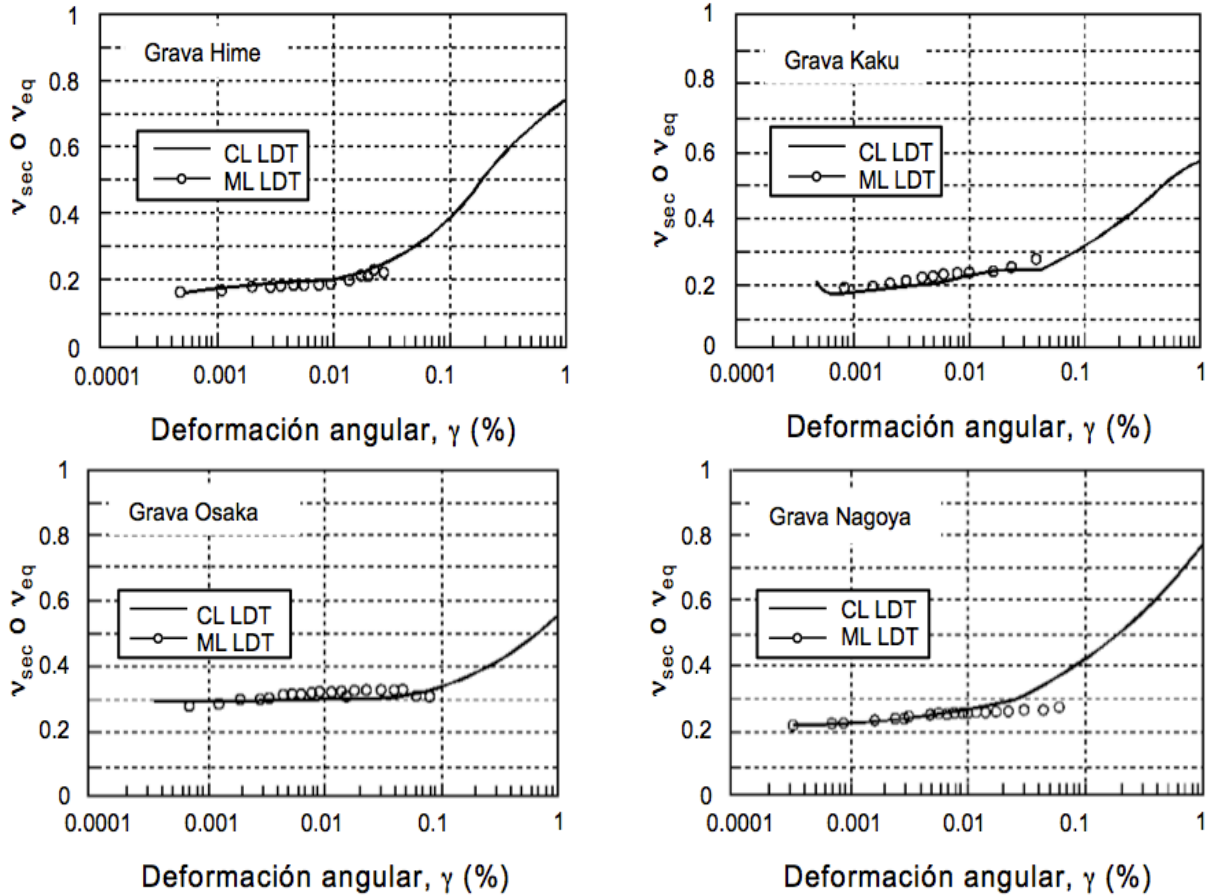


Figura 1.33 Variación de la relación de Poisson obtenida en pruebas triaxiales monotónicas - ML- y cíclicas -CL- (Dong *et al.*, 1994).

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

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

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

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

Usando una muestra de grava de Kaku densa, se ensayó bajo condiciones consolidadas drenadas (CD) a diferentes números de ciclos de excitación. En la figura 1.34 se pueden ver los resultados que reportan los ensayos, en los que se aprecia que conforme aumenta el número de ciclos de excitación, el módulo de rigidez disminuye y la relación de Poisson se incrementa de manera poco significativa, en ambos casos. Respecto a la influencia de la distorsión angular, mientras que  $G$  se degrada conforme se incrementa  $\gamma$ ,  $\nu$  permanece prácticamente constante.

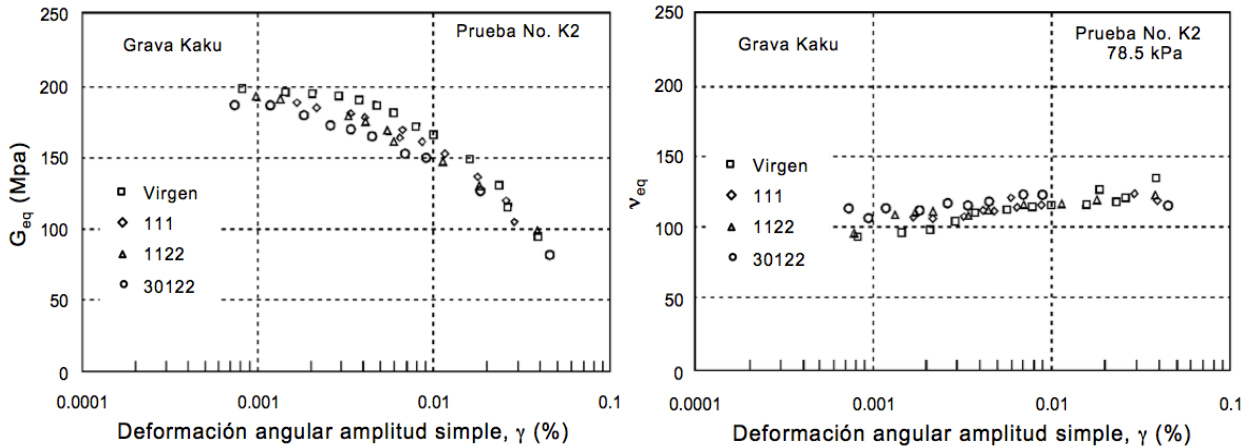


Figura 1.34 Variación del módulo de rigidez y la relación de Poisson obtenidos en pruebas triaxiales cíclicas (Dong *et al.*, 1994).

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

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

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

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

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

En la figura 1.35 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente en los que se puede observar que el valor de la relación de Poisson se mantiene casi constante con el incremento de la distorsión angular, excepto en la muestra inalterada del estrato superior que inicia en 0.23 para la distorsión más pequeña y concluye en 0.34 cercano a la falla del suelo. Se aprecia también que los especímenes en condiciones inalteradas muestran valores de  $\nu$  un poco mayores que los reconstituidos.

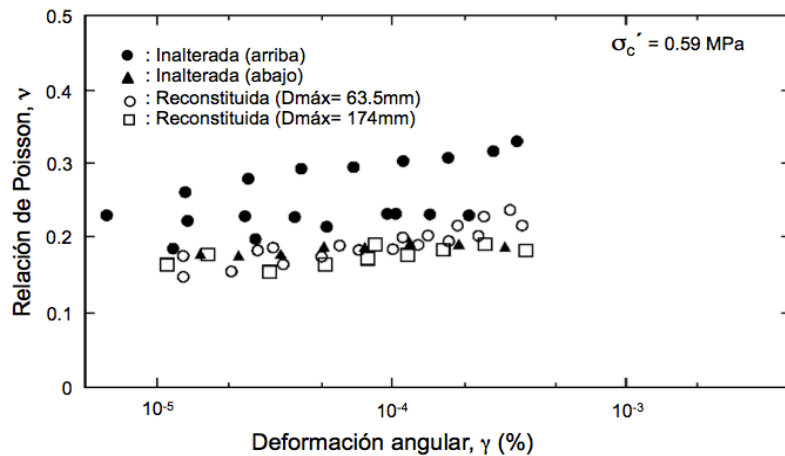


Figura 1.35 Variación de la relación de Poisson obtenida en pruebas triaxiales cíclicas en muestra inalteradas y reconstituidas de grava (Yasuda *et al.*, 1994).

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



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

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

En la figura 1.36 se muestra la variación de la relación de Poisson en probetas secas, con diferentes relaciones de vacíos, sometidas a esfuerzos de confinamiento entre 0.05 a 0.55 MPa. Se puede ver que tanto la relación de vacíos como el esfuerzo de confinamiento no tienen una influencia aparente en la variación de la relación de Poisson, la cual se mantiene entre 0.2 y 0.3.

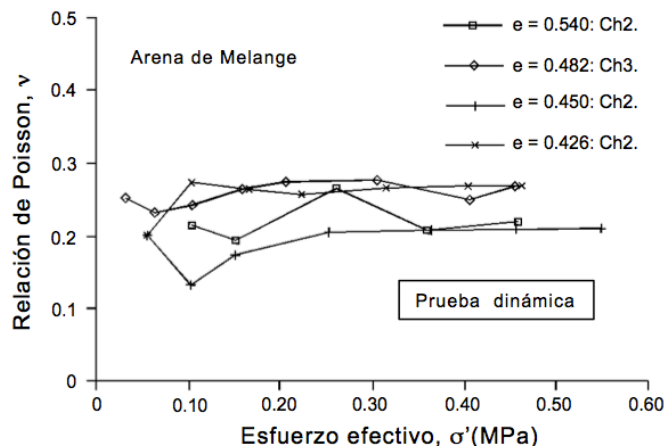


Figura 1.36 Influencia de la relación de vacíos y el esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson (Rivera, 1988).

En la figura 1.37 se muestran resultados de tres probetas con relaciones de vacíos iniciales semejantes (condiciones densas), dos de las cuales se ensayaron saturadas y una seca. Presentan relaciones de Poisson cercanas o iguales a 0.50 para las muestras saturadas y 0.20 para las secas. En ambos casos el esfuerzo de confinamiento no parece tener influencia en  $\nu$ , ya que éste permanece prácticamente constante con el incremento del esfuerzo.

En la figura 1.38 se presentan los resultados de ensayos secos ejecutados en columna resonante, para diferentes condiciones de esfuerzo de confinamiento, de 66 a 365 kPa,

para un intervalo de distorsión angular de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$ . Lo que se puede ver es que  $\nu$  está entre 0.25 a 0.30, sin mostrar una influencia clara del esfuerzo de confinamiento, confirmando lo que se muestra en la figura 1.33. Respecto a la influencia de la distorsión angular, se aprecia que  $\nu$  se mantiene constante hasta antes de  $10^{-4}$ , a partir del cual se presenta un leve incremento.

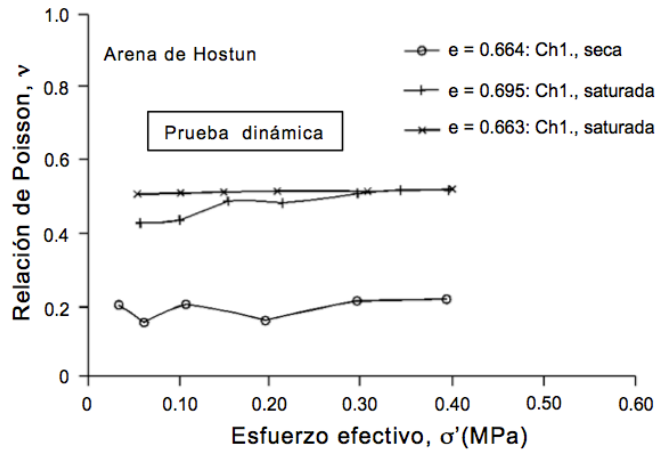


Figura 1.37 Influencia de la saturación y del esfuerzo efectivo en la relación de Poisson (Rivera, 1988).

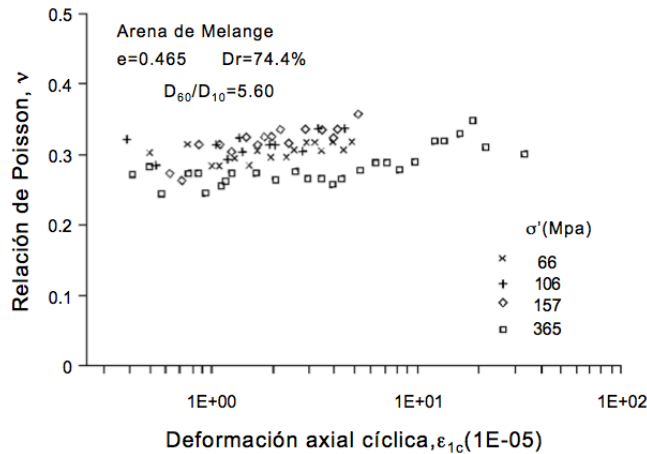


Figura 1.38 Influencia del esfuerzo efectivo y la distorsión angular en la relación de Poisson (Rivera, 1988).

Como también existen métodos para la interpretación de los datos obtenidos con técnicas geofísicas utilizadas en el campo, tales como cross-hole y las pruebas de fondo de pozo (véase, por ejemplo Richart *et al.*, 1970). Al igual que con estas técnicas, la velocidad de onda de corte comúnmente ha sido determinada por la medición directa del tiempo de viaje de la onda, lo principal de este método es la identificación de la primera onda. Una serie de deficiencias asociadas en el enfoque del dominio del tiempo han sido identificadas.

Arulnathan *et al.*, (1998) examinaron las cuestiones relacionadas con los reflejos de los cristales en la posición superior e inferior de un aparato triaxial en los que están montados. Otros han deducido que la reflexión de los límites influirá en las características de la señal recibida. Esta área no ha sido hasta ahora considerada a detalle.

El efecto, combinado estos y otros factores, así como la atenuación de la onda de corte a menudo resulta difícil identificar la llegada de la primera onda de corte, particularmente en arenas. Varias técnicas como la correlación cruzada (Sánchez-Salineró *et al.*, 1987) y el uso de la señal de entrada personalizada (Jovicic *et al.*, 1996) se han sugerido para formalizar la determinación del tiempo de arribo. En la práctica, cada una de los distintos métodos pueden dar resultados confusos y, por tanto, un elemento de "criterios técnicos" es confiar en el tiempo de viaje.

En la búsqueda de un método fiable y objetivo para determinar la velocidad de onda de corte, se ha intentado hacerlo en el dominio de la frecuencia.

Los problemas causados por los efectos transitorios se eliminan si en lugar de utilizar las señales impulsivas, se utiliza una señal armónica continua. Se vuelve mucho más difícil de leer el tiempo de viaje de onda de corte directamente, pero hay una serie de técnicas para extraer esta información de la fecha de adquisición. Una revisión completa se puede encontrar en Sasche y Pao (1978).

Tomando nota de que la respuesta medida incluye el comportamiento mecánico y eléctrico de los cristales piezoeléctricos, así como las características del material, Blewett *et al.*, 2000 propusieron un modelo de dispersión que incluye un cambio de fase de  $\pi$  radianes derivados de la resonancia del elemento bender, así como una dependencia de la frecuencia de  $G_0$  del material. La obra alude a la influencia de los límites de la muestra sobre las características de dispersión, pero los efectos no se cuantifican en su modelo.

Por lo general, es más común el uso de un par de elementos piezoeléctricos montados en el mismo aparato para medir la onda S y la velocidad de la onda P, respectivamente (por ejemplo, Schultheiss, 1981; Bates, 1989; de Alba y Baldwin, 1991; Brignoli *et al.*, 1996; Nakagawa *et al.*, 1996; y Fioravante Capoferri, 2001). Recientemente, Ling y Greening (2001) introdujeron un elemento híbrido llamado "elemento doblador-extensor." Una simple modificación que se haga al elemento bender para producir un elemento de extensión capaz de transmitir y recibir ondas P. La clave de su funcionamiento radica en la modificación de la configuración del cableado, de un

cableado de dos hilos uno positivo y otro negativo, a uno de tres hilos como se muestra en la figura 1.39 el cual cuenta con dos cables positivos en la parte exterior, y uno negativo en la parte interior.

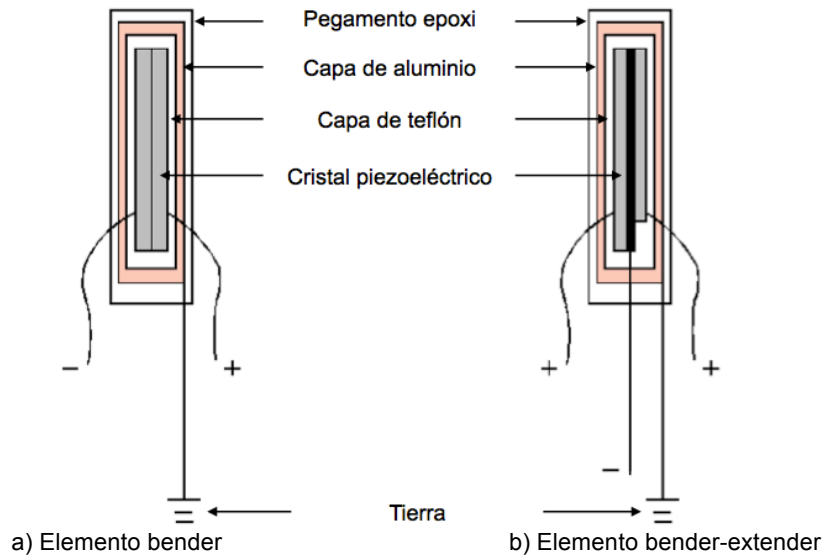


Figura 1.39 Arreglo de un bender y un bender-extender (Leong *et al.*, 2009).

---

# CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN

---

## 2.1 Características generales del equipo triaxial cíclico MTS

El equipo triaxial cíclico MTS (figuras 2.1) se utiliza para ejecutar pruebas triaxiales estáticas (carga monotónica) y dinámicas (señale periódica o aperiódica) a carga o desplazamiento controlado, en probetas de 10.14 ó 15.24 cm de diámetro y 26 ó 30 cm de altura, respectivamente. Consta, básicamente, de cinco elementos:

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

### 2.1.1 Sistema hidráulico de aplicación de carga

La carga es aplicada a la probeta por medio de un sistema hidráulico con presión de aceite (figura 2.2), el cual consta de una bomba que suministra aceite a dos acumuladores los cuales por medio de mangueras la transmiten a un pistón hidráulico, formando un circuito cerrado de presión de aceite.

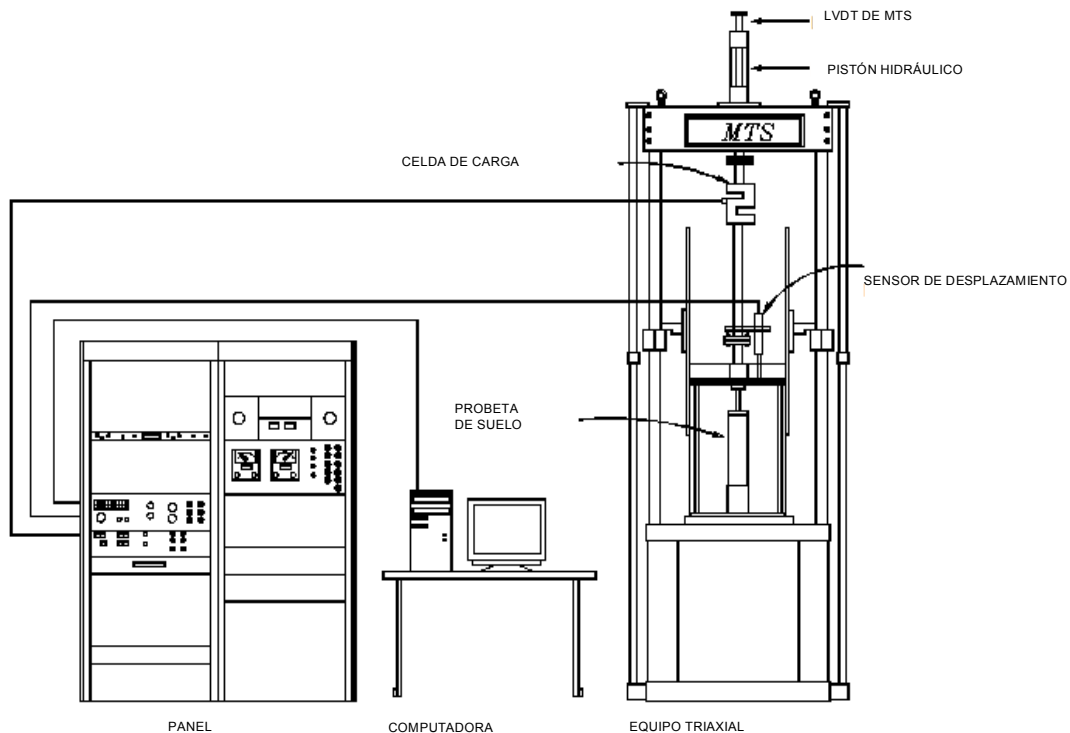


Figura 2.1 Esquema general del equipo triaxial cíclico MTS (Flores, 2009).

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



Figura 2.2 Sistema hidráulico para aplicar presión al pistón del equipo.

### 2.1.2 Panel de control

El equipo puede realizar el trabajo tanto en carga o desplazamiento controlado (figura 2.3), según sean los requerimientos, así como regular el porcentaje de trabajo de 10, 20, 50 ó 100%, con respecto al valor máximo del sensor de carga que esté instalado en el equipo (en este caso de 1000 kg) y de desplazamiento de 15 cm, si se controla el equipo con el LVDT de la MTS; de 5 cm, utilizando el sensor colocado en la tapa de la cámara. En este panel se da la ganancia al sistema para cuando éste trabaja a carga o desplazamiento controlado, según sea el caso.

Cuenta con dos botones para accionar la bomba de aceite, las cuales pueden ser baja o alta presión, según sean las necesidades de la prueba.

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

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

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

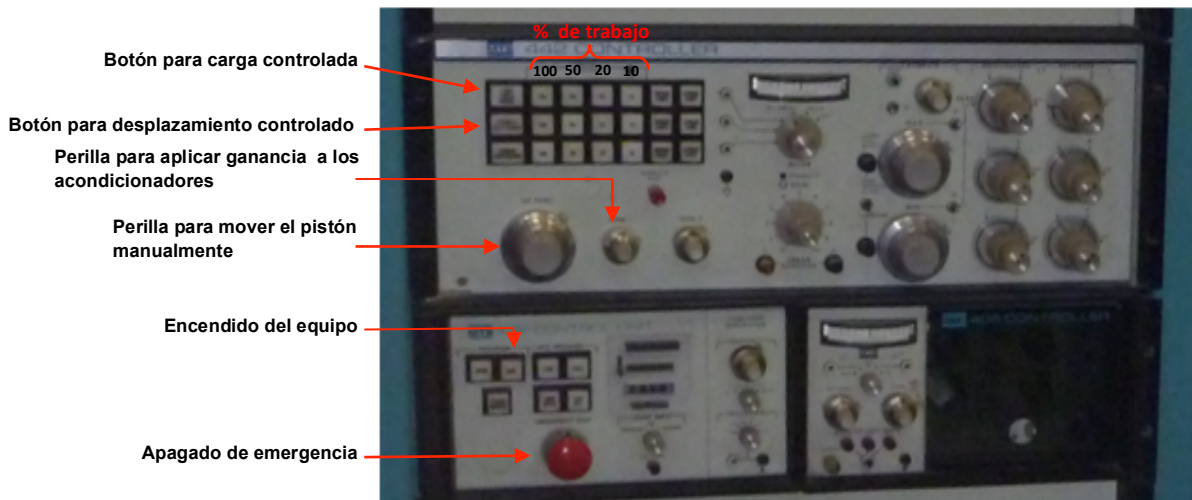


Figura 2.3 Panel de control.

### 2.1.3 Sistema de aplicación de presión (confinante y contrapresión)

El confinamiento y la contrapresión son aplicadas a la probeta dentro de la cámara triaxial, por medio de reguladores, los cuales permiten y gradúan el paso de presión de aire que proviene de un compresor automático con una capacidad de hasta  $7 \text{ kg/cm}^2$ .

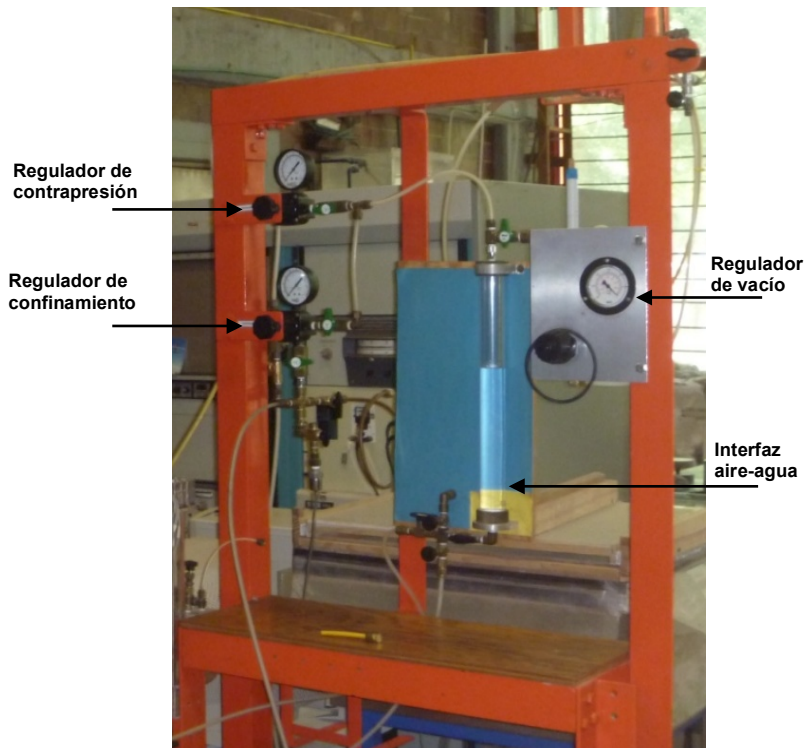


Figura 2.4 Tablero de regulador de presiones.



### 2.1.4 Sistema automatizado, control y procesamiento de datos.

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

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

### 2.1.5 Sistemas de mediciones locales en el tercio central de la probeta

El sistema de mediciones locales consiste en sensores de desplazamiento axial, desplazamiento radial, sensores de presión y celda de carga sumergible, los cuales miden el desplazamiento axial y radial en el tercio medio de la probeta, como también las variables de carga y desplazamiento, los rangos de estos se presentan en la tabla 2.1 y en la figura 2.5 se presenta un esquema de la posición en el montaje para los ensayos. La excitación es aplicada a través de la tarjeta de adquisición de datos instalada en el CPU de la computadora, usando una salida analógica, por lo cual es posible aplicar prácticamente cualquier excitación por más compleja que sea, en un intervalo de frecuencias de 0 a 5 Hz.

Tabla 2-1 Sensores instalados en el equipo triaxial cíclico (Flores, 2009).

Sensor	Cantidad	Parámetro a medir	Unidades	Intervalo de medición
LVDT	1	desplazamiento axial	mm	-75 a 75 mm
LVDT	1	desplazamiento axial	mm	-25 a 25 mm
LVDT	1	desplazamiento axial	mm	-10 a 10 mm
LVDT	2	desplazamiento axial	mm	-5 a 5 mm
Magnético	2	desplazamiento radial	mm	0 a 25 mm
Celda de carga	1	carga exterior de cámara	kg	0 - 500 kg
Celda de carga	1	carga interior de cámara	kg	0 - 500 kg
Celda de presión	2	presión de poro	kg/cm <sup>2</sup>	0 - 7.5 kg/cm <sup>2</sup>
Presión diferencial	1	cambio de volumen	mm <sup>3</sup>	0 a 50 cm col. agua
Acelerómetro	2	aceleración	m/seg <sup>2</sup>	0 a 100 g

Nota: Debido al nuevo pedestal instrumentado no se utilizó la celda de carga interna, como también no fueron necesarios el uso del acelerómetro ni de cambio volumétrico y de presión de poro para realizar de los ensayos que se incluyen en esta tesis.

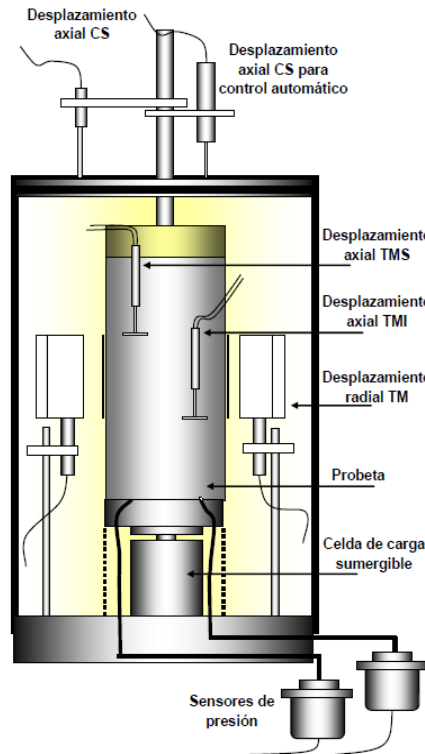


Figura 2.5 Esquema de distribución de sensores de medición local (Flores, 2009).

## 2.2 Características del equipo de generación y de medición de ondas

El equipo de generación y medición de ondas (figura 2.6) como su nombre lo dice, aprovecha las propiedades de los cristales piezoeléctricos induciendo una señal ya sea de compresión o de cortante por la probeta, obteniendo los tiempos de arribo tanto de señales de compresión como de la de corte. Está compuesto básicamente de tres elementos:

1. Sistema automatizado del equipo (control de señales).
2. Generador de funciones.
3. Osciloscopio.

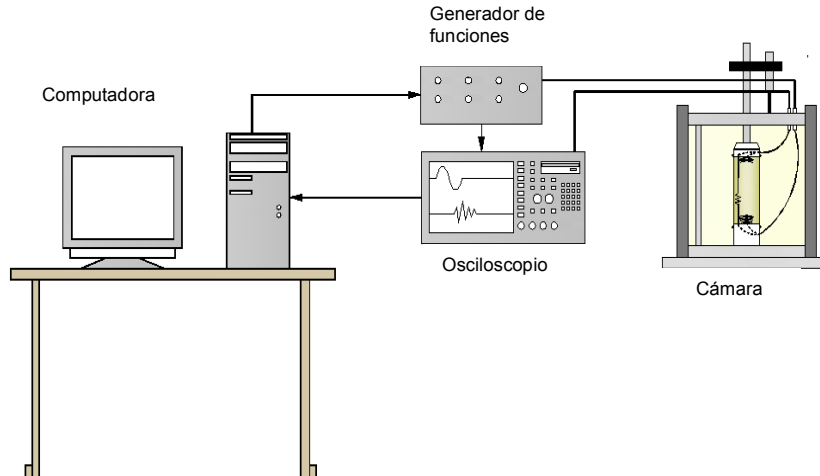


Figura 2.6 Esquema del equipo de generación y medición de ondas.

### 2.2.1 Sistema automatizado del equipo (control de señal)

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

Esta tarjeta está instalada en un CPU de la computadora, la cual se utiliza para dos funciones:

- 1) Se programa la frecuencia, amplitud y tiempo de retardo de la onda senoidal, la cual se manda al generador de funciones y éste a su vez a un osciloscopio, para visualizar la señal del elemento de expansión o de flexión, según sea el requerimiento de la prueba.
- 2) La excitación mecánica que reciben los elementos de expansión o de flexión se convierten en impulsos eléctricos y son visualizados en el osciloscopio. Una vez definida la onda con ayuda de tarjeta de adquisición de datos se pueden guardar el impulso generado y el impulso recibido, observando el tiempo de retardo.

El programa de manejo automático del equipo, la adquisición de datos y los módulos de reporte se hicieron en el lenguaje de LAB VIEW, un programa que trabaja bajo la plataforma de National Instrument. El programa de manejo fue conceptualizado y

desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM, y consta de los módulos: *operación, visualización*.

### 2.2.2 Generador de funciones

El generador de funciones consiste en un generador analógico complementado con un sistema digital, con lo cual se permite modificar los parámetros de la onda generada y así programarlo para tareas específicas.

Con el equipo generador de funciones se puede emitir el número de señales senoidales periódicas deseadas, en el rango de los 50 a los 200 Volts, y frecuencia de operación de 75 a 800 kHz. También es posible modificar el tiempo de retardo que llevará una señal respecto a la otra.

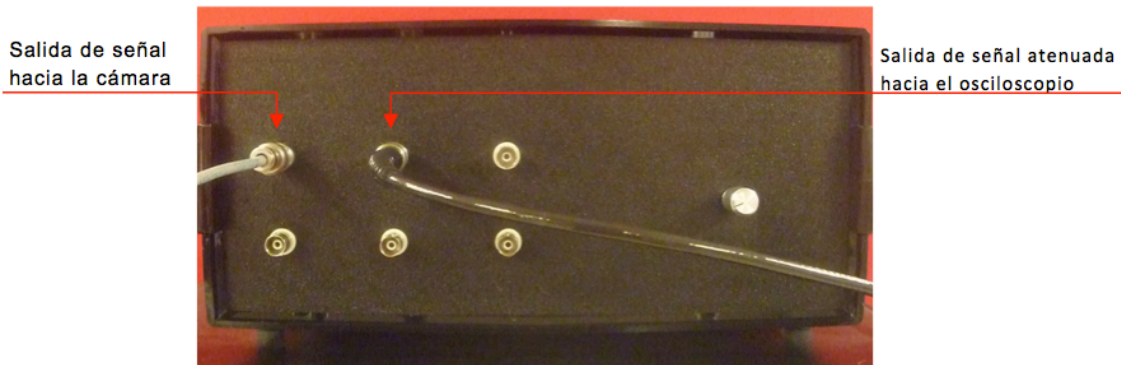


Figura 2.7 Generador de funciones.

### 2.2.3 Osciloscopio

El osciloscopio permite observar las señales en tiempo real, cuenta con una capacidad de hasta 500 MHz, con cuatro canales de visualización simultanea, tiempo de visualización desde segundos (s) hasta nano segundos (ns). Ésta recibe la señal tanto del generador de funciones (por medio de una punta atenuadora), como la señal obtenida en los cristales piezoeléctricos que estén funcionando como receptores.

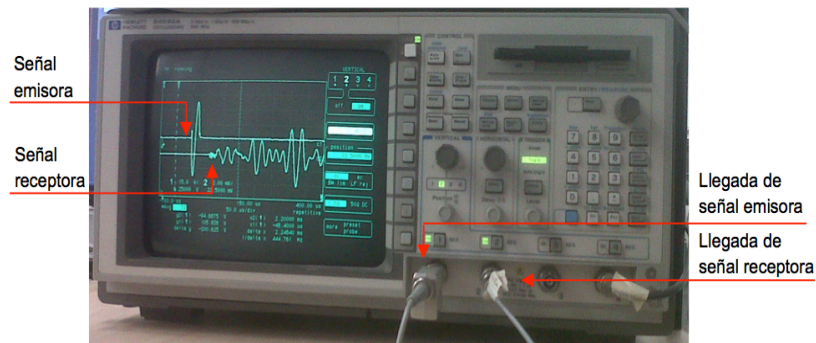


Figura 2.8 Osciloscopio.

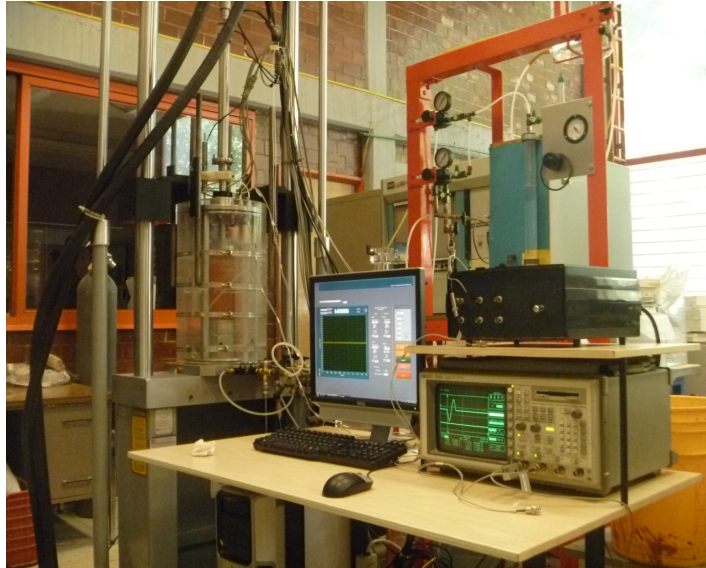


Figura 2.9 Equipo de generación y medición de ondas.

### 2.3 Instrumentación del equipo

El equipo instrumentado en la MTS es el siguiente (tabla 2.2):

Colocados dentro de la cámara.

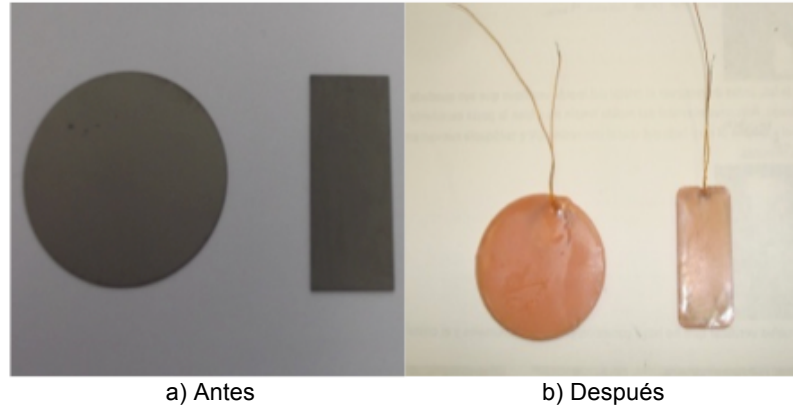
- *Cristal piezoeléctrico circular (elementos de expansión)*. Con los cuales es posible medir la velocidad de onda de compresión, éstos se encuentran ubicados en el pedestal y cabezal.
- *Cristal piezoeléctrico rectangular (elementos de flexión)*. Ubicados en el pedestal y cabezal, se pueden medir la velocidad de onda cortante.

Los elementos de expansión y de flexión, por protección eléctrica fueron recubiertos con una resina ultra-violeta UV, como se muestra en la figura 2.10.

Para la colocación de los elementos de expansión y de flexión fue necesaria la fabricación del cabezal y el pedestal especiales, como se muestra en la figura 2.11, como también fue necesario colocar conectores en la parte superior de la tapa de la cámara, los cuales se conectan con el equipo de medición de ondas, como se muestra en la figura 2.12.

Tabla 2-2 Sensores piezo-eléctricos instalados en el equipo triaxial cíclico.

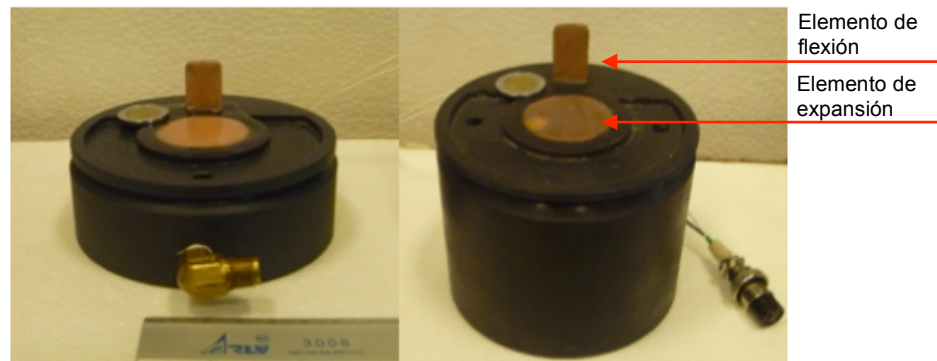
Sensor	Cantidad	Dimensiones (mm)	Modelo	Proveedor
Elemento de flexión	2	0.38 X 12.7 X 31.8	PSI-5H4E	Piezo Systems
Elemento de expansión	2	0.38 X 31.8	PSI-5A4E	Piezo Systems



a) Antes

b) Después

Figura 2.10 Elementos de expansión y de flexión antes y después del recubrimiento de resina ultra-violeta (UV).



a) Cabezal

b) Pedestal

Figura 2.11 Elementos de expansión y de flexión montados en cabezal y pedestal.

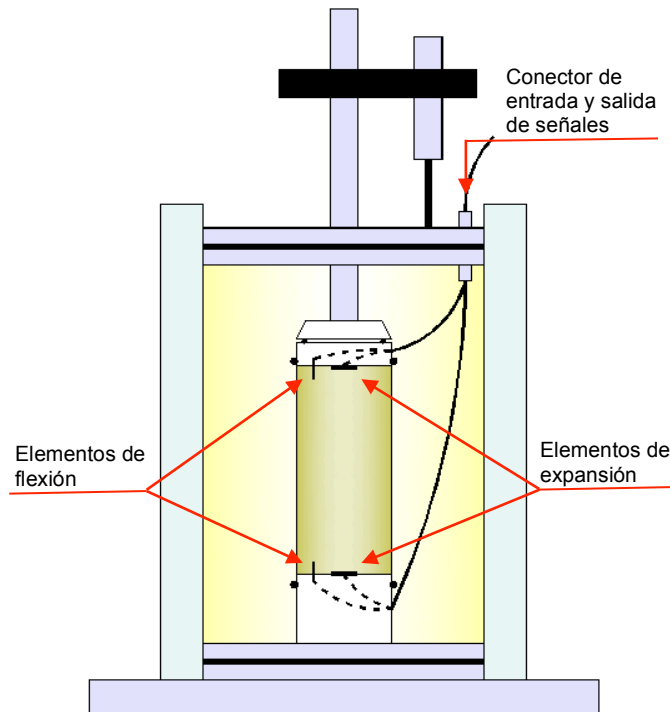


Figura 2.12 Esquema donde se muestra la posición de elementos de expansión y de flexión.

### 2.4 Calibración del equipo

Para obtener el correcto funcionamiento de los sensores utilizados en el equipo triaxial, fue necesario realizar una serie de calibraciones que enseguida se describen.

#### 2.4.1 Calibración de sensores del equipo triaxial y de medición local

El equipo cuenta con un módulo de calibración de transductores, el cual permite obtener las constantes de calibración de los sensores con los que se controla el equipo triaxial MTS en cada uno de los porcentajes de trabajo (calibrar sistema MTS) o bien los sensores instalados (calibrar transductores). En la figura 2.13 se presenta el menú principal de calibración.

Si se desea calibrar cualesquiera de los transductores es necesario que éstos se encuentren conectados y encendido el tablero de control. Se selecciona la opción de calibrar transductores y aparece la lista de sensores instalados. Se selecciona el deseado, el intervalo de voltaje en el que se quiera trabajar, las unidades en las que el sensor se calibrará y la constante del patrón que se utilizará como referencia. En la figura 2.14 se muestra la forma en que se selecciona un sensor de desplazamiento cuya calibración se realiza con un tornillo micrométrico como elemento patrón con unidades de salida en milímetros, por tal razón la constante patrón de calibración se toma como uno.

En la pantalla de calibración (figura 2.15) se teclea en el ícono de indicador el valor leído en el equipo patrón (en este caso el tornillo micrométrico), se presiona el botón de tomar lectura y aparece el valor real medido en el sensor. Al ir tomando valores en el equipo patrón y registrándolos en el indicador se va formando la curva de calibración: en la ordenada están las unidades que el sensor registra y en las abscisas la variación de voltaje. De los puntos registrados se calculan la pendiente y la ordenada, que se toman como las constantes de calibración del sensor.

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

En caso de que se deseen cambiar las constantes de calibración de un sensor, se ingresa a cambiar constantes de calibración de transductores (figura 2.16), se selecciona el sensor y directamente se teclean las nuevas pendiente y ordenada.

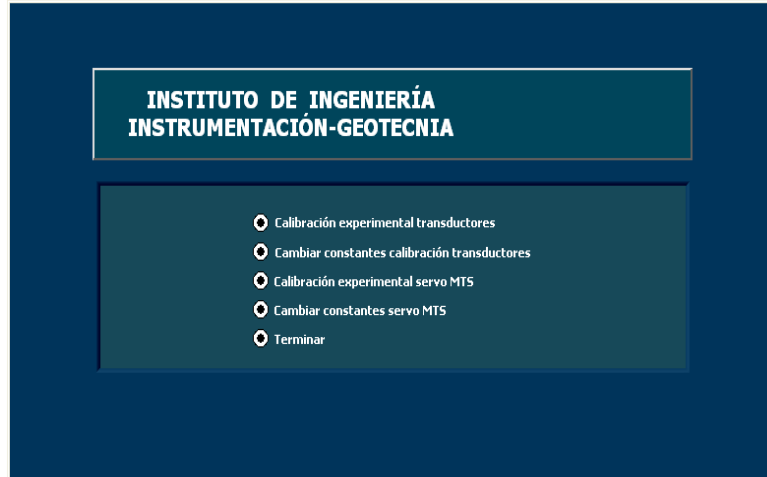


Figura 2.13 Menú de calibración de transductores.

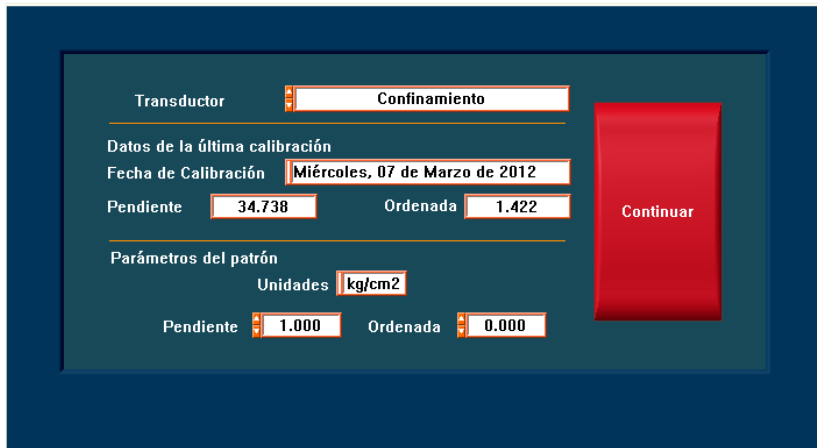


Figura 2.14 Selección del sensor a calibrar.



Figura 2.15 Calibración de un sensor de desplazamiento.



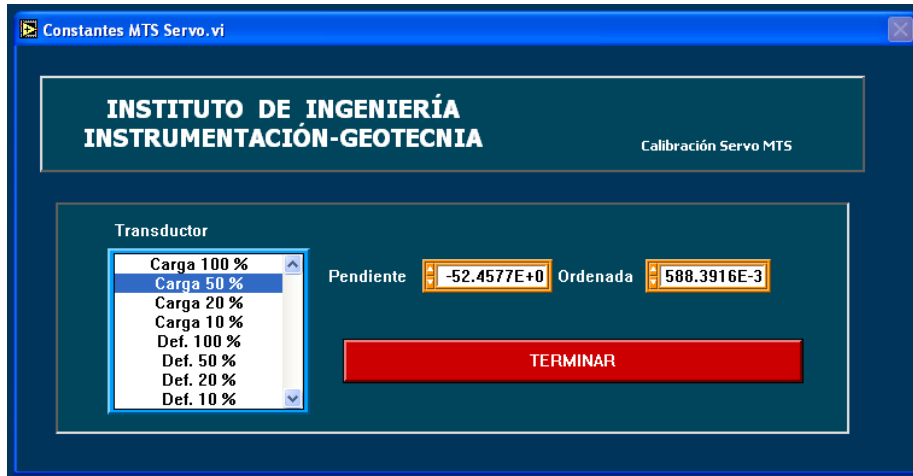


Figura 2.16 Cambiar constantes de calibración de un sensor.

Enseguida se presenta el procedimiento de calibración de los transductores, y los resultados obtenidos utilizando el sistema de calibración del equipo.

Los sensores de desplazamiento utilizados en el equipo triaxial MTS son de alta sensibilidad, lo cual provee una relación lineal entre el desplazamiento y el voltaje. La calibración del transductor de desplazamiento se efectuó comparando el voltaje de salida del sensor contra el desplazamiento lineal aplicado, utilizando como elemento patrón un tornillo micrométrico, registrando la lectura de voltaje del transductor, correspondiente a una posición inicial establecida y determinada con el micrómetro. Luego se efectuaron incrementos sucesivos de desplazamiento en el transductor, en intervalos de aproximadamente 1 mm, mientras se realiza las lecturas correspondientes en el transductor (voltaje) y en el micrómetro (desplazamiento). El rango de desplazamiento oscila de los sensores es de  $\pm 0.30''$ . Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2.17 y 2.18.

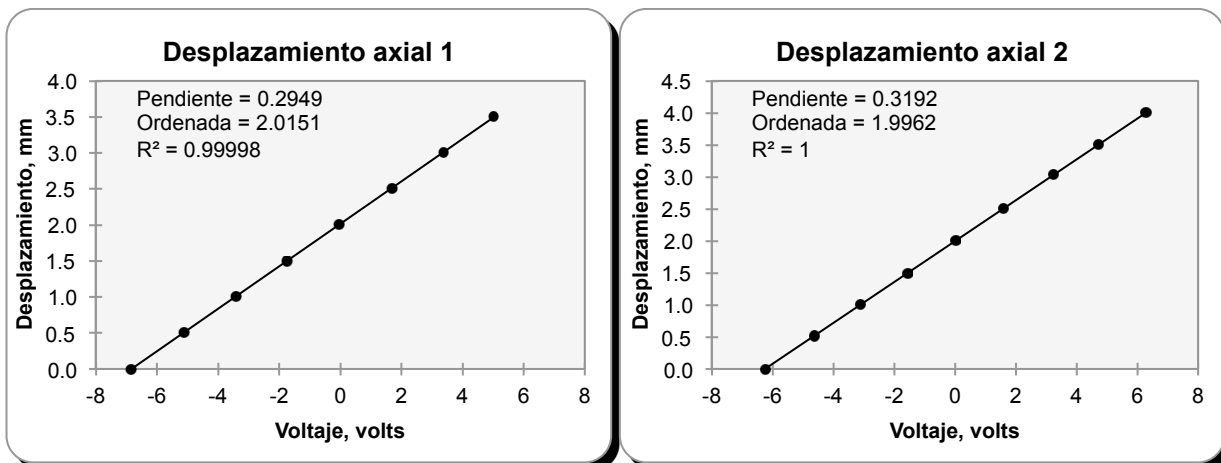


Figura 2.17 Calibración de sensores axial 1 y 2.

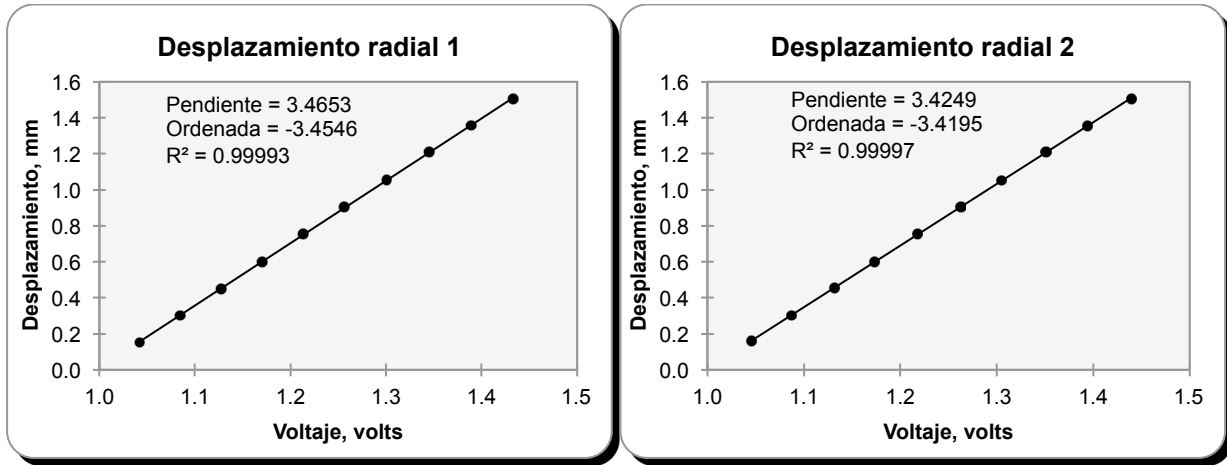


Figura 2.18 Calibración de sensores radial 1 y 2.

Por otro lado, se realizó la verificación de la calibración del LVDT axial externo, cuyos resultados se presentan en la figura 2.19. Con los datos obtenidos de ambos procesos de calibración, se tiene que los valores que se obtengan al realizarse ensayos en el equipo, serán factibles para su análisis.

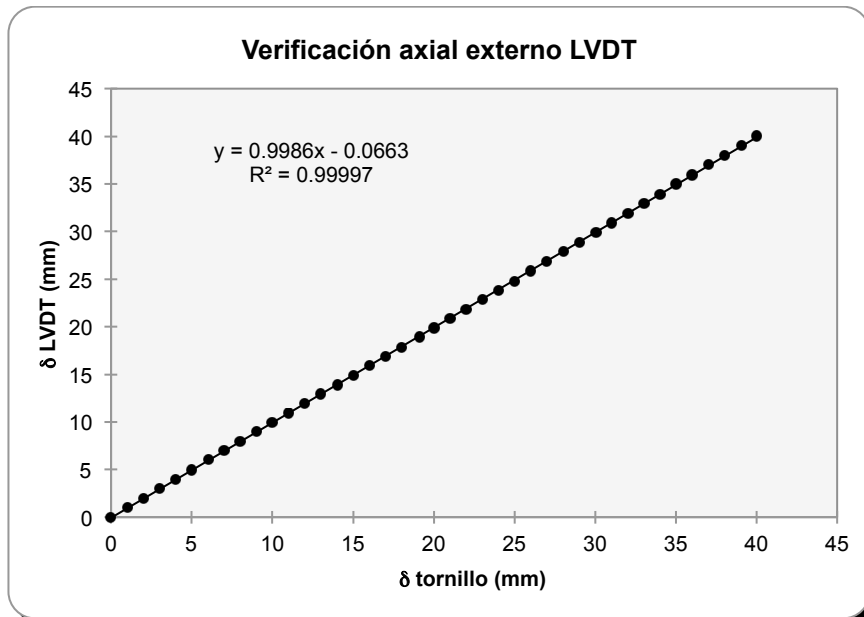


Figura 2.19 Verificación de sensor axial externo LVDT versus desplazamiento con tornillo milimétrico.

La calibración de los transductores de presión se realizó estableciendo valores conocidos de presión. Se inició el procedimiento de calibración conectando las entradas de los reguladores, tanto de presión axial, contrapresión y presión de poro, con una línea de medición que llega directamente a una columna de mercurio, que se toma como elemento patrón durante la calibración. Se presurizaron el sensor y la columna, y se registró la altura del mercurio (que se convierte a valores de presión) y el voltaje de

salida. Con cada incremento de presión se trazaron los puntos experimentales, y se obtuvo la pendiente y ordenada de éstos, que corresponden a las constantes del sensor.

Los datos de la presión y se registraron en el programa de calibración, el cual realiza la regresión lineal de los valores automáticamente, generando un archivo de calibración para cada transductor. Durante el proceso de calibración de los transductores, se introdujo en el programa un valor que corresponde a la relación entre las unidades que se van a medir, con respecto a las unidades en las que se desea la calibración. En este caso, la relación entre centímetros de columna de mercurio y la presión en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  es de 0.01356. Los resultados obtenidos a partir de la calibración de los tres transductores de presión se muestran en las figuras 2.20 a 2.21.

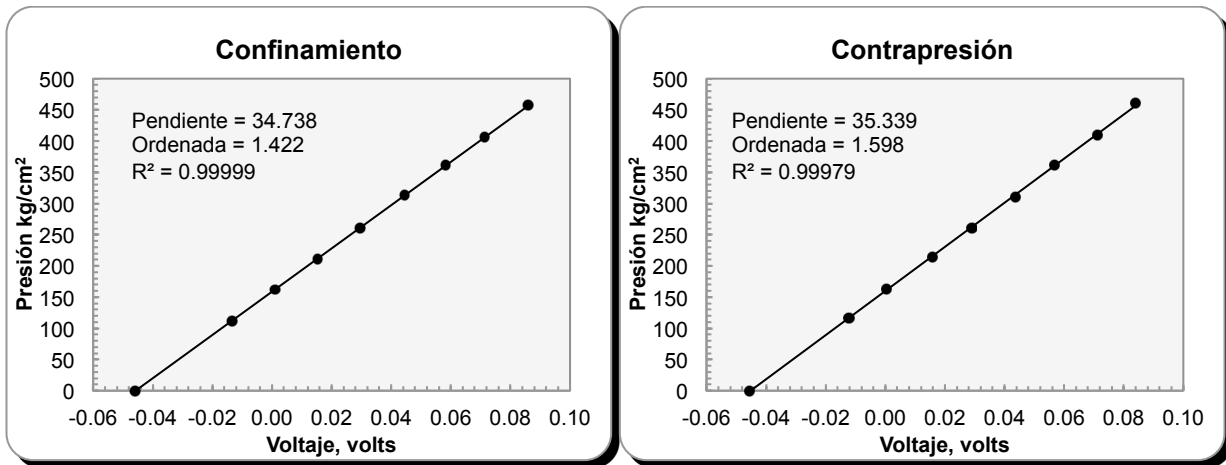


Figura 2.20 Calibración de sensores de confinamiento y contrapresión.

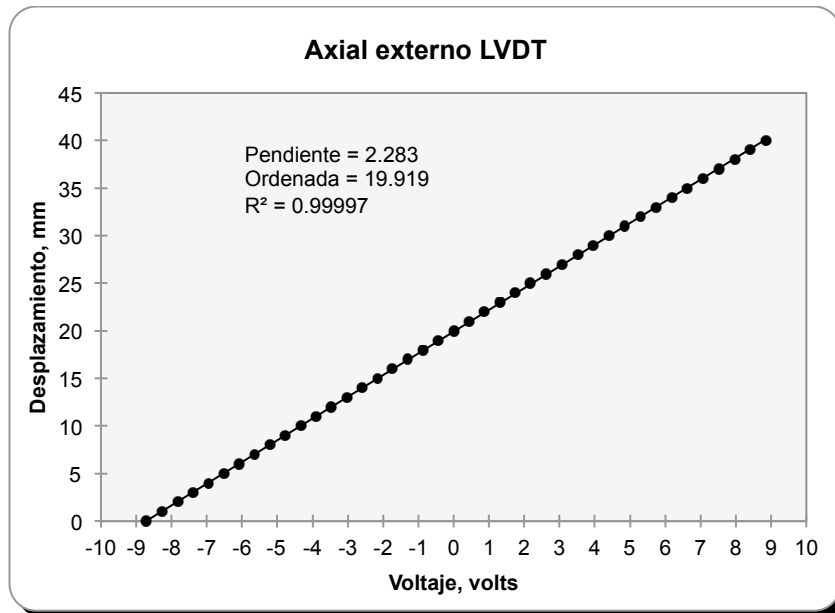


Figura 2.21 Calibración de sensores axial externo MTS.

En cada una de las gráficas mostradas, se presenta la ecuación que mejor se ajusta a los puntos definidos en las calibraciones. El que se haya obtenido un coeficiente de correlación aproximado a uno en cada sensor indica que éstos tienen un comportamiento lineal y su desempeño es confiable.

Para confirmar la calibración de los sensores de presión, se realizó una verificación de los mismos. Este proceso consistió en interconectar todos los sensores de presión a la columna de mercurio y enseguida ejercer cierta presión efectiva para leer todos los transductores al mismo tiempo. Con lo cual se obtuvieron lecturas muy similares entre ellos, como puede observarse en las figuras 2.22 y 2.23.

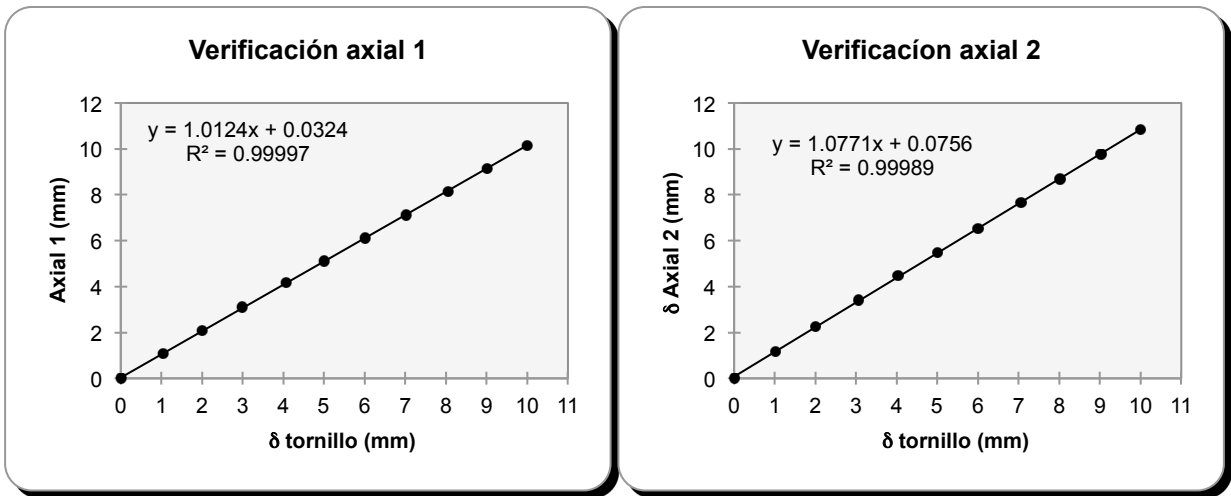


Figura 2.22 Verificación de sensores axial 1 y 2 versus desplazamiento con tornillo milimétrico.

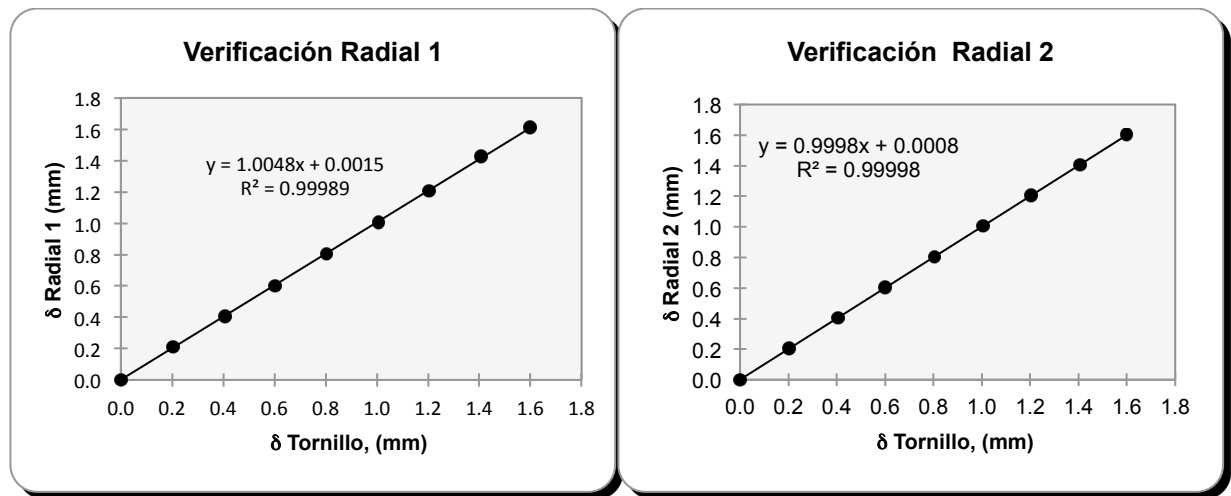


Figura 2.23 Verificación de sensores radial 1 y 2 versus desplazamiento con tornillo milimétrico.

### 2.4.2 Calibración de equipo de generación y medición de ondas

Para los cristales piezoeléctricos (elementos de expansión y de flexión), el procedimiento que se describe a continuación se le denomina calibración, pero en

realidad es el promedio de los tiempos de arribo de las señales de ondas a diferentes amplitudes.

En el cálculo de tiempo de retardo en los elementos de flexión consiste en poner en contacto el elementos de flexión del pedestal con el elementos de flexión del cabezal y aplicar un barrido de señales con una amplitudes de 200 volts, para una frecuencias definida. Con estas señales obtenidas se calculará el tiempo de retardo, el cual consiste en restar el tiempo de la señal emisora al tiempo de la señal receptora y calculando el tiempo de retardo, tal como se muestra en las figuras 2.24 y 2.25.

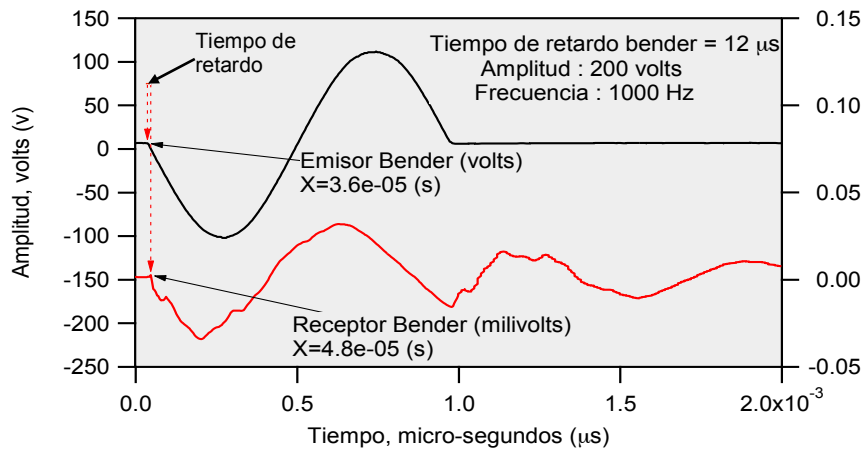


Figura 2.24 Obtención de tiempo de retardo de la señal Vs.

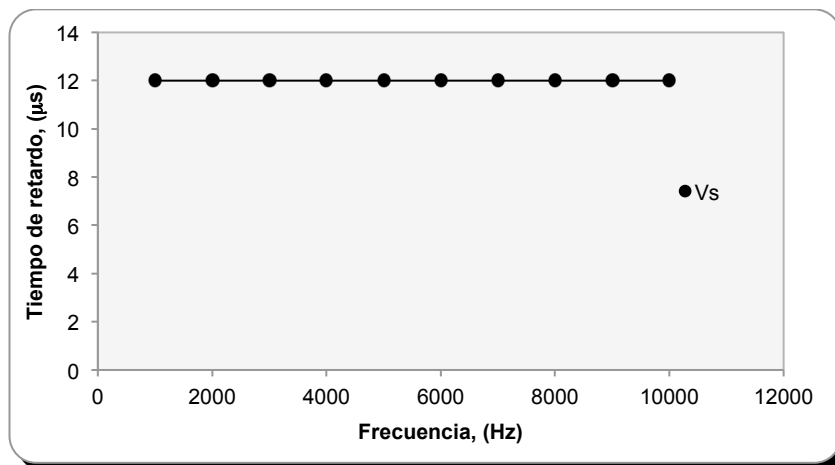


Figura 2.25 Verificación del tiempo de retardo a distintas amplitudes de las señales Vs.

Para el cálculo del tiempo de retardo de los elementos de expansión se procede de la misma manera que en los elementos de flexión, sólo colocando en contacto a los elementos de expansión, los resultados obtenidos se muestra en las figuras 2.26 y 2.27.

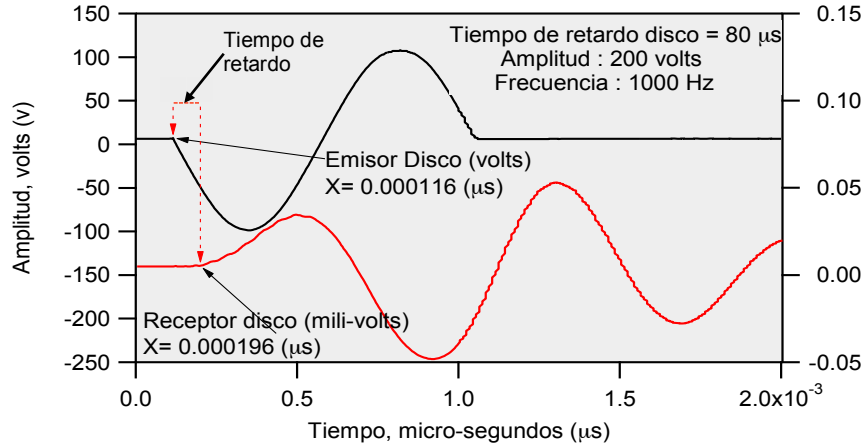


Figura 2.26 Obtención de tiempo de retardo de la señal V<sub>p</sub>.

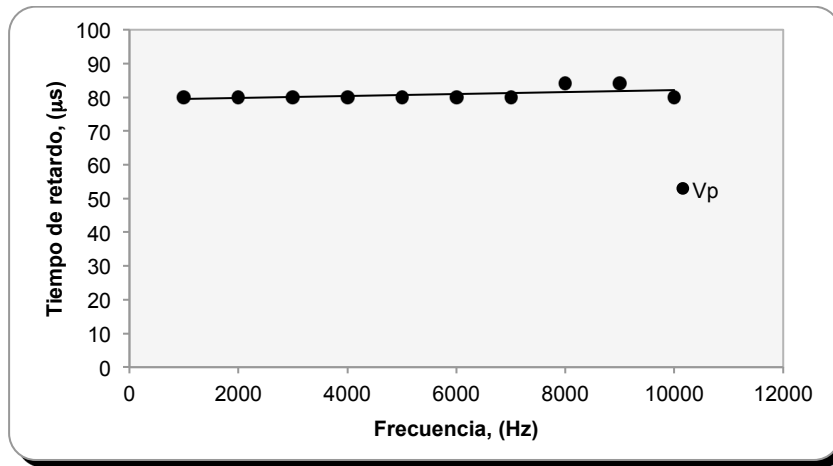


Figura 2.27 Verificación del tiempo de retardo a distintas amplitudes de las señales V<sub>p</sub>.

Estos tiempos de retardo se resta a los tiempos de arribo de cada señal, con el objetivo de retirar el tiempo generado por el propio sistema, de tal manera obtener el tiempo real que tarda el impulso en recorrer la probeta, por consiguiente podremos calcular las velocidades de onda P y S, con una mayor precisión.

## 2.5 Configuración de sistemas

Para el desarrollo de la prueba se utilizaron dos equipos, uno de ellos como ya se ha comentado es el equipo triaxial MTS, con el cual se medirán las deformaciones locales en el tercio central de la probeta en el momento que se le aplica una carga cíclica, y el otro equipo es el que llamaremos de generación y medición de ondas, con éste obtendremos y analizaremos los tiempos de arribo de las señales, tanto de corte V<sub>s</sub> como de compresión V<sub>p</sub>. Dicha configuración del sistema se describe a continuación.

### 2.5.1 Ensayo con el sistema de mediciones locales

El programa que controla al equipo triaxial cíclico se encuentra en lenguaje de programación Labview 7.1 como se muestra en la figura 2.28. Permite trabajar tanto en carga como en desplazamiento controlado, se puede seleccionar entre el 100, 50, 20 y 10 por ciento de rango de trabajo de los sensores instalados en el equipo (figura 2.29).



Figura 2.28 Programa controlador de equipo triaxial cíclico MTS.

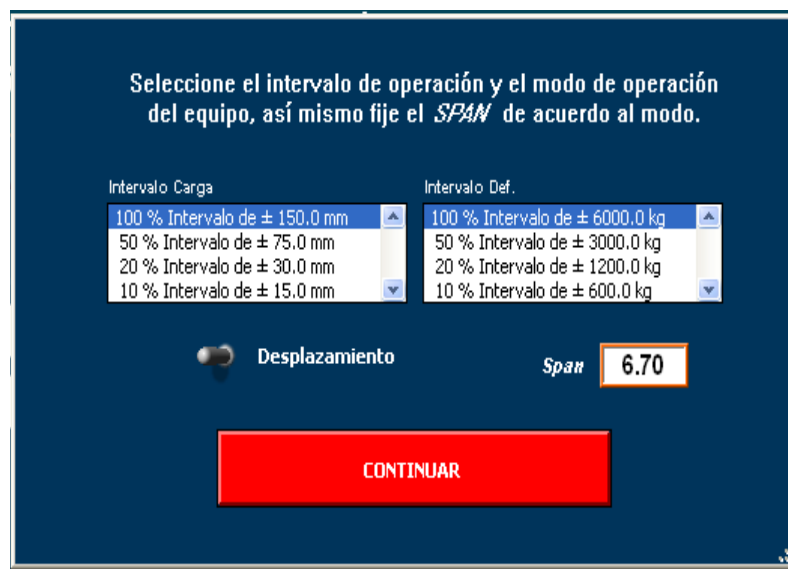


Figura 2.29 Seleccionador de intervalo y de operación del equipo.

Luego de seleccionar la forma de operación del equipo aparece un recuadro que nos permite definir el tipo de prueba que deseamos realizar, entre las cuales podemos escoger de compresión simple (UC), no consolidadas no drenadas (UU), consolidadas no drenadas (CU) y consolidadas drenadas (CD) (figura 2.30).

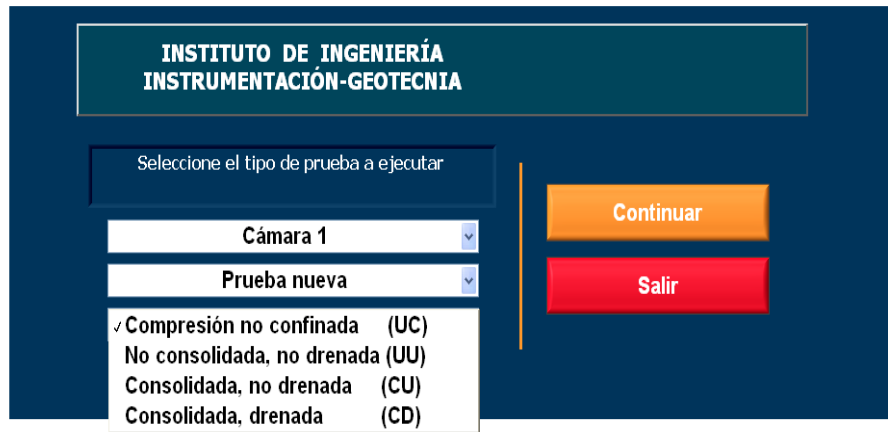


Figura 2.30 Seleccionador de tipo de prueba.

Una vez seleccionado el tipo de ensaye, aparece un recuadro en el cual vaciamos la información de la probeta que se pretende probar. Esta pantalla cuenta con cinco pestañas, tres de ellas sirven para la información general de la probeta (datos generales, dimensiones, características del suelo, etc.), que se usan para dar nombres a los archivos y carpetas en los cuales, quedarán guardados los archivos, con los valores obtenidos durante los ensayes realizados (figura 2.31.).



Figura 2.31 Información general de la prueba.

En las pantallas siguientes, dependiendo del tipo de prueba seleccionada previamente, serán las opciones que se habiliten (figura 2.32), para acceder a transductores en las que se puede observar la posición de los sensores (confinamiento, contrapresión desplazamiento axial y radial, etc.) antes y después de cada ensaye cíclico, como se muestra en la figura 2.33. De igual manera, se puede acceder a la etapa de ensaye del espécimen.





Figura 2.32 Selector de visualizadores.



Figura 2.33 Visualizador de sensores.

Cuando se accesa a la etapa de ensaye, aparece un recuadro (figura 2.34) donde se selecciona el tipo de patrón de excitación (dinámica senoidal o estático), en el cual se podrán teclear los valores de excitación (amplitud, frecuencia y número de ciclos) como se muestra en la figura 3.35. Se oprime continuar para que nos lleve a una pantalla en la cual se muestran los resultados en tiempo real la aplicación de la excitación (figura 3.36.)

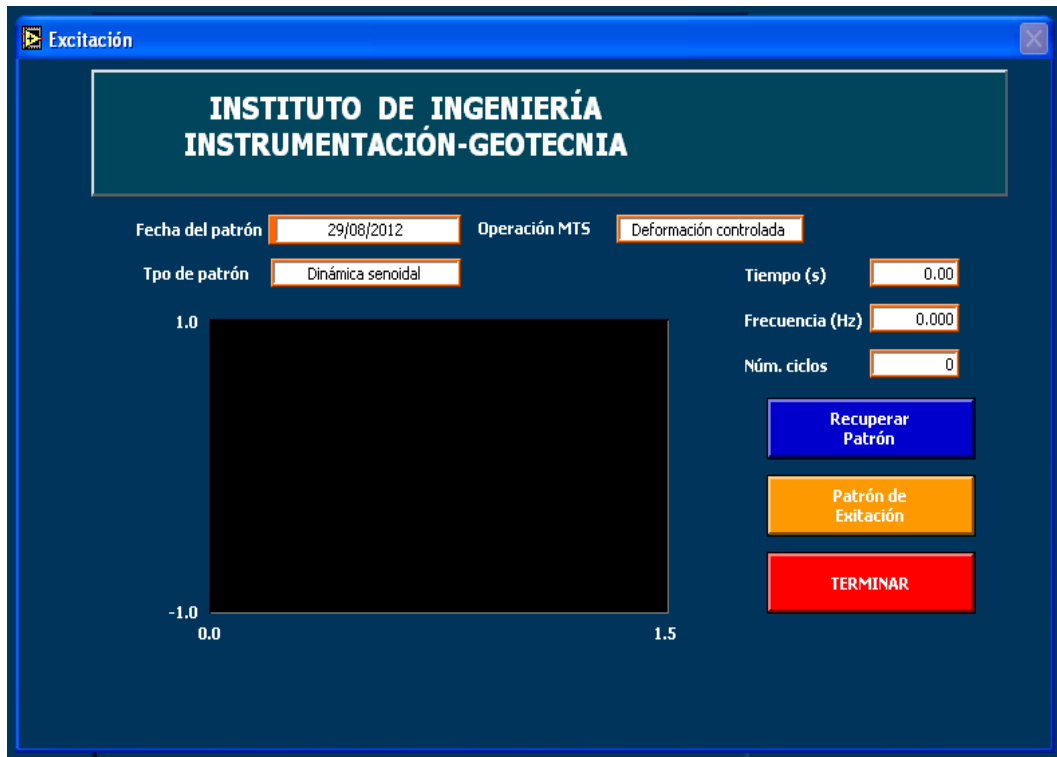


Figura 2.34 Selector de patrón de excitación.



Figura 2.35 Generador de los rangos de excitación.



Figura 2.36 Visualizador de los resultados en la etapa de ensaye.

### 2.5.2 Ensayo con el sistema de generación y medición de ondas

El programa que controla el sistema de generación y medición de ondas se encuentra en un lenguaje Labview 8.5 como se muestra en la figura 2.37, en la cual se selecciona C:\Bender\BE.Ilb\Principal.vi el programa a utilizar.

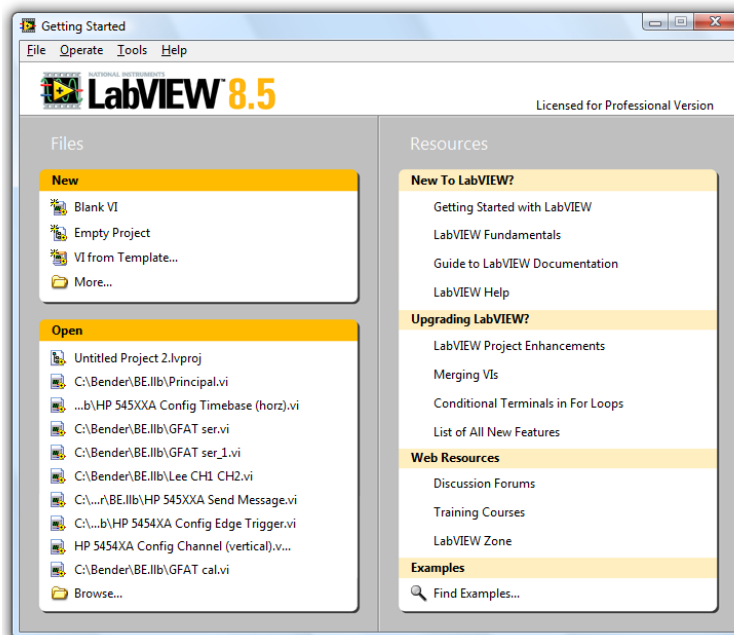


Figura 2.37 Visualizador de los resultados en la etapa de ensaye.

En la pantalla mostrada en la figura 2.38, permite diseñar las señales emisoras, con las condiciones requeridas. Dichas variaciones pueden ser desde el número de señales senoidales, hasta la amplitud y frecuencia de dicha señal. Se puede, además, observar las señales obtenidas antes de guardarlas en la base de datos para su posterior análisis.

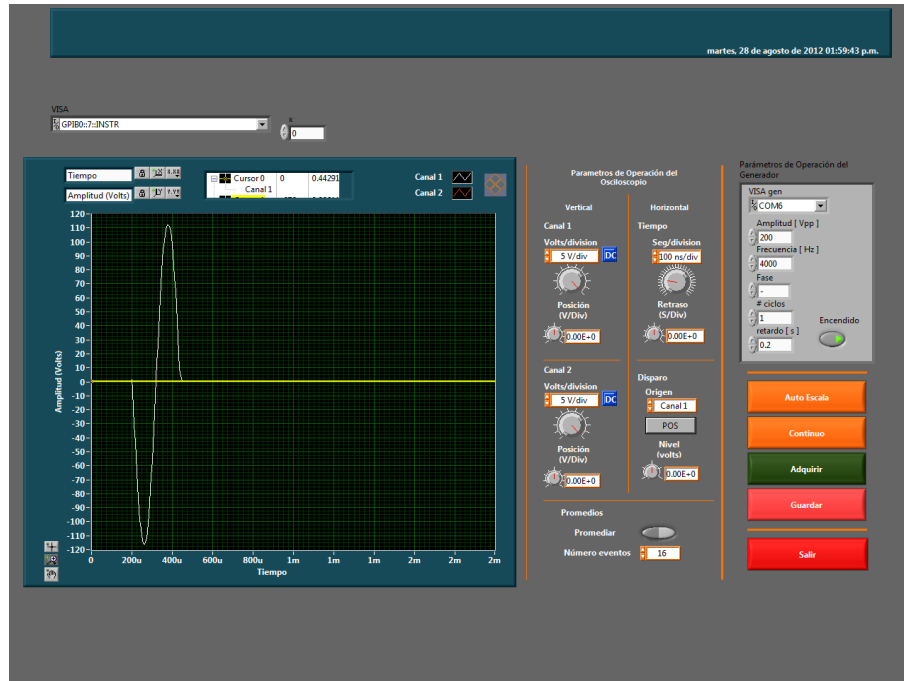


Figura 2.38 Visualizador de los resultados en la etapa de ensayo.

---

# CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

---

### 3.1 Descripción del material

Se trabajó con un material granular de sílice, con clasificación según el SUCS: *SP - Arena mal graduada*, (tabla 3.1 y figura 3.1). La densidad relativa de sólidos que se determinó fue de 2.63.

Tabla 3-1 Granulometrías del material.

Nombre del material	Malla		Arena de sílice			
	Nº	mm	W retenido g	W que pasa g	Porcentaje parcial retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
Arena	No. 10	2.000	0.00	585.90	0.00	100.00
	No. 20	0.840	0.00	585.90	0.00	100.00
	No. 40	0.420	0.00	585.90	0.00	100.00
	No. 60	0.250	403.90	182.00	68.94	31.06
	No. 80	0.177	56.40	125.60	9.63	21.44
	No. 100	0.149	68.80	56.80	11.74	9.69
Pasa 200		0.074	47.40	9.40	8.09	1.60

Suma= **585.90** g

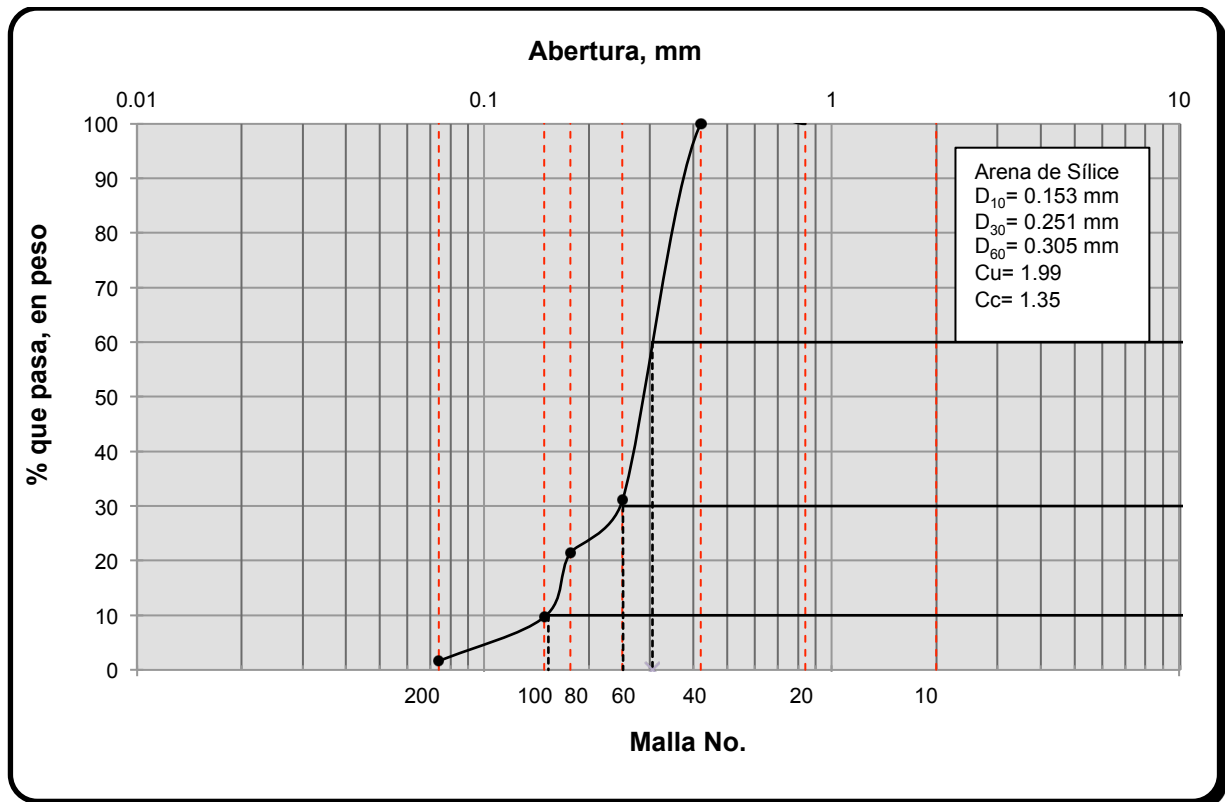


Figura 3.1 Granulometría del material.

### 3.2 Preparación y montaje de la probeta

En seguida se describe el proceso de preparación y montaje de las probetas, el cual se divide de la siguiente manera:

- Preparación del material.

Para la preparación del material es necesario definir el porcentaje de agua que se requiere en la muestra a ensayar; por consiguiente, se colocan 4 kg del material seco en un recipiente, posteriormente, con un atomizador se va integrando el agua hasta aplicar la cantidad requerida y se mezcla el material hasta lograr una buena homogenización (fig. 3.2).



Figura 3.2 Proceso de preparación del material seco a parcialmente saturado, a) material seco, b) aplicación de agua controlada por peso, c) homogenización del material.

- Preparación de molde y generación de probeta.

En la formación de la probeta se utilizará un método de compactación estático, que utilizando un pisón de diámetro ligeramente mayor al radio del molde, para el llenado del molde se utilizan 10 recipientes, los cuales contienen una porción determinada del

suelo homogenizado, la cual servirá para cada una de las diez capas que conforman la probeta, estos recipientes deberán ser cubiertos con un trapo parcialmente mojado para evitar la pérdida de agua en el material.

En una base de madera se atornilla el pedestal, a la cual se le coloca la membrana de látex que se ajusta con un aro-sello, a continuación se fija el molde partido con tres abrazaderas, recubriendo la parte superior del pedestal y la membrana, dicho molde cuenta con cuatro conectores por los cuales se genera vacío dentro del molde, adhiriendo la membrana a éste. Se coloca papel filtro sobre el pedestal y se vierte el material correspondiente a la primera de las diez capas, distribuyéndolo de manera uniforme en la sección del molde. La cual se apisona 9 veces, evitando así maltratar el elemento de flexión ubicado en el pedestal, apisonando con mucho cuidado el área cercana al elemento de flexión. De las capas 2 a la 10 se apisona 12 veces, en el orden que aparece en la figura 3.3d. Ya que se compactó el suelo de la capa, se procede de la misma forma con las subsecuentes y al llegar a la novena se coloca una extensión para facilitar el acomodo de las dos ultimas.

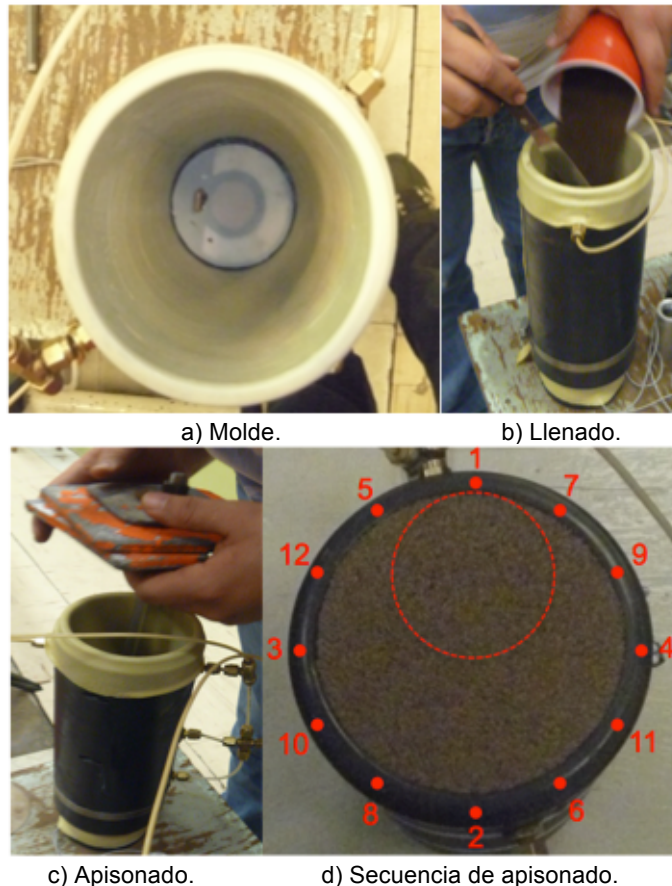


Figura 3.3 Montaje de molde y llenado del mismo.



Una vez enrasada la capa superior de la probeta se realiza el ranurado (Figura 3.4a) para colocar el elemento de flexión ubicado en el cabezal y evitar una fisura en la parte superior. Y puesto el cabezal se sube la membrana y se coloca el aro-sello para ajustar la membrana a éste, evitando así la entrada o salida de presiones, cualquiera sea el caso, como se muestra en la figura 3.4b.



a) Ranurado para elemento de flexión

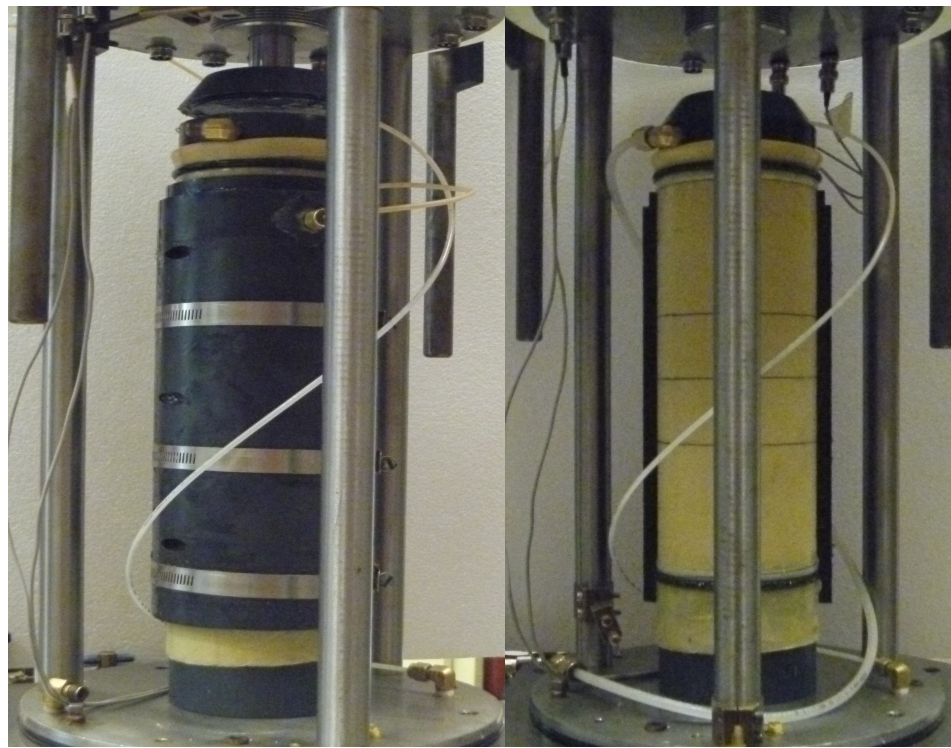


b) Colocación y aseguramiento cabezal  
Figura 3.4 Colocación de cabezal.

- Montaje de la probeta e instalación de los sensores de medición local y de generación de ondas.

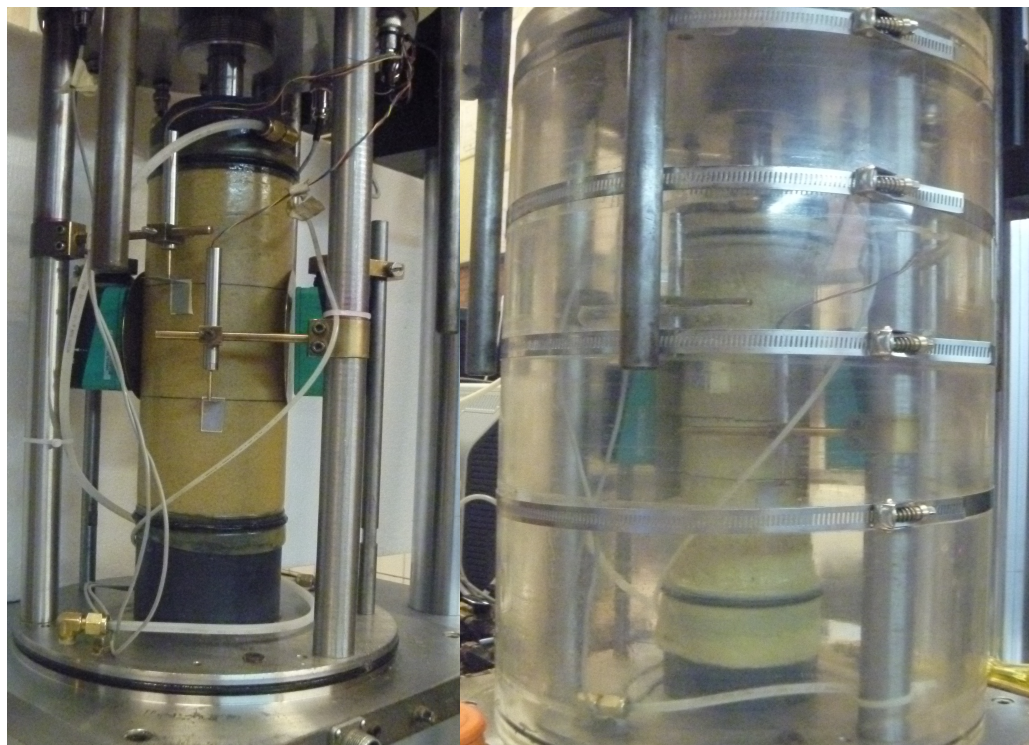
Después de formada la probeta, con cuidado de no golpearla se coloca sobre el equipo triaxial (figura 3.5a), se ajusta la base con un tornillo, una vez sujeta se hace el contacto del pistón con el cabezal, luego se aplica vacío interno en la probeta y se procede a desmoldar (figura 3.5b). Se mide el perímetro de la muestra en la parte superior, media e inferior. Por último, se colocan los sensores axiales y radiales en el tercio central

(figura 3.5c), se ajustan éstos a la posición de donde se pretende iniciar la prueba, se baja la camisa y se inicia el ensaye (figura 3.5d).



a) Montaje.

b) Desmolde.



c) Colocación de sensores

d) Sellado de cámara.

Figura 3.5 Montaje de la probeta.

### 3.2.1 Resultados de compactación

Para definir las relaciones de vacíos que se utilizarán en los ensayos dinámicos, se obtuvieron las curvas de compactación del material estudiado (figura 3.6), tal como se describe en el capítulo anterior. Como también se presenta en la figura 3.7 la concentración de sólidos.

Para este material se obtuvieron las curvas para la energías de compactación obtenidas con los pesos de pisón de 0.50, 2.0, 4.0, y 6.0 kg y seis contenidos de agua, que van de 0 a 23%. De las curvas de compactación se obtuvieron las relaciones de vacíos máxima y mínima. En esta investigación se consideró que la máxima corresponde al valor obtenido con un peso de pisón de 0.50 kg y un contenido de agua de 0.1%, y la mínima a la que se obtiene con un peso de pisón de 6 kg con un contenido de agua de 12%. Los valores de relación de vacíos máxima y mínima determinadas con este método son 1.59 y 0.75, respectivamente.

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

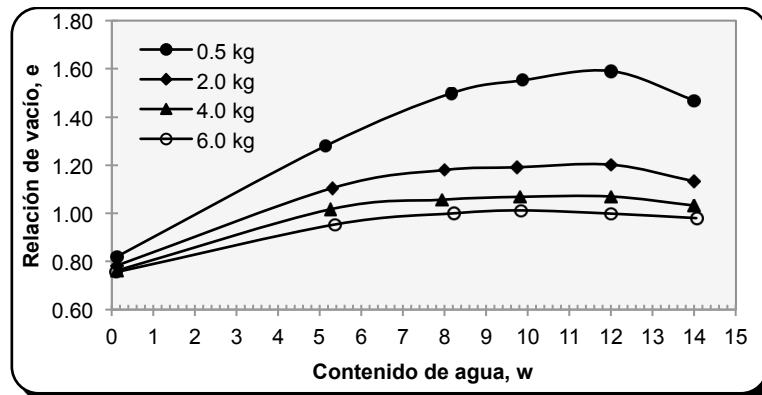


Figura 3.6 Curvas de compactación del material.

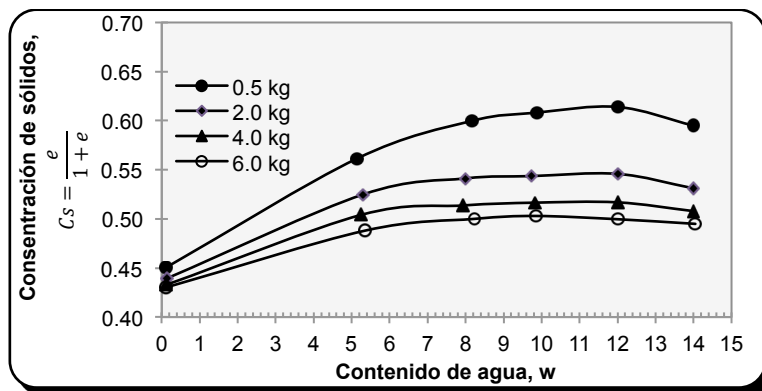


Figura 3.7 Curvas de concentración de sólidos del material.

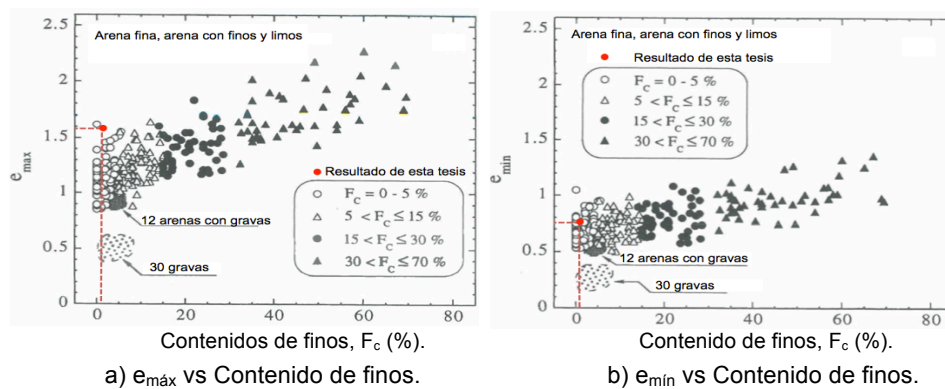
### 3.2.2 Relaciones de vacíos máxima y mínima de otras arenas

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

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

En las figuras 3.8a y b se presentan resultados obtenidos por estos autores que muestran la variación de las relaciones de vacíos máxima y mínima con el porcentaje de finos. Al colocar en estos mismos gráficos los resultados experimentales obtenidos con el método de compactación utilizado en esta tesis se puede apreciar que para ambos materiales, tanto  $e_{m\acute{a}x}$  y  $e_{m\acute{i}n}$  caen dentro del intervalo de valores que arrojan los resultados reportados por los autores del artículo citado.

Al graficar ahora  $e_{m\acute{a}x}$  y el intervalo de relaciones de vacíos ( $e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}$ ) con respecto al diámetro de partícula correspondiente al 50% que pasa ( $D_{50}$ ), los cuales se muestran en las figuras 3.8c y d, se puede ver que al igual que con el porcentaje de finos, los resultados reportados en la tesis caen dentro de los intervalos reportados por Cubrinovski e Ishihara, lo cual garantiza la aplicación del método de compactación para la formación de probetas de arenas y la obtención de la compacidad relativa a partir de estos valores de relación de vacíos máxima y mínima.



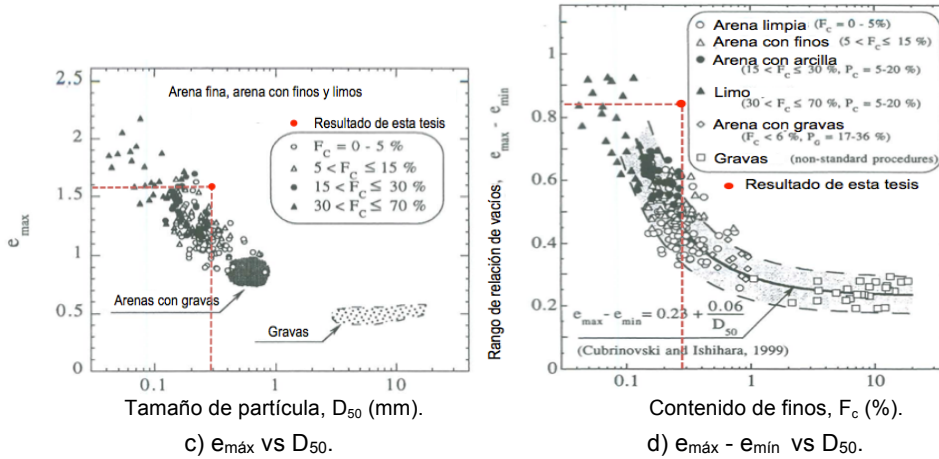


Figura 3.8 Variación de  $e_{max}$  y  $e_{min}$  con el contenido de finos y  $D_{50}$  (Cubrinovsky e Ishihara, 2002).

### 3.3 Procedimientos de ensaye e interpretación

Para colocar los instrumentos de desplazamiento axial y radial se divide la altura de la muestra en tres franjas de 8.33 cm cada una, para dar una altura total de 25 cm, de tal forma que se colocan sensores de desplazamiento axial en el cabezal (CS), tercio superior (TMS), y tercio inferior (TMI) y de desplazamiento radial en el tercio central (TMC). Al aplicar una señal periódica senoidal de excitación en el CS se registran las señales de desplazamiento axial en los TMS y TMI, y radial en el TMC.

En la figura 3.10a se presentan resultados experimentales de los desplazamientos axiales en el CS, TMS y TMI. Como se puede observar, el valor de los desplazamientos disminuye conforme el punto de registro se desplaza del cabezal al pedestal. La señal del TMC resulta de la resta de las señales de los sensores del TMS y TMI, y representa el desplazamiento axial en la franja del tercio medio.

En la figura 3.10b se muestran las señales de desplazamiento radial. Al igual que los desplazamientos axiales, éstos también tienen una variación periódica senoidal, la cual en esta investigación resultó ser del orden de entre 10 y 30 veces menor que la de excitación en el CS.

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

### 3.4 Cálculo de parámetros

#### 3.4.1 Relación de Poisson con el método de transmisión de ondas

Para el análisis del tiempo de recorrido de las señales se utilizó el método del primer arribo como se muestra en las figuras 3.9a y b en señales compresibles P y cortantes S, respectivamente. Para el caso de las señales compresibles no se encontró ningún problema para obtener el punto del primer arribo, lo cual facilita el proceso de análisis, a diferencia de las señales de corte, para las cuales se tomó como referencia Brignoli *et al.*, 1996, en el cual define distintos tipos de arribo de señales, para ello tomamos la señal 5, de la figura 1.10 presentada en el capítulo 1.

En este método, como ya se ha comentado anteriormente, se busca obtener las velocidades de onda ( $V_p$  y  $V_s$ ) que recorren la probeta, en la cual se emite la excitación en la parte del pedestal con una señal de amplitud de 200 volts y frecuencia de 5 kHz, a diferentes presiones de confinamiento, que van desde 0 hasta 2.5 kg/cm<sup>2</sup> en incrementos de 0.5 kg/cm<sup>2</sup>. Las señales obtenidas se analizan buscando el punto de arribo, tanto en las señales emisoras como en las receptoras calculando el tiempo de recorrido tanto en  $V_p$  como en  $V_s$  (figura 3.9a y b, respectivamente). Esto se repite en cada uno de los incrementos de esfuerzo hasta obtener los 2.5 kg/cm<sup>2</sup> que se buscan.

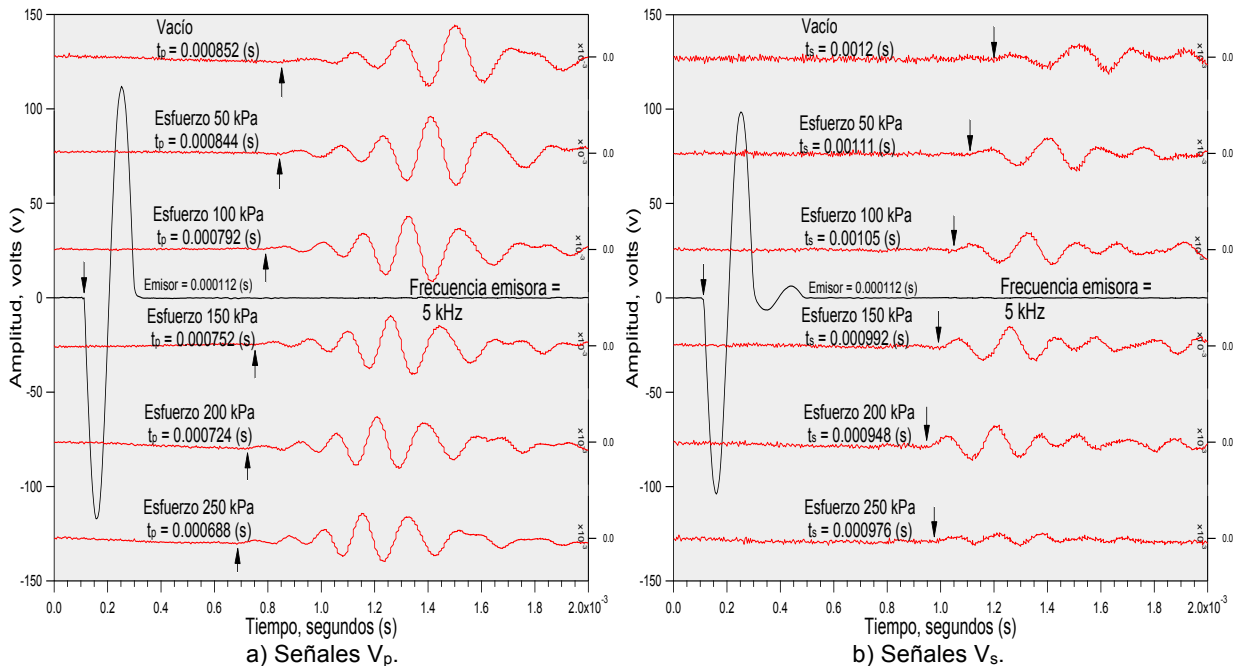


Figura 3.9 Análisis de arribo de señales  $V_p$  y  $V_s$ .

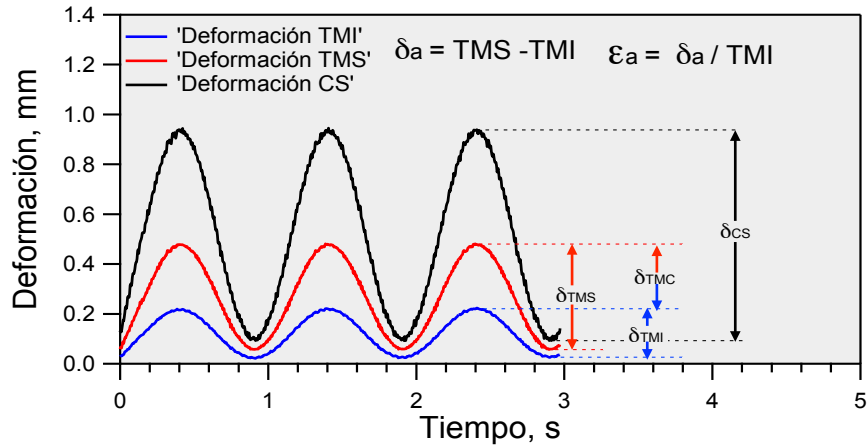
Con los valores del tiempo de arribo y la longitud de recorrido del espécimen podemos obtener la velocidad de la onda P y S, con las ecuaciones 1 y 2 expuestas en el

capítulo 1. Una vez calculada la velocidad de onda, utilizando la fórmula 5 presentada en el capítulo 1, podemos obtener la relación de Poisson.

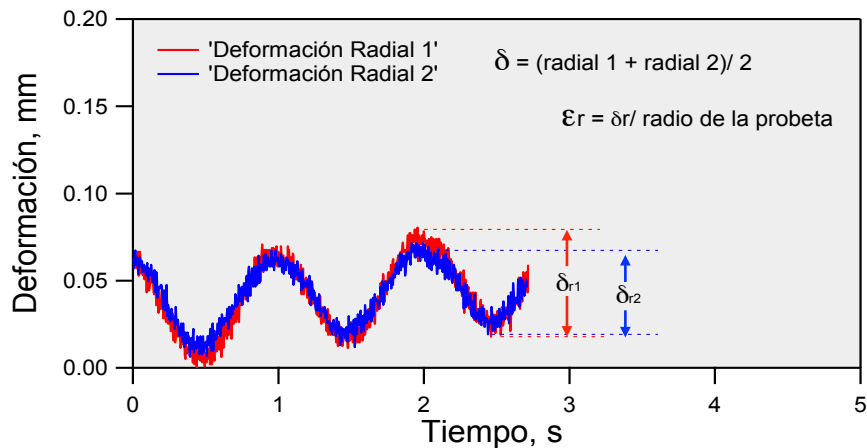
### 3.4.2 Relación de Poisson con el método de medición local

Para el cálculo de la relación de Poisson se toma el desplazamiento axial correspondiente al tercio central (TMC), como la diferencia punto a punto de las señales del TMS y TMI. El desplazamiento radial se obtiene del promedio de los desplazamientos radial  $\delta_{r1}$  y  $\delta_{r2}$ , como se ilustra en la figura 3.10a y b.

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



a) Desplazamientos axiales en CS, TMS y TMI.



b) Desplazamientos radiales en el TMC de la muestra.

Figura 3.10 Resultados experimentales de desplazamientos axiales y radiales.

Para obtener la relación de Poisson es necesario graficar la deformación unitaria axial,  $\varepsilon_a$ , y la deformación unitaria radial,  $\varepsilon_r$ , siendo la línea de tendencia el valor de la relación de Poisson, tal como se muestra en la figura 3.11.

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$$

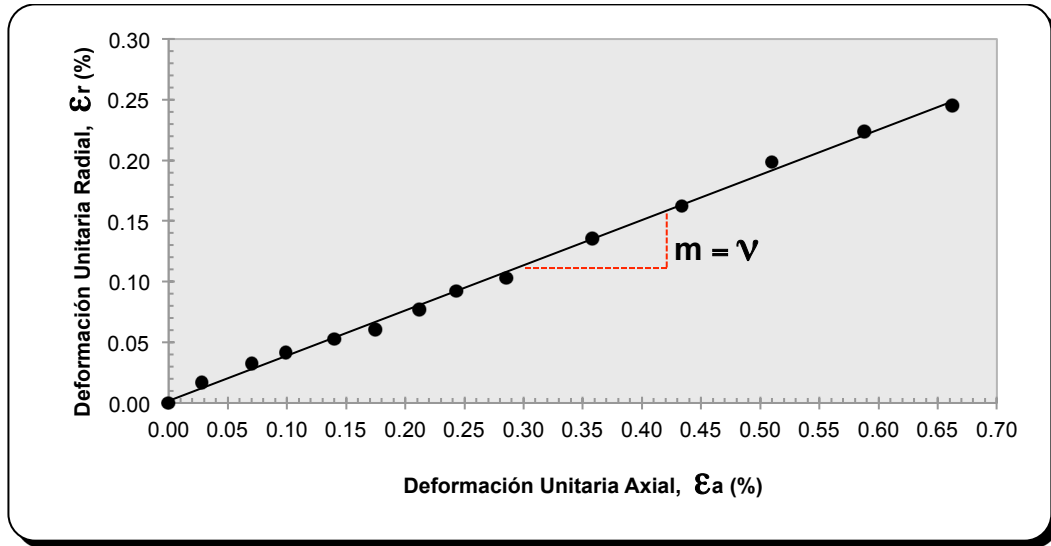


Figura 3.11 Determinación de la relación de Poisson dinámica.



---

# CAPÍTULO 4

**PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

---

#### 4.1 Variación de la compacidad relativa en el proceso de la prueba

La probeta de suelo es sometida a diferentes etapas, desde su montaje hasta la aplicación de la excitación dinámica, en las cuales sufre densificación. En este apartado se define la metodología para evaluar dicho comportamiento de la muestra en las diferentes etapas del ensaye, desde la formación del espécimen hasta el inicio de la etapa de falla.

Al momento de formar la probeta se puede estimar la compacidad relativa tomando como volumen de la probeta el correspondiente al molde en el que se formó, que se denominará compacidad relativa sin vacío,  $Dr_{sv}$ . En la etapa de montaje en la cámara triaxial, cuando se tiene la muestra de suelo en la cámara (con la membrana sujeta con arosellos en el cabezal y el pedestal), para evitar que se destruya la probeta antes de retirar el molde, se aplica 25 kPa ( $0.25 \text{ kg/cm}^2$ ) de vacío a la muestra. Este vacío genera una reducción de su volumen y con esto una densificación. Se toman las dimensiones de la probeta y se calcula la compacidad relativa con vacío,  $Dr_{cv}$ .

La metodología que se planteó para la ejecución de pruebas, consiste en cuatro densidades iniciales sin vacío  $Dr_{sv}$ , a las cuales isotrópamente se modifica la densidad al aumentar los esfuerzos de confinamiento de  $0.5$  a  $2.5 \text{ kg/cm}^2$  (a éstas les llamaremos series), dichas variaciones se presenta en la tabla 4.1.

Tabla 4-1 Variación de la capacidad relativa dividida en series.

$\sigma$	Serie 1		Serie 2		Serie 3		Serie 4		Observaciones
	Dr (%)	$\omega$ (%)	Dr (%)	$\omega$ (%)	Dr (%)	$\omega$ (%)	Dr (%)	$\omega$ (%)	
Sin vacío	97.0	0.46	64.3	5.37	47.5	8.57	10.3	12.60	Contenido de agua promedio
Con vacío	97.1	0.46	64.5	5.37	48.8	8.57	31.7	12.60	
50	97.8	0.45	64.9	5.43	51.6	8.76	39.3	12.63	Mediciones previas a la prueba cíclica
100	98.5	0.47	66.1	5.23	53.2	8.56	40.1	12.69	
150	99.3	0.44	66.7	5.25	53.9	8.58	40.4	12.57	
200	99.9	0.45	67.8	5.47	55.2	8.44	41.8	12.49	
250	100.0	0.47	69.1	5.50	60.7	8.51	42.5	12.65	

En la figura 4.1 se aprecia que el vacío aplicado no afecta a probetas con compacidades relativas iniciales iguales o mayores a 50% y que para probetas con compacidades relativas iniciales cercanas a 10%, las cuales al montarlas en la cámara y aplicarle vacío, se densificarán y llegará a valores cercanos a 30%. Este comportamiento es muy similar al mostrado por las probetas ensayadas por Flores (2009), cuyos resultados son expuestos en la figura 1.18 de este trabajo.

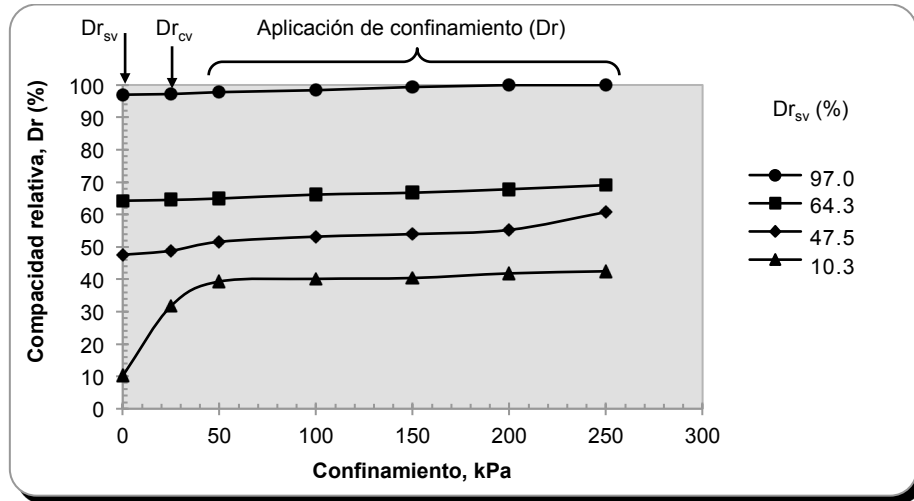
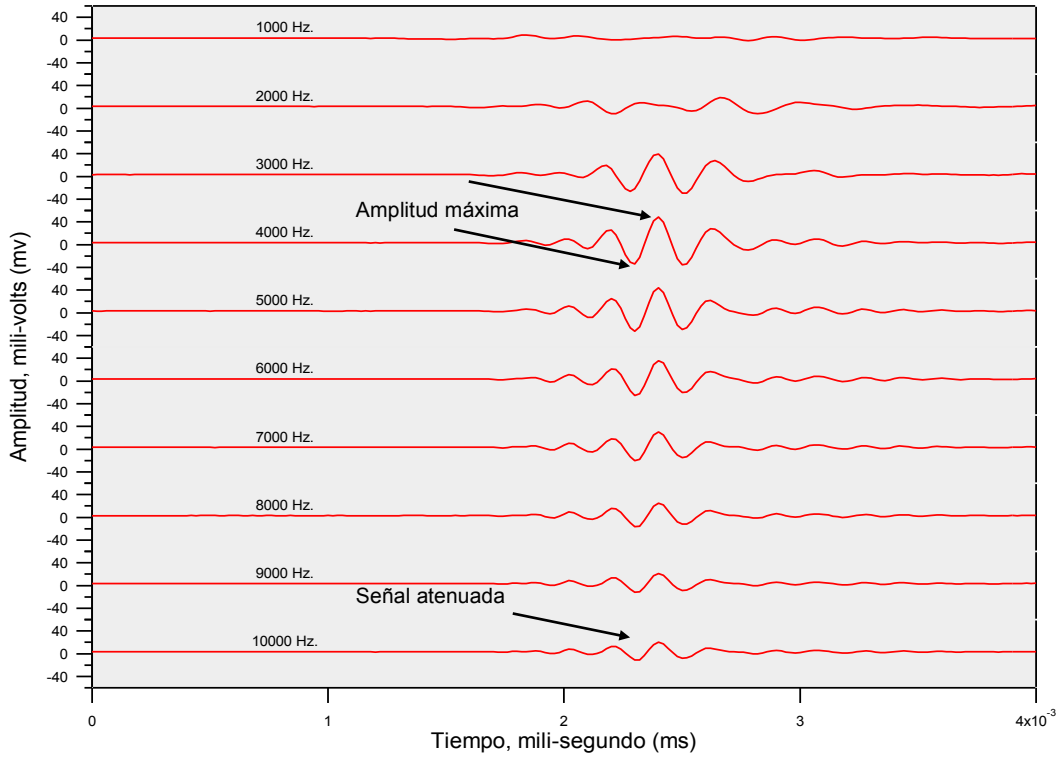


Figura 4.1 Historia de la variación de la compacidad relativa.

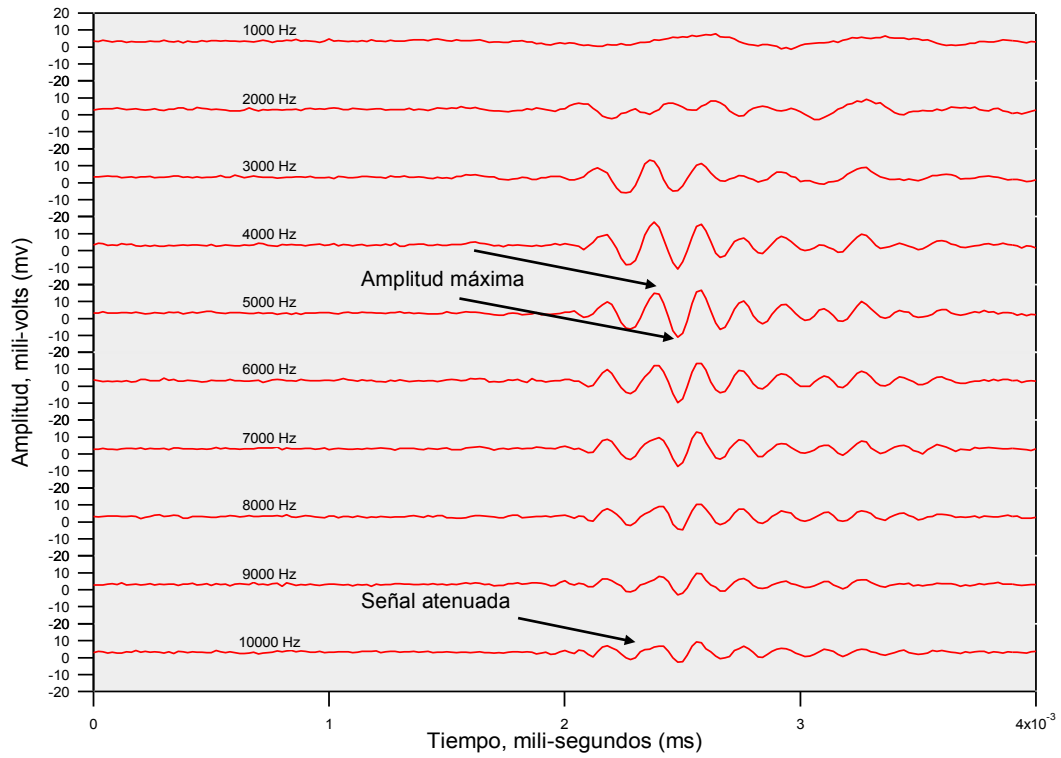
Para calcular el incremento en la compacidad relativa respecto a la que se obtiene al aplicar el vacío, se tomó como referencia la franja del tercio central, en la cual se midieron las deformaciones axiales con los LVDT's instalados en los tercios inferior y superior, los cuales registran el desplazamiento relativo en el punto en el cual están ubicados, y los desplazamientos radiales con los sensores magnéticos, que toman el valor promedio del desplazamiento en la franja del tercio central. Se consideró el tercio central debido a que la interpretación de los resultados de los ensayos corresponde a esta zona de la probeta. La diferencia de los desplazamientos registrados por los LVDT define el desplazamiento axial, mientras que el desplazamiento radial se obtiene como el promedio del desplazamiento registrado en los dos sensores de no contacto (ver figura 3.10b del capítulo 3).

#### 4.2 Comportamiento de señales compresibles $p$ y cortantes $s$ , en la variación de la frecuencia

En cada una de las pruebas realizadas se hizo un barrido de las señales (como se muestra en la figura 4.2 a y b), tanto para las velocidades compresibles,  $V_p$ , como las de cortante,  $V_s$ , variando la frecuencia desde 1000 hasta 10000 Hz, buscando con ello la mejor definición de la señal, como también si existe una variación en el tiempo de arribo con la frecuencia. En el caso de 1000 y 2000 Hz el comportamiento de ambas señales no se observa una buena definición, a partir de los 3000 Hz en ambas señales muestran una buena definición, como también un crecimiento. A partir de 6000 Hz en ambas señales P y S inicia una atenuación (figura 4.2a y b). Observando este comportamiento, no se presentan a más de 10000 Hz



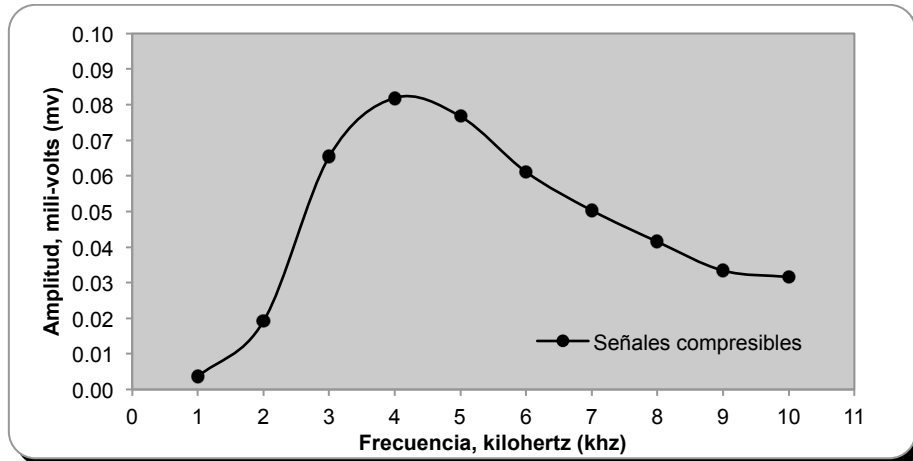
a) Señales compresibles



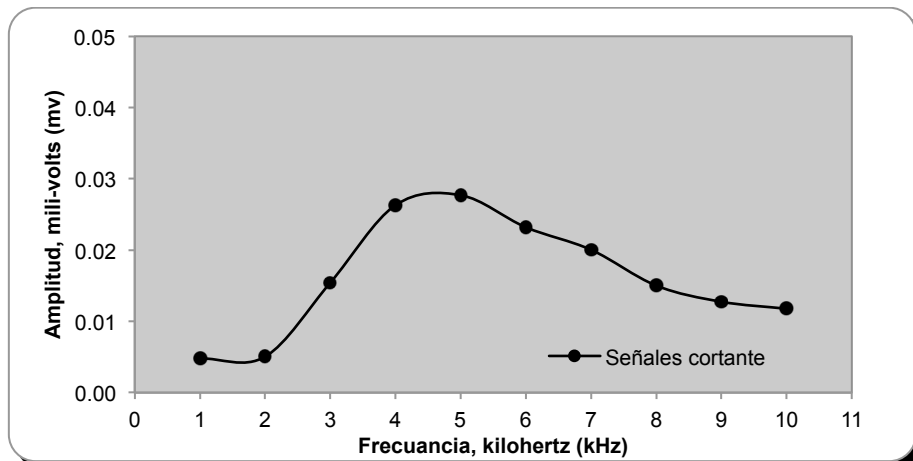
b) Señales cortantes

Figura 4.2 Medición de la variación de amplitud con respecto a la frecuencia.

Del barrido de las señales experimentales mostradas en las figuras 4.2a y b, se analizaron midiendo la amplitud valle a pico máxima lo cual se presenta en las figuras 4.3a y b, donde se observa que la mayor amplitud de dichas señales se obtiene en el intervalo de 4000 a 5000 Hz.



a) comportamiento de las señales compresibles



b) comportamiento de las señales cortante

Figura 4.3 Variación de la amplitud con respecto a la frecuencia.

En otras investigaciones como en la de Valle (2006), presenta un comportamiento similar en las señales de cortante obtenidas en esta tesis, dado que el rango de señales que presenta es de 4 a 8 kHz, en el caso de las señales compresibles, el autor aumenta la frecuencia hasta 200 kHz, para obtener el arribo de dicha señal, este comportamiento no fue observado en la presente investigación.

Con estos resultados, se determinó la importancia de la variación de la frecuencia en las velocidades compresibles P y cortantes S, por lo que en todas las pruebas realizadas se ensayaron a frecuencia de excitación 4, 5, 6, 8 y 10 kHz. En la figura 4.4a y b se presentan una serie de resultados, en los cuales se observa que la

velocidad se mantiene prácticamente constante con las diferentes frecuencias aplicadas, con una pequeña discrepancia en el caso de 250 kPa ( $2.5 \text{ kg/cm}^2$ ).

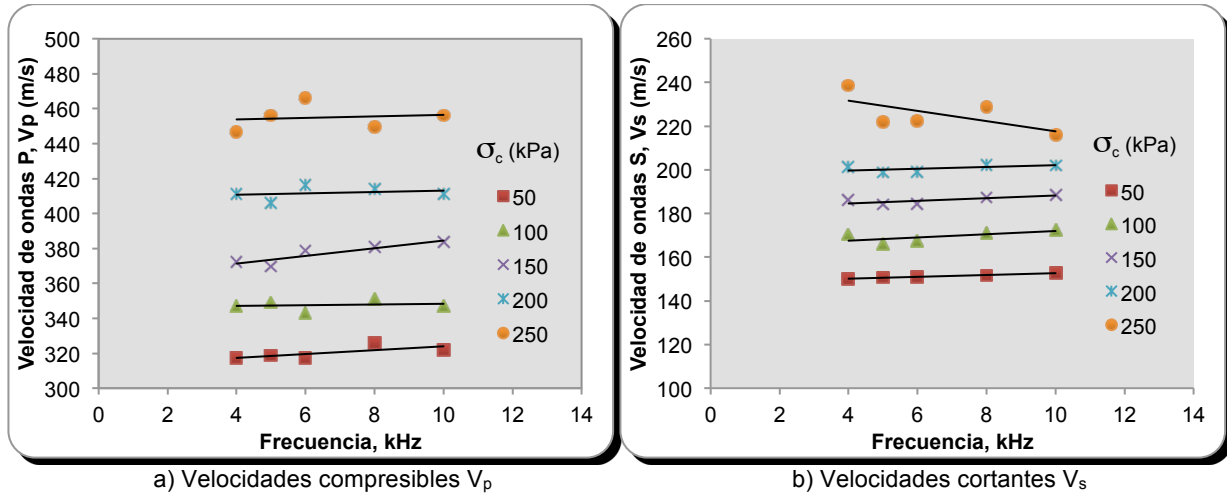


Figura 4.4 Comportamiento de las velocidades compresibles y de corte con la frecuencia.

Dado el caso que las velocidades prácticamente se mantuvieron constantes al aplicar la variación de la frecuencia, podríamos considerar poco significativo el efecto de ésta variable.

### 4.3 Material sp-arena mal graduada (arena de sílice)

Como ya se ha comentado, en lo siguiente se presentarán los resultados de 5 kHz obtenidos con el método de transmisión de ondas. En la serie de pruebas que fue planteada en la tabla 4.1, donde se presenta las 20 probetas ensayadas, variando la compacidad relativa, el esfuerzo de confinamiento y el contenido de agua, con el objetivo de analizar la influencia de éstos en la variación de la relación de Poisson dinámica. Los intervalos en los que se variaron éstos fueron: la compacidad relativa, de 39.3 a 100%; el esfuerzo de confinamiento, de 50, 100, 150, 200 y 250 kPa (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y  $2.5 \text{ kg/cm}^2$ , aproximadamente); y el contenido de agua, 0.45, 5.60, 8.50 y 12.6%. Este último, de acuerdo con la figura 3.6, cubre el contenido de agua correspondiente al óptimo.

Los resultados de los ensayos realizados se agruparon por series, como se presentan en la tabla 4.1. Estos se muestran de forma completa (todos y cada uno de los análisis de cada ensayo realizado para esta investigación) en el anexo A, donde se presentan los contenidos de agua, la variación con respecto al esfuerzo, de relación de vacío  $e$ , pesos volumétricos secos  $\gamma_d$  y densidad relativa  $D_r$ , así como los resultados de análisis de las velocidades de onda compresible P y de corte S. De igual forma, se muestran las curvas de deformación radial vs deformación axial, ambas agrupadas de forma tal que

se pueda identificar la influencia del confinamiento y la compacidad relativa en la variación de la relación de Poisson. Se definieron los valores de la relación de Poisson con ambos métodos, los cuales se resumen en las próximas figuras que se muestran en este capítulo.

#### 4.4 Relación de Poisson con medición local (en el tercio central)

Al graficar los resultados experimentales de deformación unitaria radial y axial de cada semi-amplitud se obtuvieron gráficos como el que se muestra en la figura 4.5. En este gráfico cada punto corresponde a las deformaciones axiales y radiales para una semi-amplitud, conforme se incrementa ésta aumentan las deformaciones axiales y radiales. Se aprecia que la variación de la relación entre la deformación axial y radial es prácticamente lineal, de tal forma que, al obtener la línea de tendencia con mínimos cuadrados (ver ecuación en la figura 4.5), la pendiente de la línea corresponde a la relación de Poisson media del suelo para esas condiciones de esfuerzo, compacidad relativa y humedad. Debido a que algunos de los gráficos no tenían como ordenada el origen, se decidió hacer la corrección de ordenada, manteniendo constante la pendiente definida por los puntos. Se corrigieron los valores de deformación unitaria radial para que la ordenada fuese cero o muy cercano a éste. Para el caso mostrado en la figura 4.5, la relación de Poisson dinámica es del orden de 0.354.

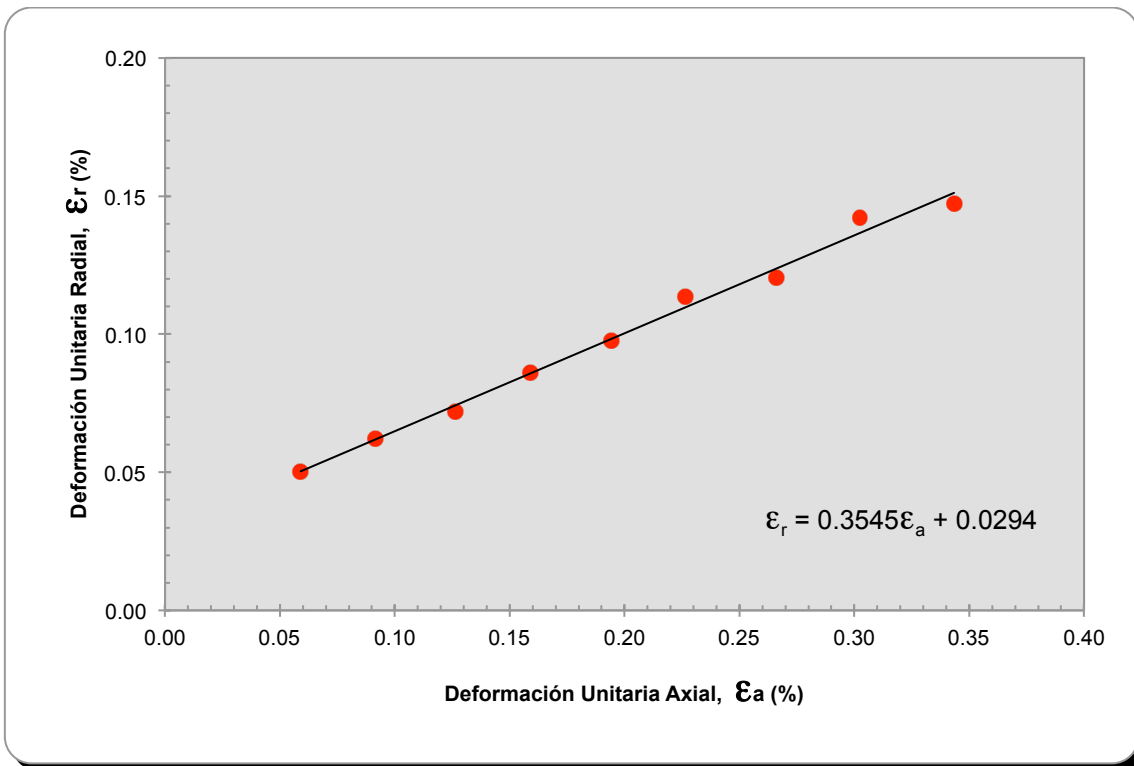


Figura 4.5 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

En la figura 4.6 se muestran las 19 de las 20 curvas de deformación radial versus deformación axial ensayadas para esta investigación. Los valores de relación de Poisson mínimo y máximo son de 0.254 y 0.369, respectivamente, aunque se aprecia un ligero comportamiento más cargado hacia el valor de Poisson máximo. En el anexo A se muestran las gráficas de deformación radial vs deformación axial para todos los ensayos realizados.

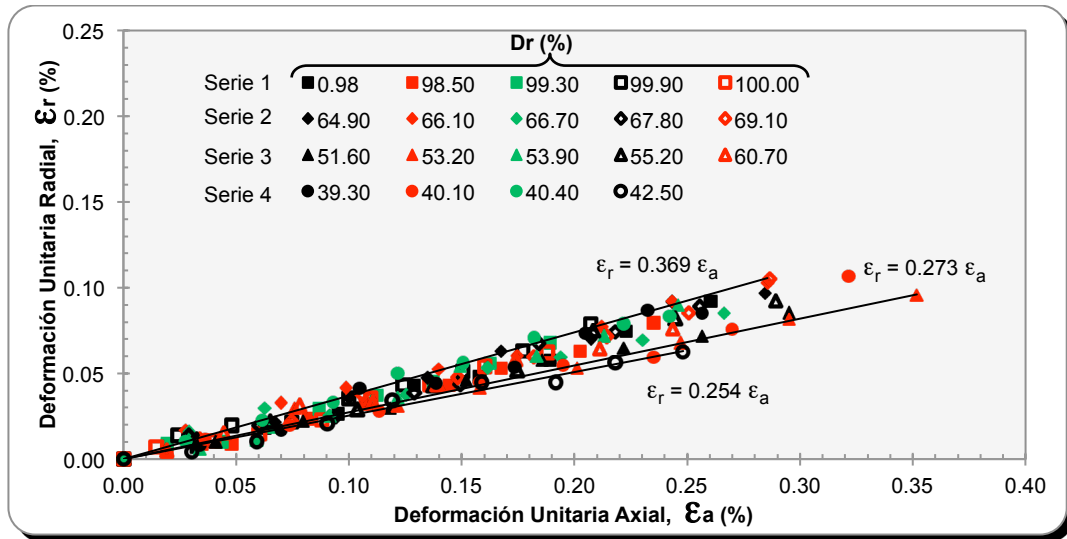


Figura 4.6 Resumen de las deformaciones unitarias axiales y radiales de los suelos ensayados.

#### 4.5 Relación de Poisson con sistema de transmisión de ondas

Como se comentó en el capítulo 1, para calcular la relación de Poisson con el método de transmisión de ondas es necesario definir las velocidades de ondas compresibles y de corte, dichas velocidades las obtenemos al aplicar una señal de excitación emisora obteniendo la respuesta de una señal receptora como se muestra en la figura 4.7 y 4.8 de una señal compresible y de corte respectivamente. Definiendo con ellas los puntos de arriba, los cuales nos permiten calcular la velocidad.

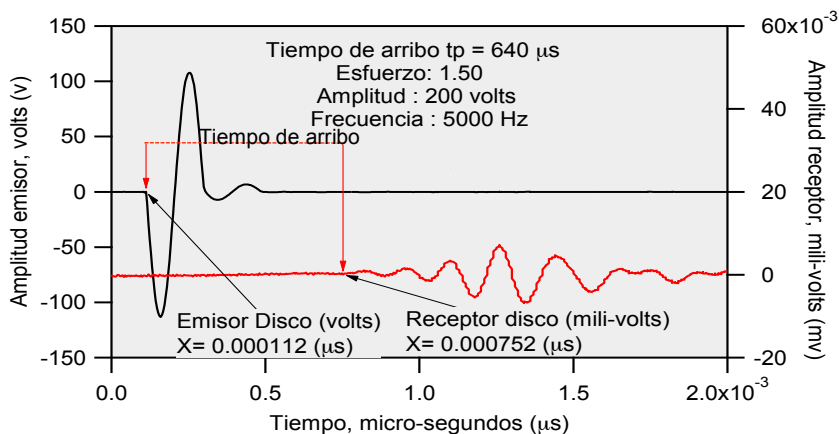


Figura 4.7 Análisis de tiempo de arribo para señales compresibles.



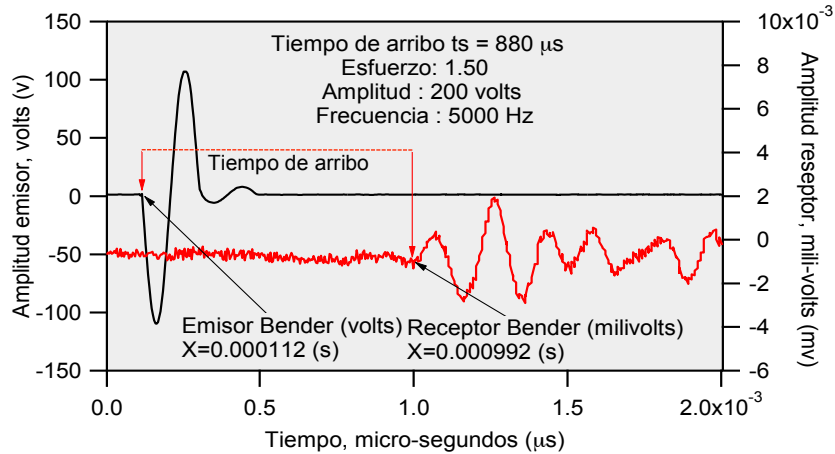


Figura 4.8 Análisis de tiempo de arribo para señales de corte.

En el anexo A se presenta todas las señales agrupadas por series en las cuales se varió el confinamiento de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 kg/cm<sup>2</sup>, tanto en el caso de las señales de onda de compresión como de corte.

El comportamiento de las velocidades de onda se presentó tal cual se esperaba al realizar los incrementos de confinamiento antes mencionados. Como se observa en la figura 4.9, las velocidades compresibles y de corte fueron aumentando.

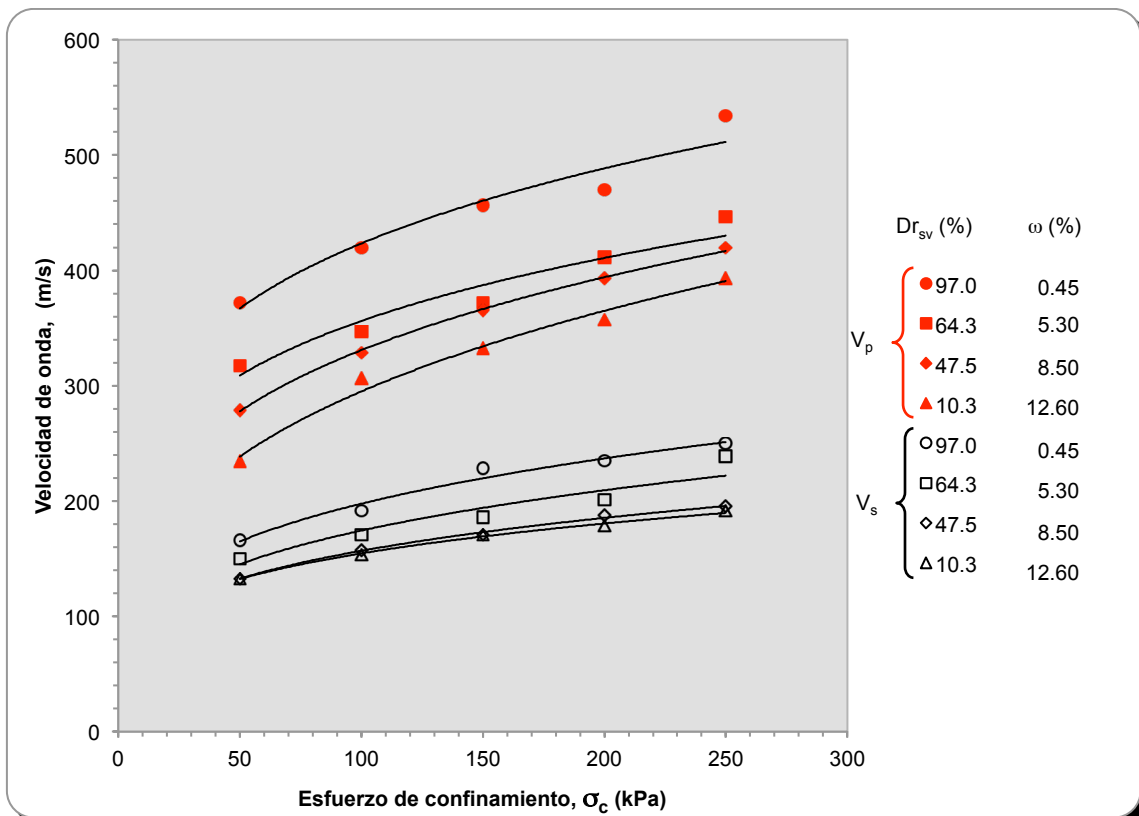


Figura 4.9 Historia de la variación de las velocidades con respecto al esfuerzo de confinamiento.

También se observa la influencia de la compacidad relativa en las velocidades: a mayor densificación aumenta velocidad, siendo la velocidad de onda compresible la que presenta un aumento más importante que el que se presenta en las velocidades de onda de corte.

#### **4.6 Comportamiento de la variación de la relación de Poisson con ambos métodos**

##### **4.6.1 Efecto de la compacidad relativa**

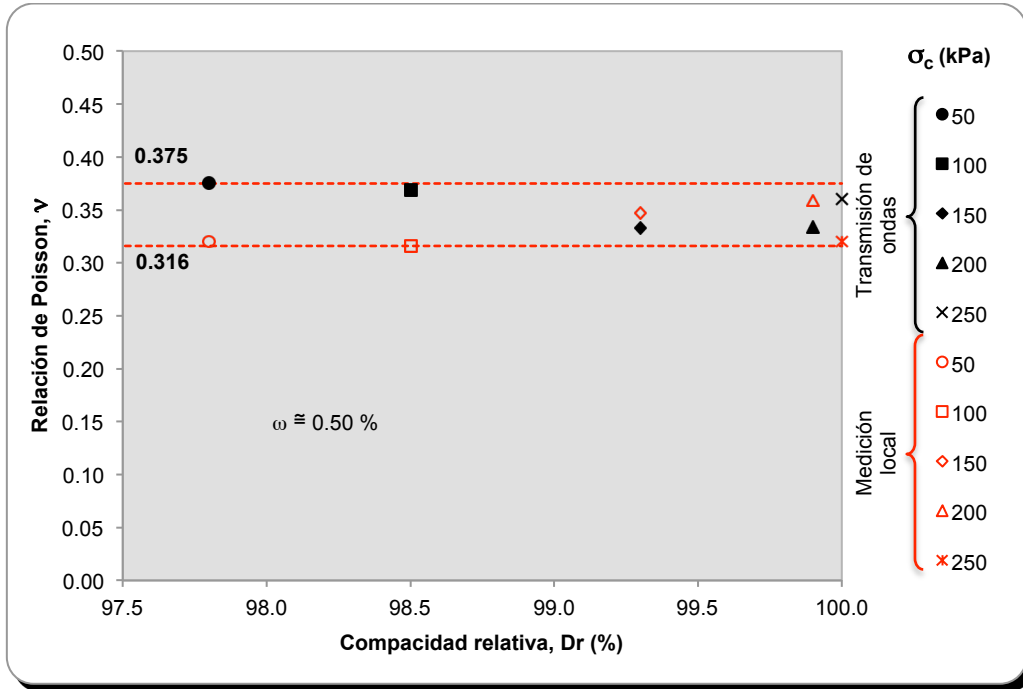
En la figura 4.10 se presenta la influencia de la compacidad relativa en la variación de la relación de Poisson, para los cuatro contenidos de agua y los cinco esfuerzos de confinamiento utilizados. En la figura 4.10a se muestran los resultados para el material seco con ambos métodos, donde se puede observar que para el método de medición local (tercio central), a pesar de la dispersión, la influencia de la compacidad relativa inicial y el esfuerzo de confinamiento son poco importantes en la variación de la relación de Poisson, ésta se mantiene entre 0.316 y 0.375; pero no se aprecia una tendencia clara a bajar o subir con la compacidad relativa.

El comportamiento con el método de transmisión de ondas en la figura 4.10a, presenta una ligera tendencia a disminuir el cual inicia en 0.375 hasta llegar a 0.334, debido al aumento del esfuerzo de confinamiento y la compacidad relativa, teniendo una diferencia 0.041, exceptuando con el confinamiento de 250 kPa ( $\cong 2.50 \text{ kg/cm}^2$ ) y compacidad relativa de 100%, el cual presenta un pequeño incremento en comparación al punto anterior que se presenta en la figura 4.10a.

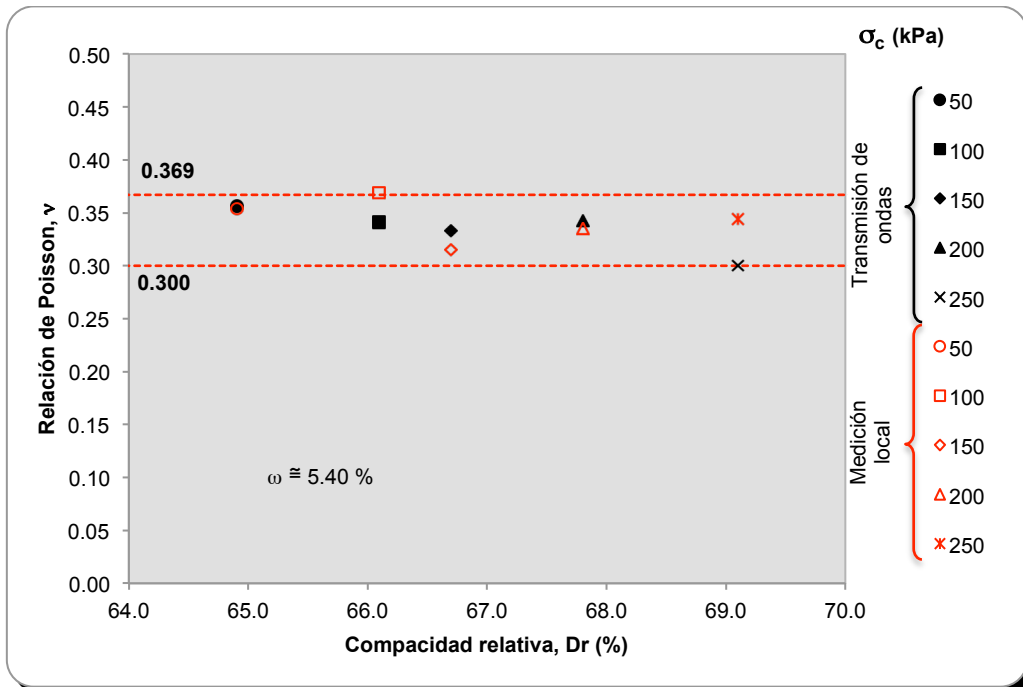
La figura 4.10a muestra los resultados de ambos métodos, los cuales se obtuvieron a partir de someter las muestras de arena a presiones de 50 y 100 kPa ( $\cong 0.50$  y  $1.00 \text{ kg/cm}^2$ ). Los valores determinados con transmisión de ondas fueron de 0.375 y 0.368 respectivamente, y con medición local de 0.32 y 0.316, presentando una diferencia del orden 0.59 menor al método de transmisión de ondas. En cambio las que se sometieron a un esfuerzo de confinamiento de 150 y 200 kPa ( $\cong 1.50$  y  $2.00 \text{ kg/cm}^2$ ) exhiben una menor diferencia entre ellos, siendo del orden de 0.028.

Para el material con 5.4% de contenido de agua (figura 4.10b), en los datos presentados con el método de medición local con respecto al esfuerzo de confinamiento presenta un comportamiento disperso, sin mostrar tendencias en aumento o descenso de la relación de Poisson, la cual tiene un rango superior 0.351 e inferior de 0.315, teniendo una diferencia de 0.036. En cambio con el método de transmisión de ondas sí presenta una tendencia a disminuir con el incremento del esfuerzo de confinamiento y

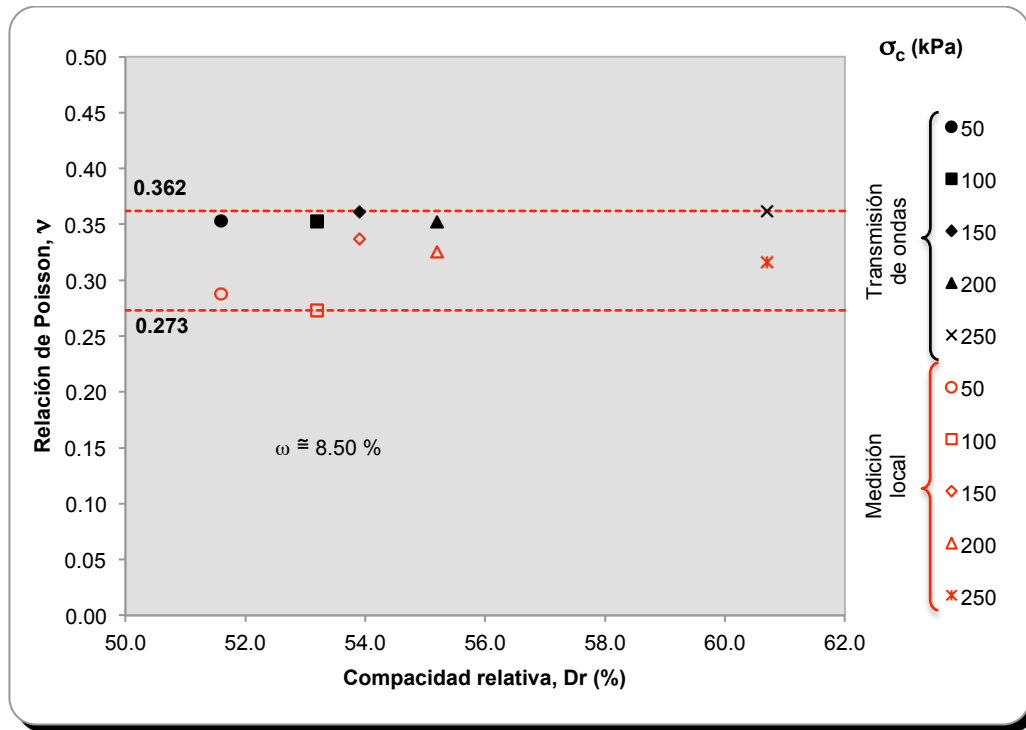
compacidad relativa, con el rango superior de 0.354 descendiendo hasta 0.300, presentando un intervalo de diferencia de 0.054. Como también se aprecia una mayor cercanía en la relación de Poisson obtenida con los dos métodos utilizados, en los esfuerzos de confinamiento de 50, 100, 150 y 200 kPa ( $\cong 0.5, 1.0, 1.5$  y  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ ), exceptuando para 250 kPa ( $\cong 2.50 \text{ kg/cm}^2$ ).



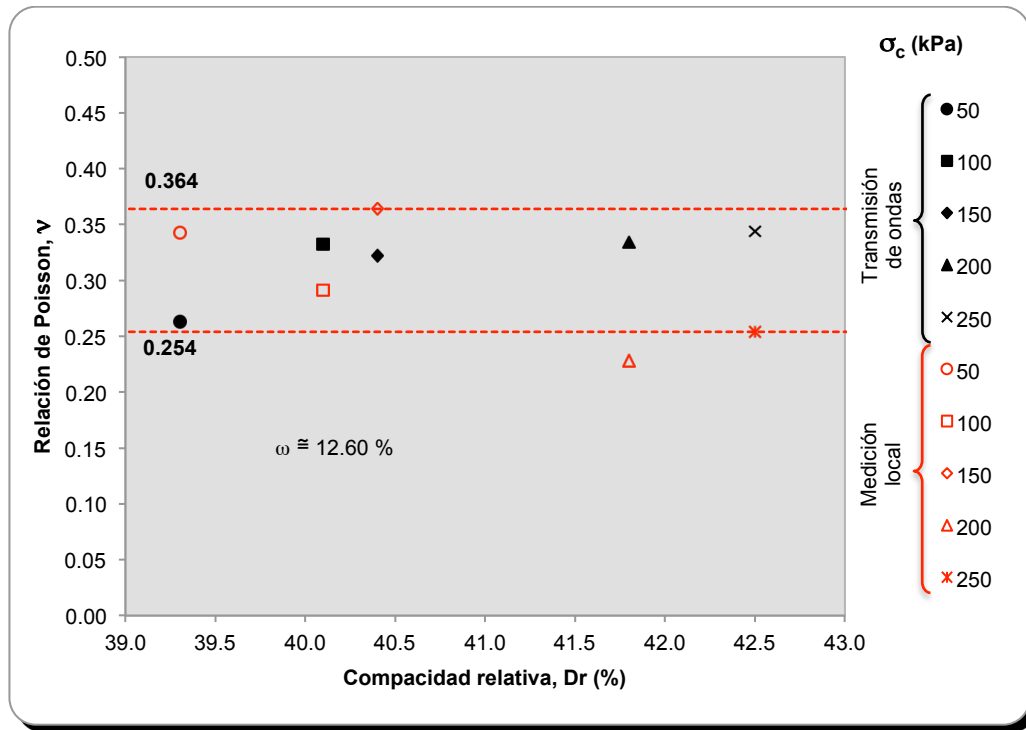
a)  $w = 0.50\%$



b)  $w = 5.40\%$



c)  $w = 8.5 \%$



d)  $w = 12.60 \%$

Figura 4.10 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa para diferentes valores de contenido de agua.

En la figura 4.10c, donde el contenido de agua aplicada al material es de 8.5%, el comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento y

compacidad relativa prácticamente se mantiene constante entre 0.352 y 0.362 con una diferencia de 0.01. Y los valores obtenidos con el método de medición local continúa presentando una dispersión que en este caso los rangos en los que se encuentra, son 0.273 a 0.337, dicha diferencia no sobrepasa los 0.064. Como también se observa que para los esfuerzos de confinamiento de 150 y 200 kPa ( $\cong 1.50$  y  $2.00 \text{ kg/cm}^2$ ), presentan un comportamiento más cercano a los obtenidos con el método de transmisión de ondas.

Para el material con contenido de agua de 12.60% y confinado a 50 kPa ( $\cong 0.50 \text{ kg/cm}^2$ ) que se expone en la figura 4.10d, la relación de Poisson es la más baja obtenida con el método de transmisión de ondas, de 0.254, a diferencia de los de obtenidos para los esfuerzos de confinamiento de 100, 150, 200 y 250 kPa ( $\cong 1.00$ , 1.50, 2.00 y  $2.50 \text{ kg/cm}^2$ ) que presentan valores con una pequeña tendencia a aumentar, entre los valores de 0.322 a 0.344 teniendo una diferencia de 0.022. Lo cual difiere a los adquiridos con el método de medición local, que indican la mayor dispersión para las compacidades relativas que van de 39 a 42.5%, estos valores tienen un rango de 0.228 a 0.364, presentando una diferencia de 0.136. Al igual que una mayor discrepancia con respecto a los dos métodos con los que se realizaron los ensayos.

En las figuras 4.10a a 4.10d, se presenta los resultados obtenidos con el método de transmisión de ondas, estos muestran una ligera tendencia descendente con respecto al esfuerzo de confinamiento observado en las gráficas 4.10a y b donde la compacidad relativa va desde 97.5 a 100% y 64 a 70% respectivamente, este comportamiento con respecto al esfuerzo de confinamiento no continua en la figura 4.10c cuando la compacidad relativa es de 50 a 60%, estos resultados se comportan de manera lineal o muy cercana a ello, al igual que en la figura 4.10d, donde la probeta se encuentra en un estado más suelto, por el orden de 39 a 43%, presentando una tendencia a aumentar con respecto al esfuerzo de confinamiento.

Al presentar los resultados de los cuatro contenidos de agua y cómo cambia con la compacidad relativa (figura 4.11), se aprecia que el intervalo de variación de la relación de Poisson está entre 0.254 y 0.367. En general, se esperaría que conforme se incrementa la compacidad relativa del material, la relación de Poisson fuese menor, pero vemos que para los suelos secos cuyas compacidades relativas son las más altas, los valores de relación de Poisson son relativamente mayores que para los contenidos de agua de 8.5 y 12.6%; de igual manera, se observa que para las muestras más densas se presenta una mayor agrupación del valor de Poisson en ambos métodos, y de mayor dispersión en los estados más sueltos.

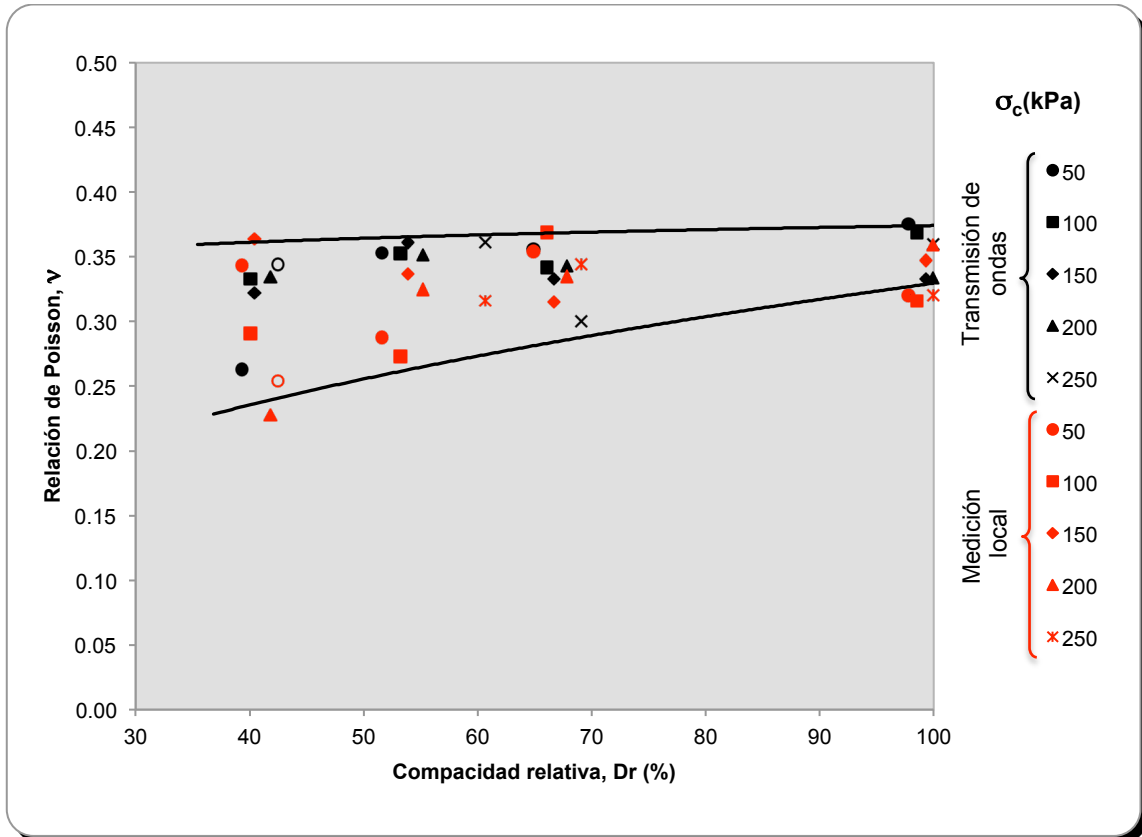


Figura 4.11 Variación de la relación de Poisson con la compacidad relativa.

#### 4.6.2 Efecto del contenido de agua

Para analizar la influencia del contenido de agua en la variación de la relación de Poisson se seleccionaron los cuatro intervalos de compacidad relativa variados con el esfuerzo de confinamiento. Se puede apreciar que al aumentar el contenido de agua inicia una dispersión que se va ampliando con respecto a éste, siendo el contenido de agua óptimo de 12.6% el que presenta una mayor dispersión en ambos métodos de medición de la relación de Poisson. En el caso del 8.5% de agua, se aprecia una separación siendo el método de medición local el que presenta una mayor dispersión y menor relación de Poisson con respecto a las obtenidas con el método de transmisión de ondas. De un material seco a otro con 5.5% de agua, no presenta una variación tan abrupta como se comentó en los otros dos contenidos de agua. Al igual que se comentó anteriormente de las figuras 4.12 donde en contenido de agua bajos se obtiene una mayor aproximación de resultados con los dos métodos aplicados en estos ensayos.

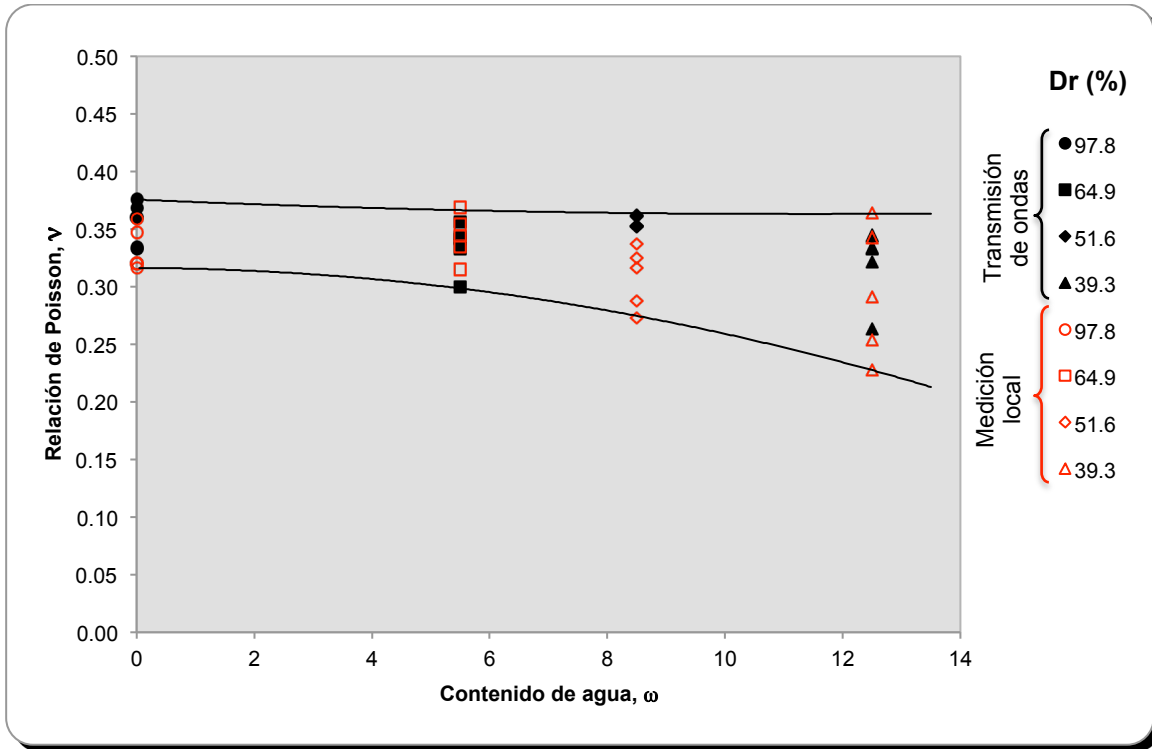


Figura 4.12 Influencia del contenido de agua en la relación de Poisson.

### 4.6.3 Comparación de la relación de Poisson, de los dos métodos aplicados en los ensayos

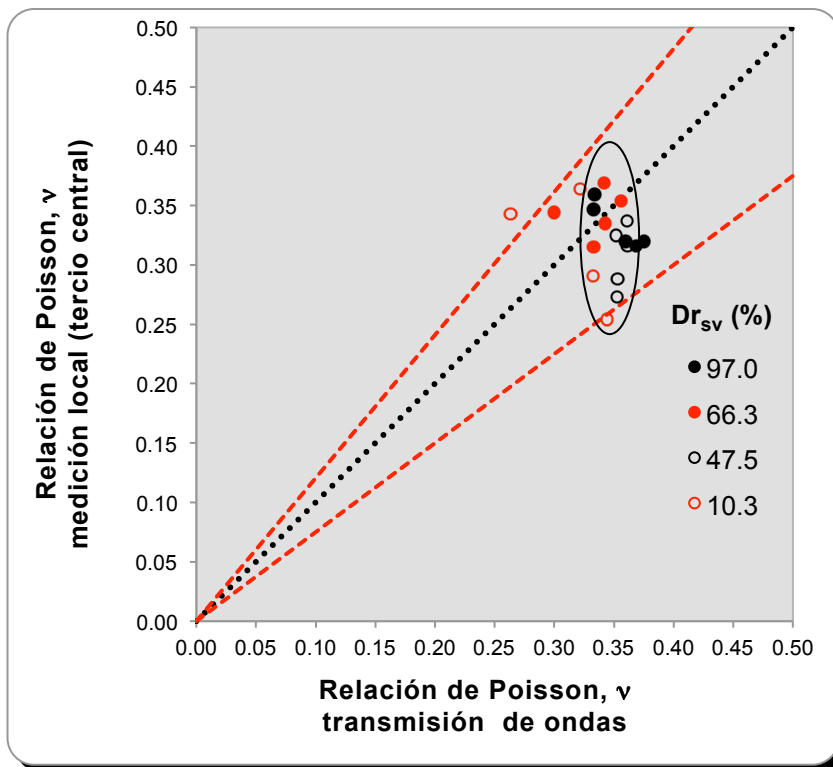


Figura 4.13 Regresión lineal con los dos métodos aplicados.

En la figura 4.13, se contrapusieron los resultados obtenidos con el método de transmisión de ondas y el de medición local, observándose una concentración mayor, al lado del método de transmisión de ondas, como ya se había comentado anteriormente este método fue más constante en los resultados, a diferencia de los resultados obtenidos con el método de medición local, ya que estos presentaron un amplio rango de dispersión, no hubo una cercanía entre ambos resultados.

Comparando los resultados obtenidos con el método de medición local y los presentados por Flores (2009) en la figura 1.20 del capítulo 1. Los cuales presentan un comportamiento disperso, esto también se presenta en la figura 4.11 con excepción, para la compacidad relativa de 100% donde se presenta un agrupamiento mayor como ya se había comentado anteriormente.

Respecto al efecto de la figura 4.11, Salem (2000) comenta que para un estado más suelto presenta un aumento la relación de Poisson, lo cual difiere con otros autores los cuales presentan una disminución con respecto al esfuerzo de confinamiento. Como ya se comento anteriormente, para el estado más suelto con densidad relativa de entre 39 y 42% (figura 4.10d) se presenta una tendencia a aumenta la relación de Poisson con el incremento de esfuerzo de confinamiento, para el caso de los resultados obtenidos con el método de transmisión de ondas. Al igual que en la figura 4.10c, el cual tiene una densidad relativa entre 50 y 60%, presentando un comportamiento no afectado por el esfuerzo de confinamiento, de igual forma Rivera (1988) y Talenick et al., (2000) no mostraron influencia del esfuerzo de confinamiento en la relación de Poisson, con un intervalo de variación en los resultados generales entre 0.10 y 0.30.

De acuerdo con los resultados presentados por Tsukamoto *et al.* (2002), conforme se incrementa el grado de saturación aumenta la relación de Poisson, hasta llegar a valores cercanos a 0.50 para el material saturado, pero para cada grado de saturación existe una banda de variación, la cual va disminuyendo conforme se lleva al suelo a la saturación total (figura 1.22). En el intervalo de grado de saturación de 0 a 20 %, la relación de Poisson oscila entre 0.22 y 0.45, independiente de la compacidad relativa. Estos resultados coinciden con los que se obtuvieron en el trabajo realizado para esta tesis, ya que los grados de saturación del material son del orden 0 a 20 % y la relación de Poisson es de 0.254 y 0.369 (figura 4.12).



---

# CONCLUSIONES

---

---

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo, la determinación de la relación de Poisson fue obtenida haciendo uso de dos métodos experimentales: 1) Transmisión de ondas, usando sensores piezoeléctricos (elementos de expansión y flexión), que inducen a la muestra distorsiones muy pequeñas, haciendo a esta técnica una prueba no destructiva; y, posteriormente en la misma muestra, 2) se miden los desplazamientos axiales y radiales en el tercio central de ésta, generados por la aplicación de excitación cíclica axial en la parte superior del espécimen.

Del trabajo desarrollado se derivan las siguientes conclusiones:

- En el proceso de obtención de las curvas de compactación, el contenido de agua generaba un incremento de resistencia en el material, es por esto que la gráfica de compactación mostrada en la figura 3.6, presenta un incremento de la relación de vacío al no permitir la densificación de la probeta, con respecto al aumento de agua.
- Durante la etapa de montaje de la probeta se registro la variación de la compacidad relativa en las diferentes etapas del ensaye. Observando que para compacidades iniciales (etapa de formación de la probeta) iguales o mayores a 40% el cambio que se presenta al momento de aplicar vacío para retirar el molde o aplicar el esfuerzo de confinamiento, previo al ensaye, es poco significativo.
- Ya que los valores de desplazamiento radial que se miden son del orden de décimas de milímetro, se recomienda que para investigaciones futuras se utilicen sensores de no contacto de tipo láser o magnético que tengan mejor resolución que los actualmente utilizados en esta investigación, con el objetivo de generar mejores señales de desplazamiento.
- En algunas señales de desplazamiento radial obtenidas en el tercio central de la probeta, en los dos sensores ubicados a 180° uno del otro, existe una diferencia en la amplitud y en la deformación residual que presenta el espécimen. Luego de llevar a cabo las verificaciones, haciendo el cambio físico de los sensores, se concluyó que esto se puede deber a que en algunas ocasiones el cabezal puede estar aplicando la carga de forma no uniforme en superficie del espécimen o, que por efectos de compactación, puede haber una diferencias de compacidad en ambos extremos de la muestra y que debido a que se registran valores muy pequeños de deformación, puede apreciar el efecto descrito.
- Se encontró que la frecuencia de la señal de excitación no altera los tiempos de arribo de las ondas S y P, y por tanto, las velocidades de onda de corte y

---

compresión. Estos resultados ayudaron a definir que con una frecuencia de entre 4 y 5 kHz, las señales de arribo tienen su mejor definición para la determinación de los tiempos de arribo, lo que facilita la interpretación de las señales.

- Los resultados obtenidos con ambas técnicas (mediciones locales y transmisión de ondas) tienen una concordancia bastante buena, considerando que los dos métodos tienen un alto grado de dificultad para su implementación y que pequeños errores en la medición significan diferencias muy importantes en el cálculo de la relación de Poisson.
- Debido a que los elementos de flexión presentaron mayor sensibilidad en algunas señales registradas, lo cual se observa en las graficas del Anexo A, es importante elaborar un procedimiento detallado del proceso de preparación y montaje del elemento. Con el objetivo de descartar esta situación, y sobre todo, que garantice una buena definición de las señales registradas, independientemente del usuario que los prepare.
- En el desarrollo de futuras investigaciones, deberá tomarse en cuenta que en el caso de muestras de suelos granulares parcialmente saturados, la interpretación de las señales de arribo puede resultar complicada, debido a que las ondas arriban con una diferencia de tiempo muy pequeña, por lo que debe evitarse el exceso de sensibilidad del sensor. Sumado a esto, la onda de compresión tuvo una amplitud muy similar a la de corte, dificultando el análisis de arribo de éstas.

---

## REFERENCIAS

1. ARULNATHAN, R., Boulanger, R. W., Harder Jr., L. F., Torres y R.A., Driller, M.W. (1998): **Dynamic properties of sherman island peat**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 124 (1), pp. 12–20.
2. BATES, C. R. (1989): **Dynamic soil property measurements during triaxial testing**, Geotechnique 39, No. 4, pp. 721-726.
3. BLANGY, J. P., Strandenes, S., Moos, D., y Nur, A. (1993): **Ultrasonic velocities in sands-revisited**, Geophysics, 58, pp. 344-356.
4. BLEWETT, J. y Woodward, P. K. (2000): **Phase and amplitude responses associated with the measurement of shear-wave velocity in sand by bender elements**, Canadian Geotechnical Journal, 37 (6), pp. 1348-1357.
5. 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, Diciembre 1996, pp .384-397.
6. 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, Diciembre, pp. 23-35.
7. CRESSWELL, A., Barton, M.E. y Brown, R. (1999): **Determining the Maximum Density of Sands by Pluviation**, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 22(4), pp. 324-328.
8. CUBRINOVSKI, M., e Ishihara, K. (2002): **Maximum and minimum void ratio characteristics**, Soils and Foundations, Vol. 42, No. 6, Diciembre, pp. 65-78.
9. 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.

- 
10. DOMENICO, S. N. (1984): **Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated reservoir**, Geophysics, Vol. 41, pp. 882-894.
  11. DONG, J., Nakamura, K., Tatsuoka, F., y Kohata, Y. (1994): **Deformation characteristics of gravels in triaxial compression tests and cyclic triaxial tests**, International Symposium of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 1, pp. 17-23.
  12. DRENEVICH, V.P. y Richart, F. E. Jr. (1970): **Dynamic prestraining of dry sand**, Journal of SMF Div., ASCE, Vol. 96, No. SM2, Mar., pp. 453-469.
  13. DVORKIN, J., Moos, D., Packwood, J., y Nur, A. (1996): **Identifying patchy saturation from well logs**, Department of Geophysics, Stanford University, pp. 1-10.
  14. 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.
  15. DYVIK, R. y Madshus, C. (1985): **Laboratory Measurement of  $G_{\text{máx}}$  using Bender elements**, Proceedings of ASCE Annual Convention: Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions, Detroit.
  16. FAWAZ, A., Boulon, M., y Flavigny, E. (2002): **Parameters deduced from the pressuremeter test**, Canadian Geotechnical Journal, Vol.39, November 2002, pp. 1333-1340.
  17. FIORAVANTE, V. (2000): **Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands for seismic wave propagation measured in triaxial testing**, Soils and Foundations, Japan Geotechnical Society, Vol. 40, No. 4, pp 129-142.
  18. FIORAVANTE, V., Capoferri, R., Hameury, O. y Jamiolkowski, M. (1994): **Deformational characteristics of uncemented carbonate Quiou sand**, International Symposium of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 1, pp. 55-61.

19. FIORAVANTE, V. y Capoferri, R. (2001): **On the use of multi-directional piezoelectric transducers in triaxial testing**. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24 (3), pp. 243–255.
20. 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 para optar por el grado de Doctor en Ingeniería, UNAM, México.
21. 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.
22. FLORES, O., Rosas, E., y Romo, M. P. (2002): **Automatización del equipo triaxial dinámico de columna resonante**, XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Santiago de Querétaro, Méx., Noviembre.
23. GAZETAS, G. (1991): **Foundation vibrations**, *Foundations Engineering Handbook*, ed. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, pp. 553-593.
24. GOKHAN, I., Mazli, Y. y Takaaki K. (2001): **Experimental investigation of dynamic response of compacted clayey soils**, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 26, No. 2, Mayo 2003, pp. 125-141.
25. GOTO, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y-S., y Soto, Y. (1991): **A Simple gauge for local small strain measurement in the laboratory**, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 1, pp. 169-180.
26. HAN, D. H. (1986): **Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments**, Ph. D. thesis, Stanford University.
27. HARDIN, B. O. (1965): **The nature of damping in sands**, *Proc. of ASCE*, Vol. 91, SM1, pp. 63-97.
28. HARDIN, B. O. y Black, W. L. (1969): **Closure to vibration of normally consolidated clay**, *Proc. of ASCE*, Vol. 95, SM6, pp. 1531-1537.

- 
29. HARDIN, B. O. y Drnevich, V. P. (1972): **Shear modulus and damping in soils I, measurements and parameters effects**, Journal of SMF Div., Proc. ASCE, Vol. 98, No. SM 6, pp. 603-624.
30. HARDIN, B. O. y Richart, F. E. (1963); **Elastic clayely wave velocities in granular soils**, Journal of ASCE, Vol. 89, pp. 33-65.
31. 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.
32. IIDA, K., (1938) **The velocity of elastic waves in sand**. Bulletin, Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University, Vol. 16, pp 131-144.
33. ISHIBASHI, I., Kawamura, M. y Bhatia, S. (1985): **Effect of initial shear on cyclic behavior of sand**, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 12, Diciembre, pp. 1395-1410.
34. ISHIHARA K. (1996): **Soil behavior in earthquake geotechnics**, Oxford University Press.
35. JOVICIC, V. y Coop M. R. (1998): **The measurement of stiffness anisotropy in clays with bender elements tests in the triaxial apparatus**, Geotechnical Testing Journal, JTJODJ, Vol. 21, No. 1, Marzo 1998, pp. 3-10.
36. HUMAR, J. y Madhuseudhan, B. N. (2010): **Effect of relative density and confining pressure on Poisson ratio from bender and extender tests**, Geotechnique, Vol. 60, No.7, pp. 561-567.
37. LAMBE, T. W., y Whitman, R. V. (1969): **Soil Mechanics**, ed. John Wiley and Sons, New York, NY.
38. LEE, K. L., Y Seed, H. B. (1967): **Dynamic strength of anisotropically consolidated sand**, Proc. ASCE, Vol. 93, No. SM5, pp. 169-190.
39. LINGS, M. L. y Greening, P. D. (2001): **A novel bender/extender element for soil testing**, Géotechnique, Vol. 51 (8), pp. 713–717.

- 
40. MANCUSO, C., Vassallo, R., (2002): **Small strain behavior of a silty sand in controlled-suction resonant column—torsional shear tests**, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, pp. 22–31.
41. MULILIS, P. Mori, K., Seed, B., y Chan, C. (1976): **Resistance to liquefaction due to sustained pressure**, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT7, Julio.
42. NAKAGAWA, K., Soga, K., y Mitchell, J. K. (1996): **Pulse transmission system for measuring wave propagation in soils**, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 4, pp 302-308.
43. RICHARD *et al.* (1970): **Vibration of Soils and Foundations**, Prentice-Hall, p. 414.
44. RIVERA, R. (1988): **Determination des propriétés mécaniques des sables et des argiles en régime dynamique et cyclique aux faibles déformations**, Tesis doctoral, Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Francia.
45. SALEM, H. S. (2000): **Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments, determined from seismic compressional and shear wave velocities**, Geotechnique 50, No. 4, 2000, pp. 461-463.
46. SÁNCHEZ-SALINERO, I., Roesset, J. M. y Stokoe, K. H. (1986): **Analytical studies of body wave propagation and attenuation**, Geotechnical Engineering Report No. GR86-15, Civil Engineering Department, University Texas.
47. SACHSE, W. y Pao, Y. H. (1978): **On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids**, Journal of Applied Physics, 49 (8), Agosto.
48. SCHULTHEISS, P. J. (1983): **The influence of packing structure on seismic wave velocities in sediments**, Marine Geological Report n., 83/1 University College of North Wales.
49. SEED, H. B. e Idriss, I. M. (1969): **The influence of soil conditions on ground motions during earthquakes**, J. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, No. SM1, pp 99-137, January.



- 
50. SHIRLEY, D. J. (1977): **An improved shear wave transducer**, J. A. Acoust., Proc. Am. Vol. LXIII, No.5, pp. 1643-1645.
51. SHIRLEY, D. J. y Hampton, L. D. (1978): **Shear wave measurements in laboratory sediments**, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 63, No. 2, pp. 607-613.
52. STRANDENES, S. (1991): **Rock physics analysis of the brent group reservoir in the Oseberg field: Stanford rock physics and borehole**, Geophysics project.
53. SUSHIL, K. C., Jiro, K. y Yutaka, H. (2004): **Measurement of quasi-elastic stiffness parameters of dense Toyoura sand in hollow cylinder apparatus and triaxial apparatus with bender elements**, Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, No. 1, 2004, pp 23-35.
54. TAKEJI, (1980): **Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range**, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 20, Junio 1980, pp 45-60.
55. TALESNICK, M. L., Kats, A., y Ringel, M. (2000): **An investigation of the elastic stress-strain behavior of a bender sandstone and a sandstone-like material**, Geotechnical Testing Journal, Vol. 23, No. 3, Septiembre 2000, pp. 257-273.
56. TATSUOKA, F. (1988): **Some recent developments in triaxial testing systems for cohesion less soils - Advanced triaxial testing of soil and rock**, ASTM STP 977, American society for testing and materials, West Conshohocken, PA, pp. 7-67.
57. TRONCOSO, J. (1995): **Design and behavior of tailings dams under seismic conditions**, Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Abril, Vol. 2, pp. 1517-1522.
58. TSUKAMOTO, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., y Huang, Y. (2002): **Resistance partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities**, Soils and Foundations, Vol. 42, No. 6, Diciembre, pp. 93-104.

- 
59. VAID, Y. P. y Negussey, D. (1984): **A critical assessment of membrane penetration in triaxial test**, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 7(2), 70-76.
60. VALLE, C. (2006): **Measurements of  $V_p$  and  $V_s$  in Dry, Unsaturated and Saturated Sand Specimens with Piezoelectric Transducers**, Tesis para optar por el grado de PhD, Universidad de Texas, Austin, USA.
61. VIGGIANI y Atkinson, (1995): **Interpretation of bender element tests**, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Vol. 32, No. 8, Diciembre, pp. 373 (A) – 373 (1).
62. YASUDA, N., Nakamura, A., Ohta, N. (1994): **Deformation characteristics of undisturbed riverbed gravel by in situ freezing sampling method**, International Symposium of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 1, pp. 17-23.
63. YIN, H. (1993): **Acoustic velocities and attenuation of rocks: Isotropy, intrinsic anisotropy, and stress induced anisotropy**, Tesis para optar por el grado de Ph. D., Stanford University.

---

# **ANEXO A**

---

A continuación se presentaran los resultados correspondiente a los ensayos experimentales realizados en esta investigación, divididos primero por series, como se describe en la gráfica 4.1, mostrando primero los resultados del método cíclico y al final de cada serie el resumen de las velocidades de onda y relación de Poisson obtenidas con el método de transmisión de ondas.

Serie 1.  $\omega \approx 0.45$ ;  $Wp = 6kg$  ( $Dr \approx 100$ ;  $e \approx 0.80$ )

Tabla A-1 Resultados del contenido de agua obtenidos para la serie 1

Confinamiento kPa	$W_{pisón}$ kg	Contenido de agua				
		N° cápsula	Tara g	$W_{mh+t}$ g	$W_{ms+t}$ g	$\omega$ %
50	6.00	78	123.81	242.43	241.90	0.45
100	6.00	78	123.81	231.10	230.60	0.47
150	6.00	37	118.10	231.80	231.30	0.44
200	6.00	124	119.70	219.40	218.95	0.45
250	6.00	51	118.60	235.65	235.10	0.47

Tabla A-2 Resultados calculados (serie 1).

Etapa kPa	Radio mm	Volumen cm <sup>3</sup>	$e$	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	$Dr$ (%)
molde	50.70	2018.86	0.796	1.471	99.8
50	50.93	2036.91	0.812	1.452	97.8
100	50.90	2035.03	0.811	1.453	98.0
150	50.85	2031.20	0.799	1.462	99.3
200	50.77	2024.52	0.795	1.465	99.9
250	50.73	2021.46	0.794	1.466	100.0

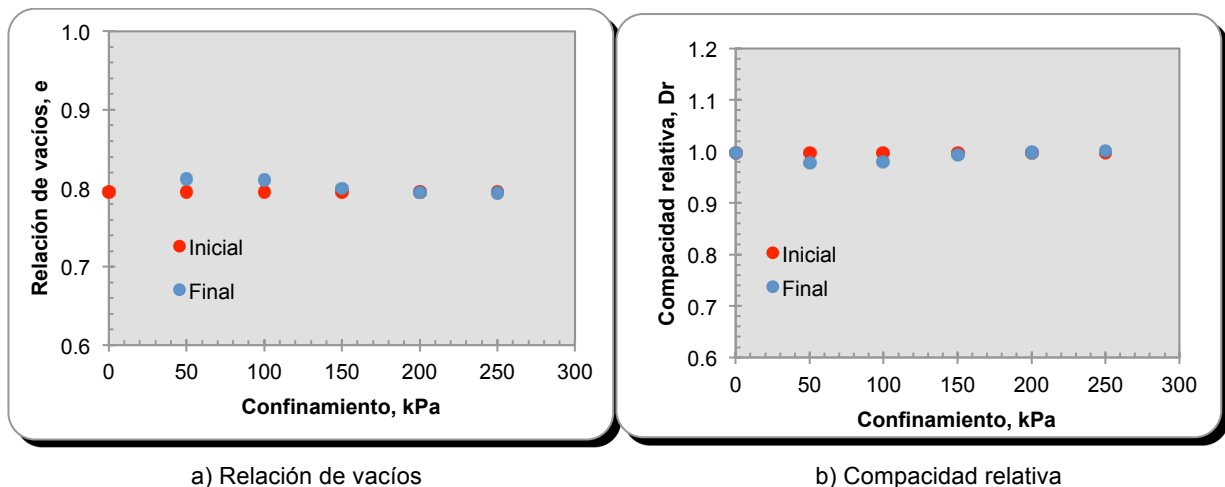


Figura A.1 Variación de la relación de vacíos y compacidad relativa, respecto al esfuerzo de confinamiento (serie 1).

• Serie 1 (0.5kg/cm<sup>2</sup>)

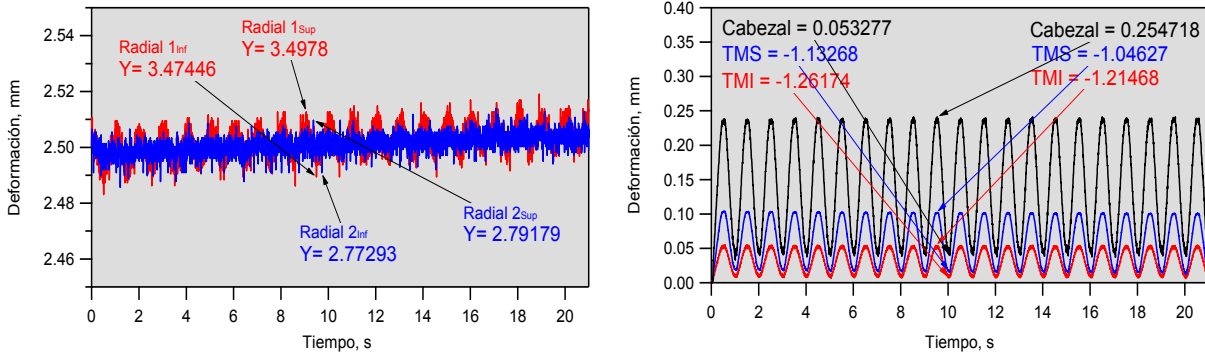


Figura A.2 Amplitud de 0.20 mm.

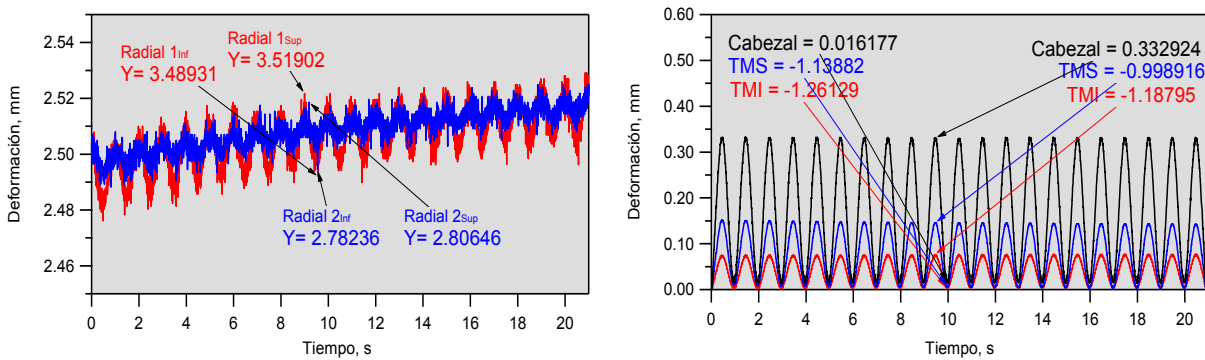


Figura A.3 Amplitud de 0.30 mm.

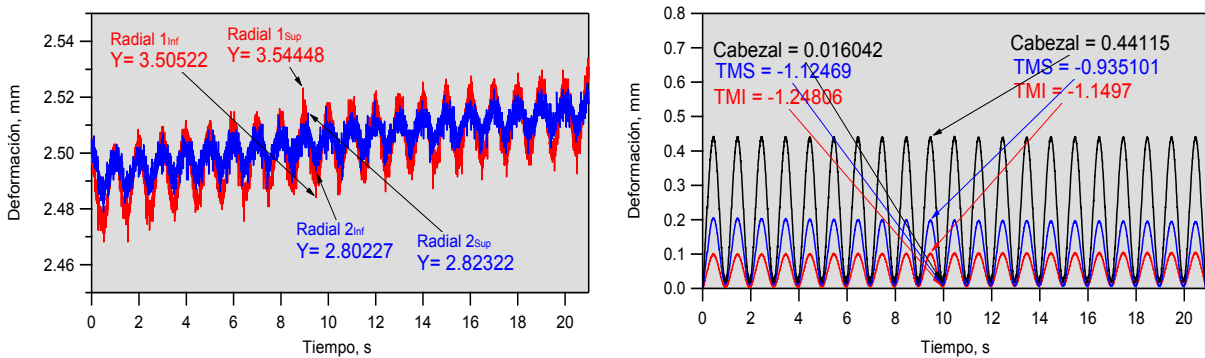


Figura A.4 Amplitud de 0.40 mm.

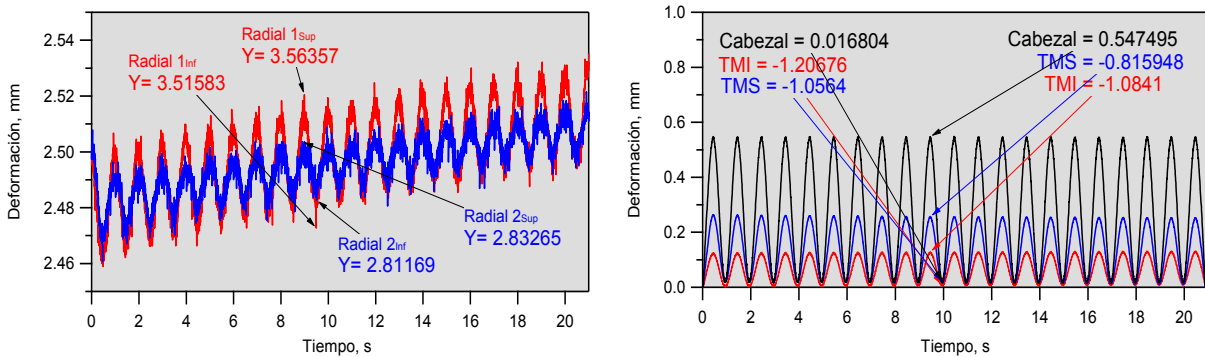


Figura A.5 Amplitud de 0.50 mm.

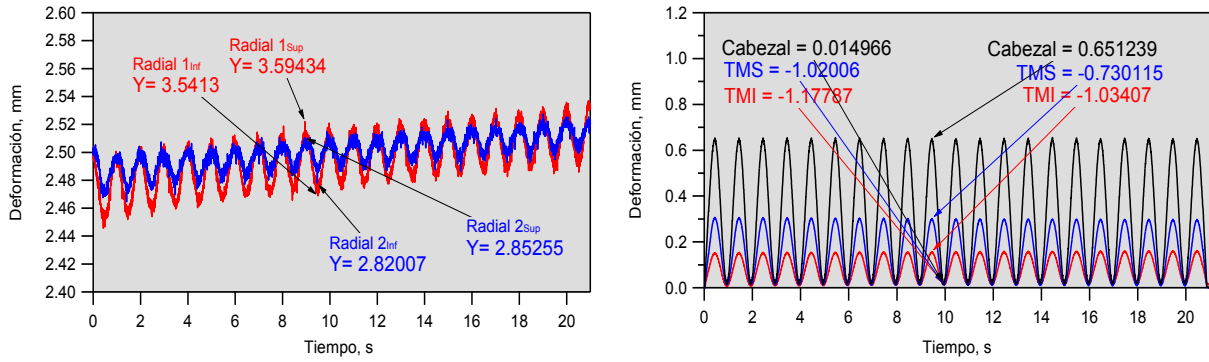


Figura A.6 Amplitud de 0.60 mm.

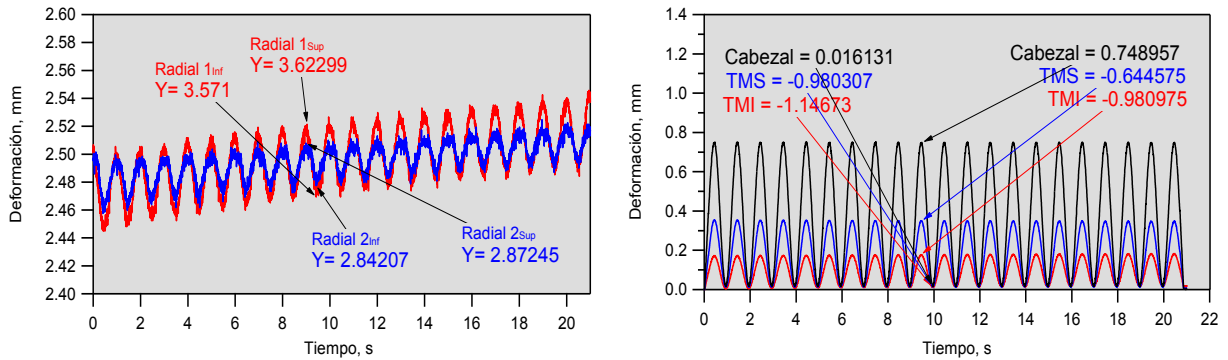


Figura A.7 Amplitud de 0.70 mm.

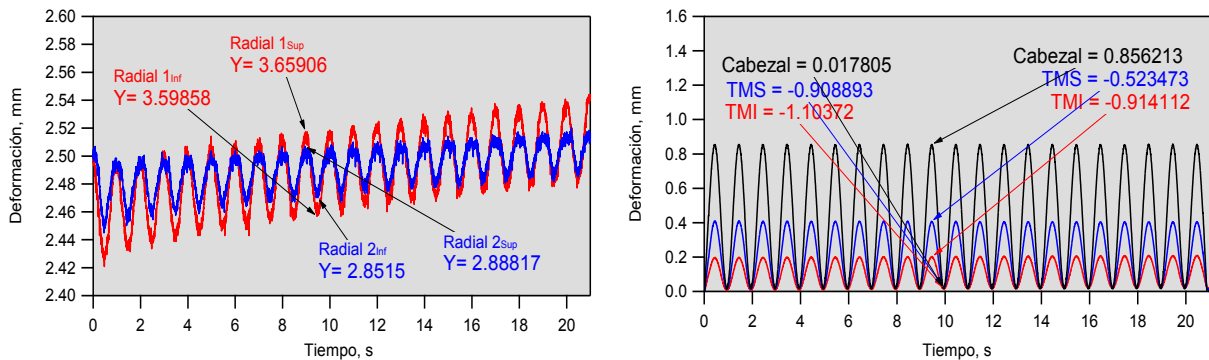


Figura A.8 Amplitud de 0.80 mm.

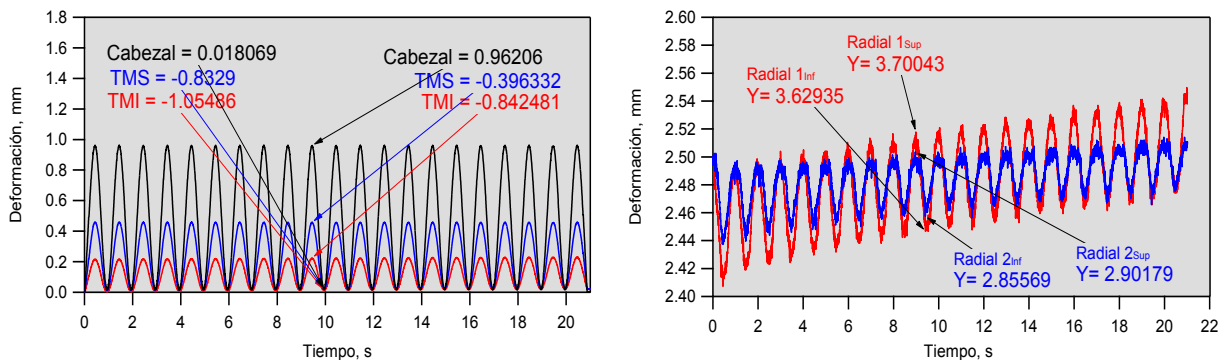


Figura A.9 Amplitud de 0.90 mm.

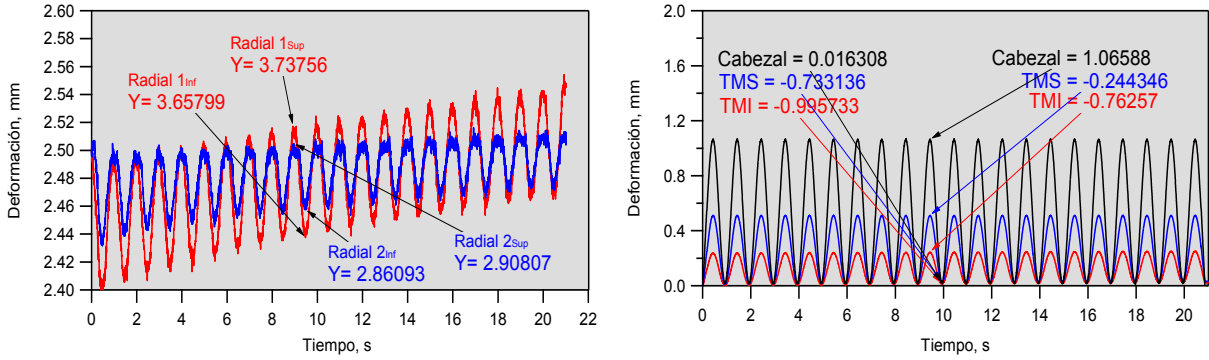


Figura A.10 Amplitud de 1.00 mm.

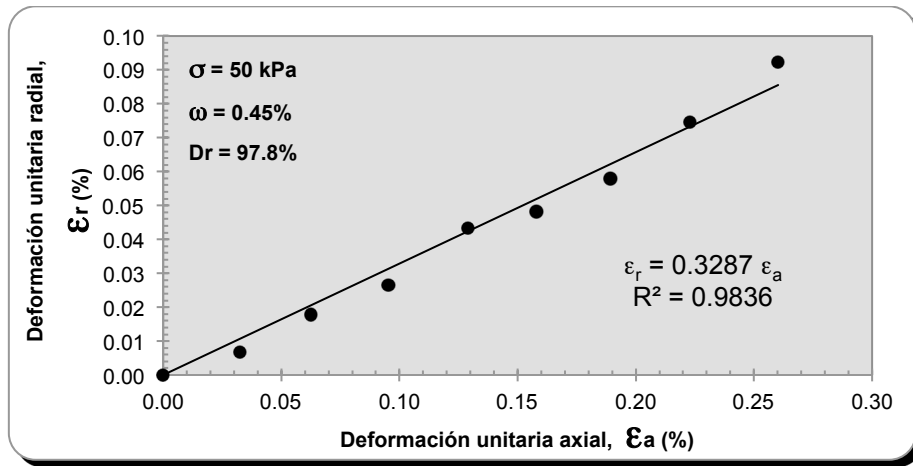


Figura A.11 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

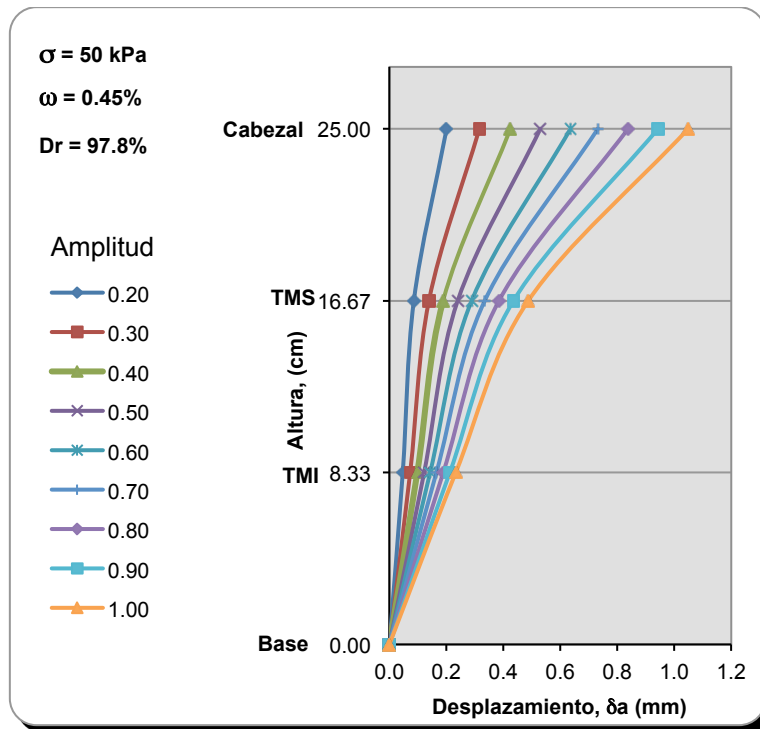


Figura A.12 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 1 (100 kPa)

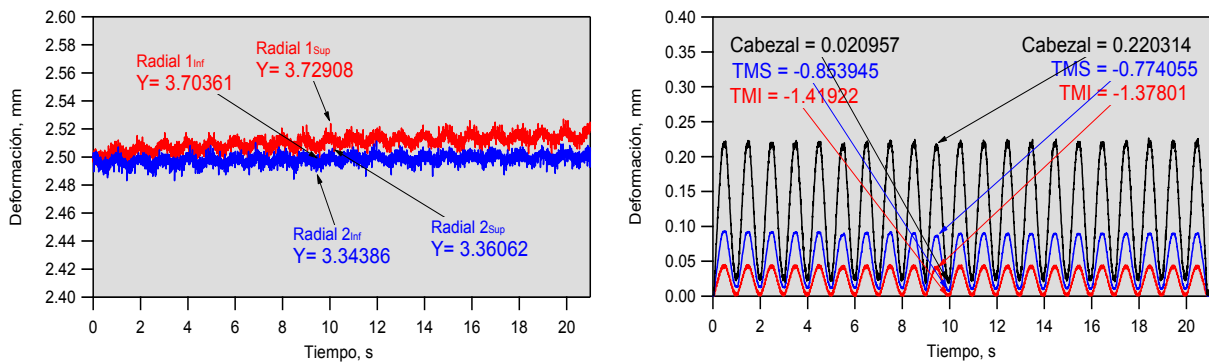


Figura A.13 Amplitud de 0.20 mm.

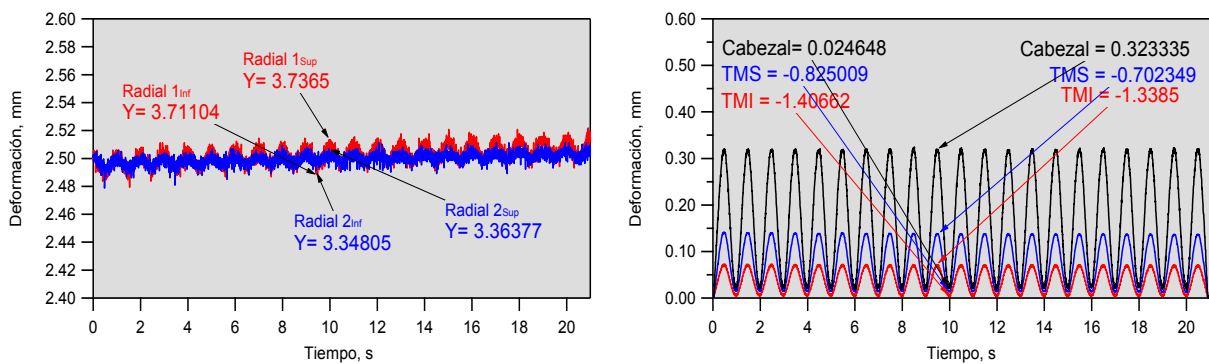


Figura A.14 Amplitud de 0.30 mm.

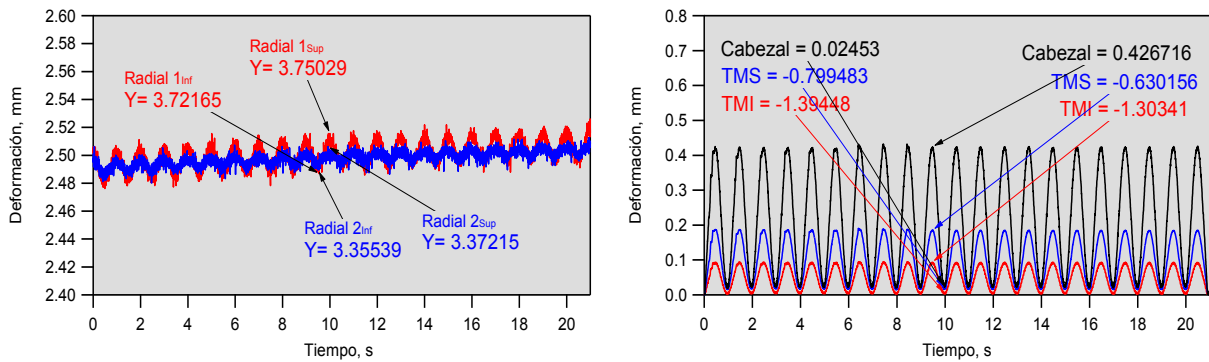


Figura A.15 Amplitud de 0.40 mm.

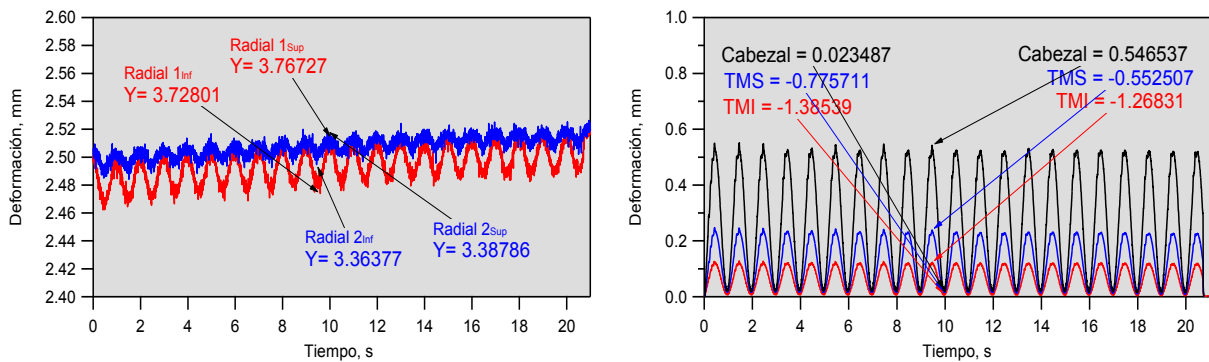


Figura A.16 Amplitud de 0.50 mm.



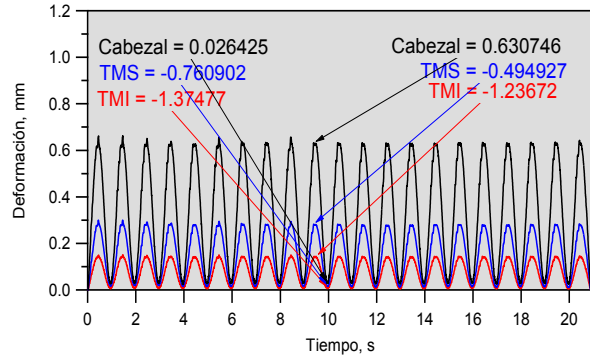
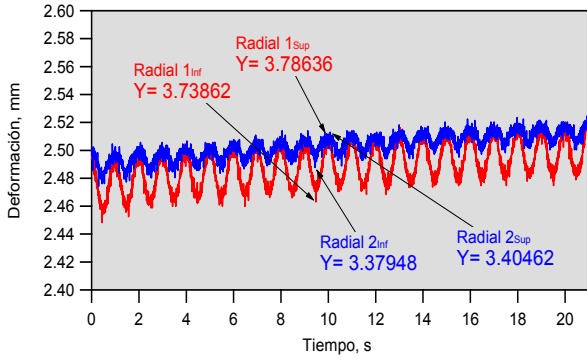


Figura A.17 Amplitud de 0.60 mm.

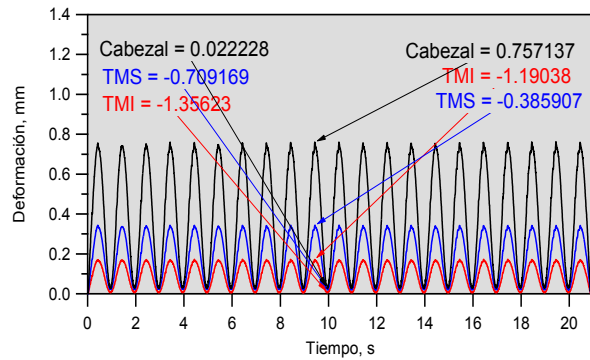
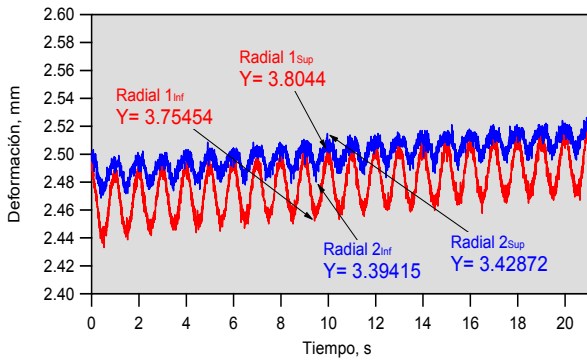


Figura A.18 Amplitud de 0.70 mm.

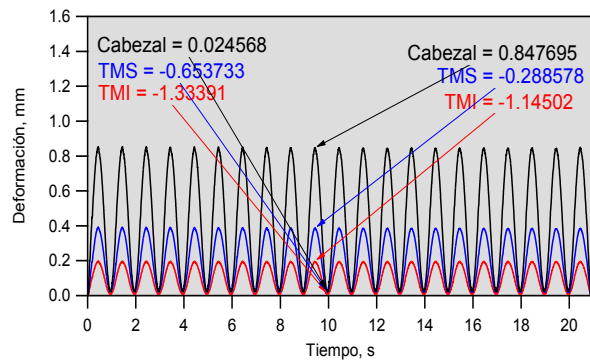
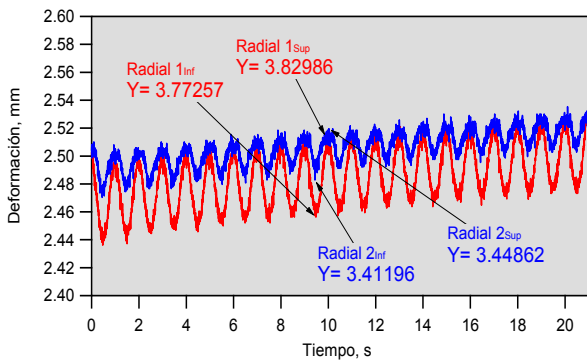


Figura A.19 Amplitud de 0.80 mm.

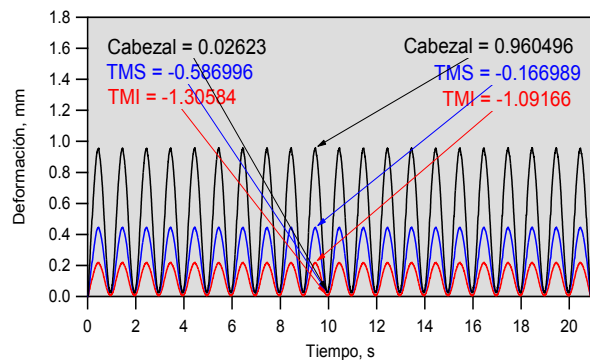
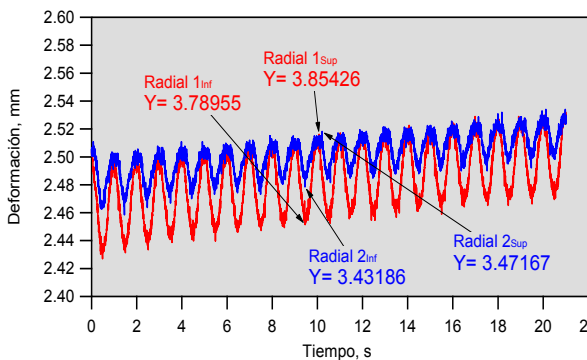


Figura A.20 Amplitud de 0.90 mm.

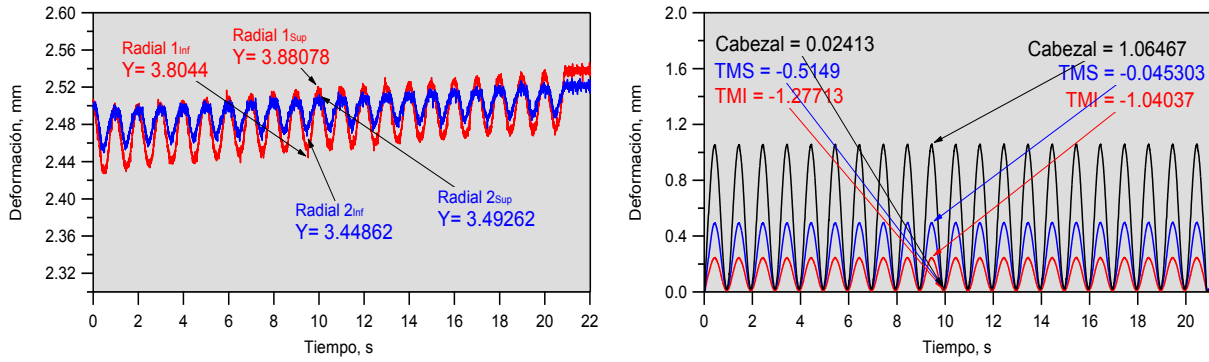


Figura A.21 Amplitud de 1.00 mm.

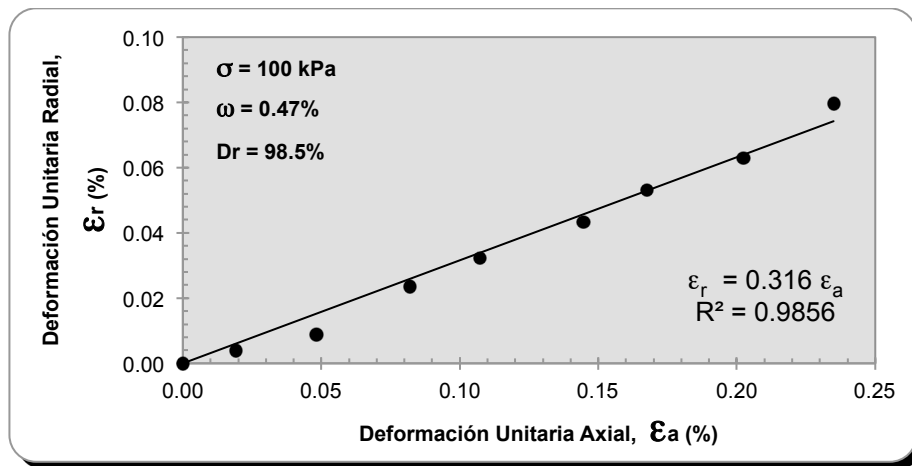


Figura A.22 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

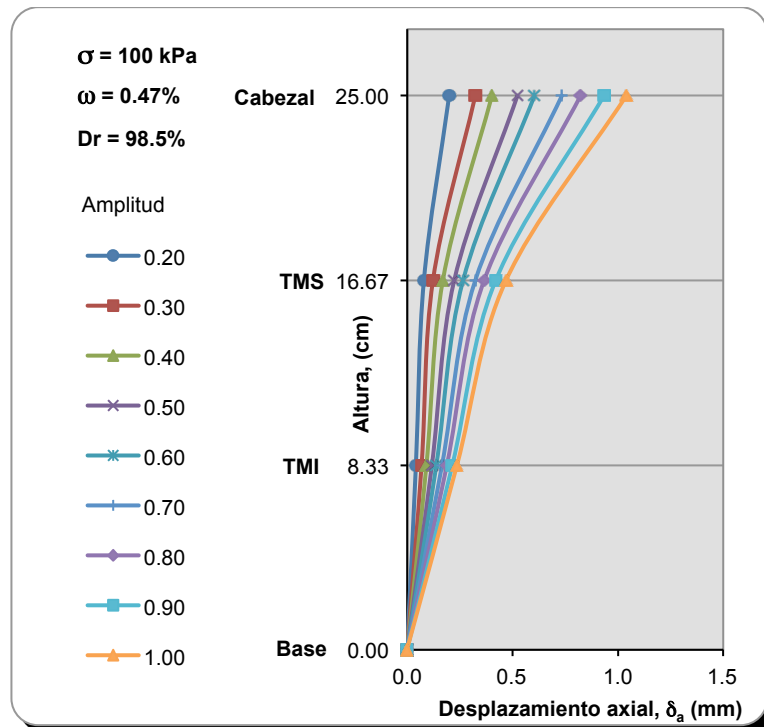


Figura A.23 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 1 (150 kPa)

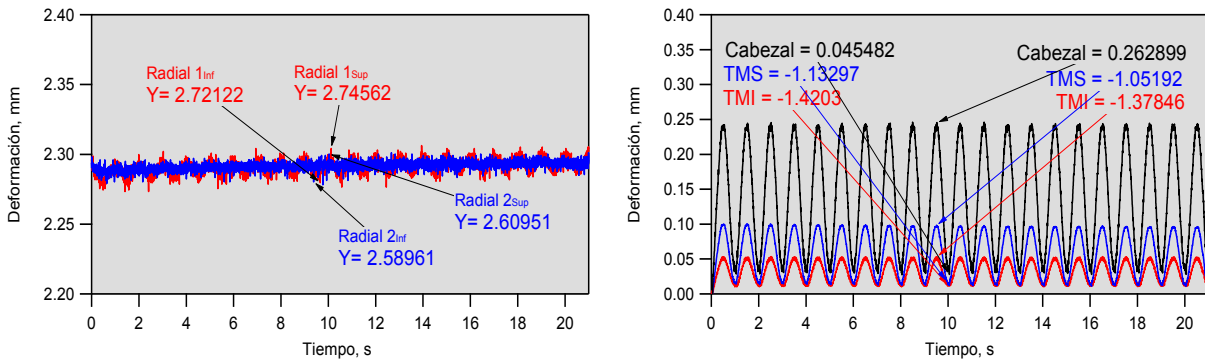


Figura A.24 Amplitud de 0.20 mm.

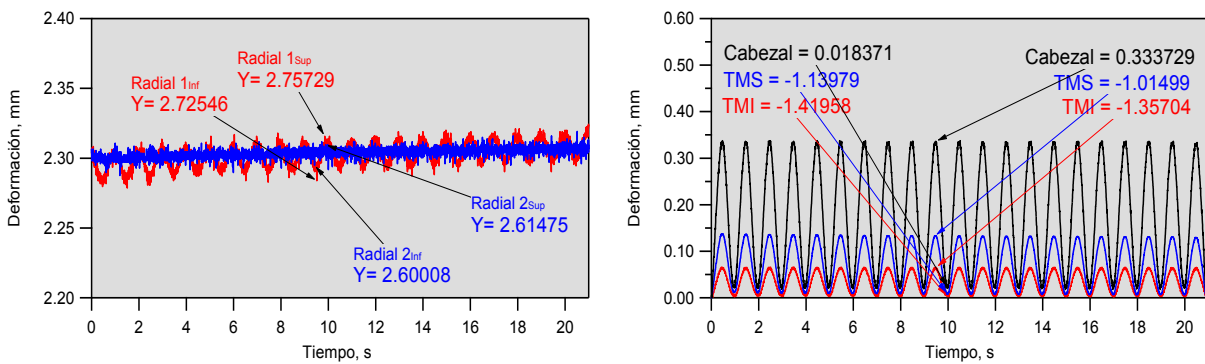


Figura A.25 Amplitud de 0.30 mm.

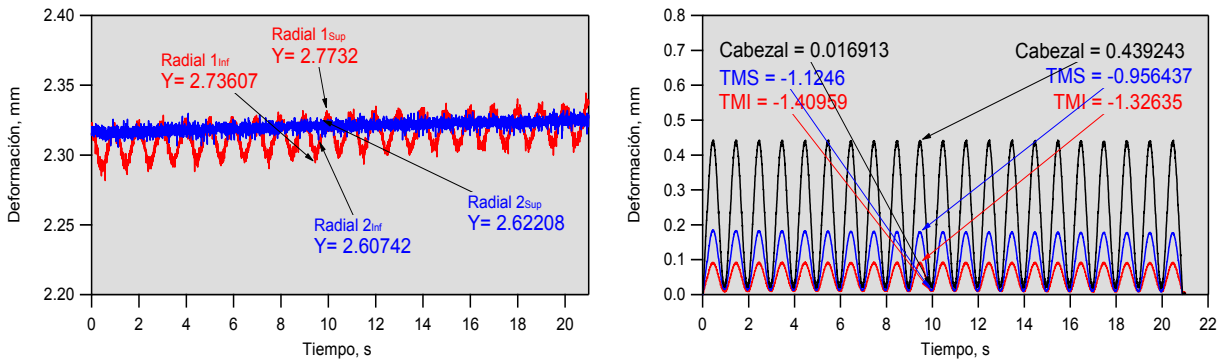


Figura A.26 Amplitud de 0.40 mm.

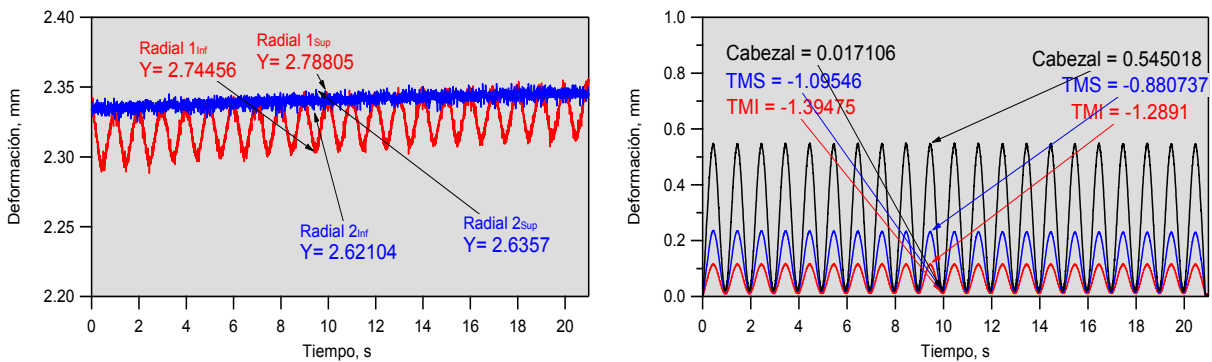


Figura A.27 Amplitud de 0.50 mm.

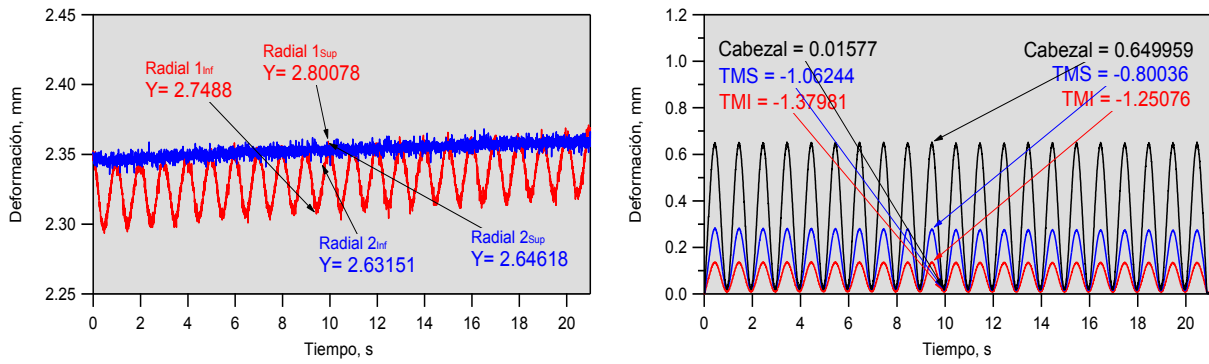


Figura A.28 Amplitud de 0.60 mm.

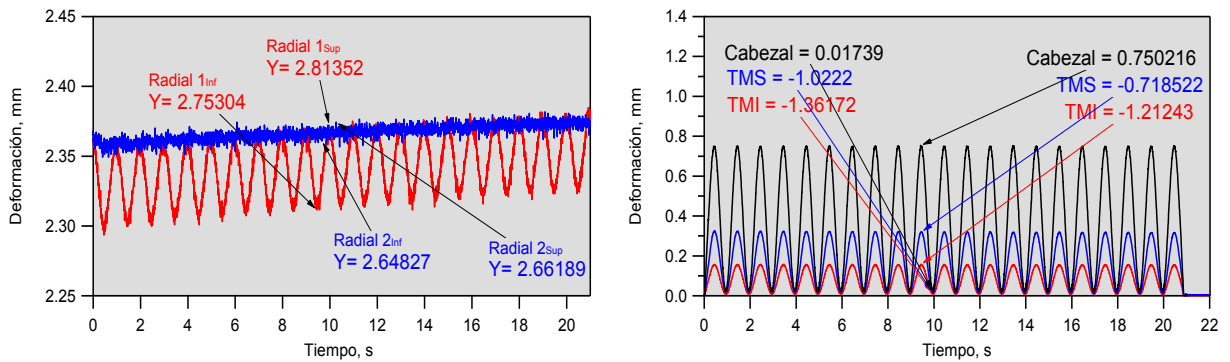


Figura A.29 Amplitud de 0.70 mm.

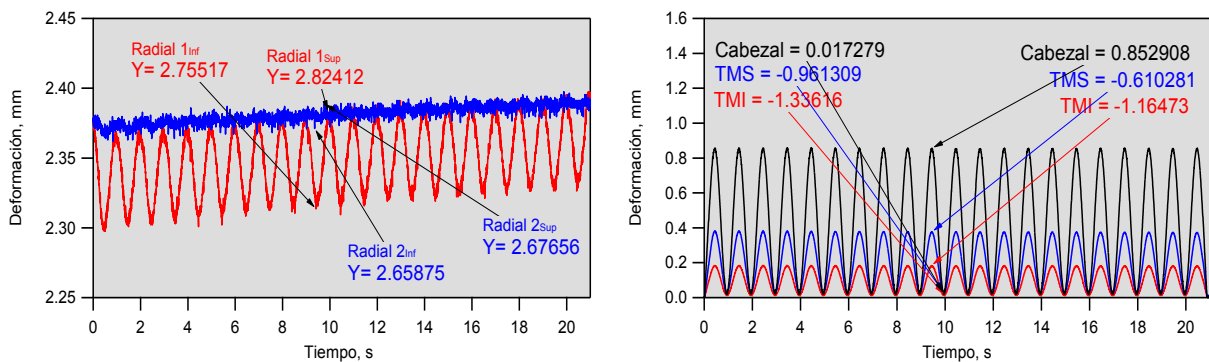


Figura A.30 Amplitud de 0.80 mm.

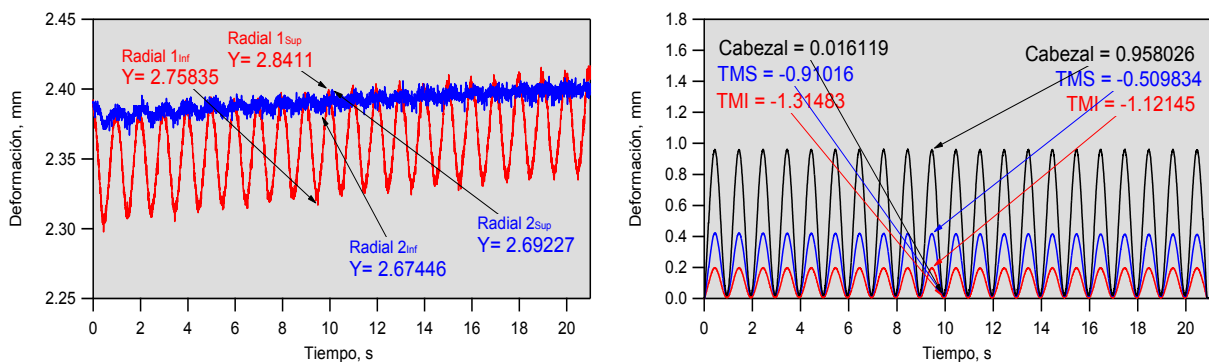


Figura A.31 Amplitud de 0.90 mm.

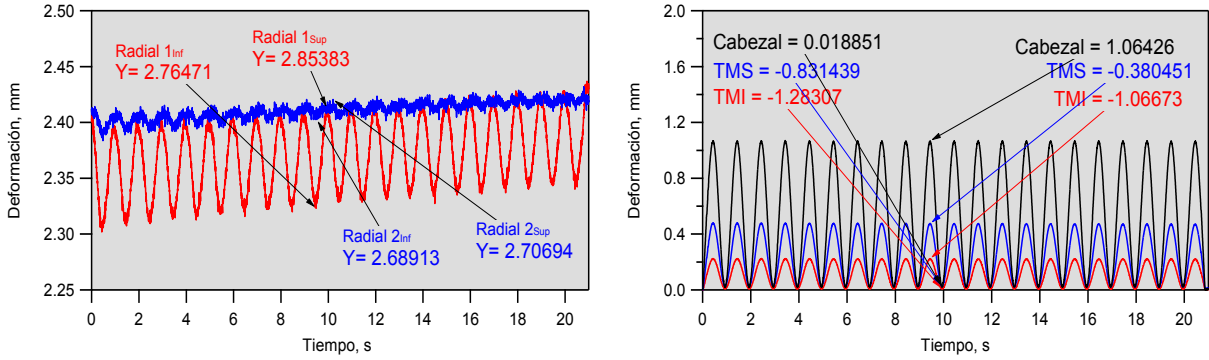


Figura A.32 Amplitud de 1.00 mm.

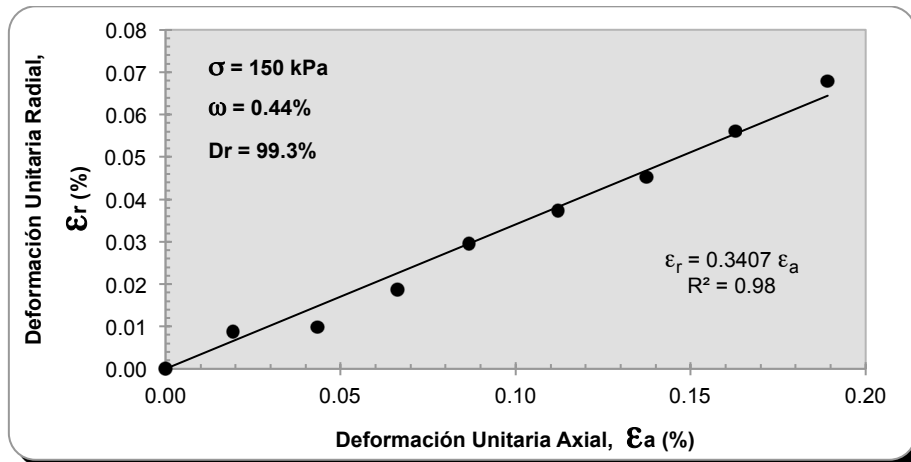


Figura A.33 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

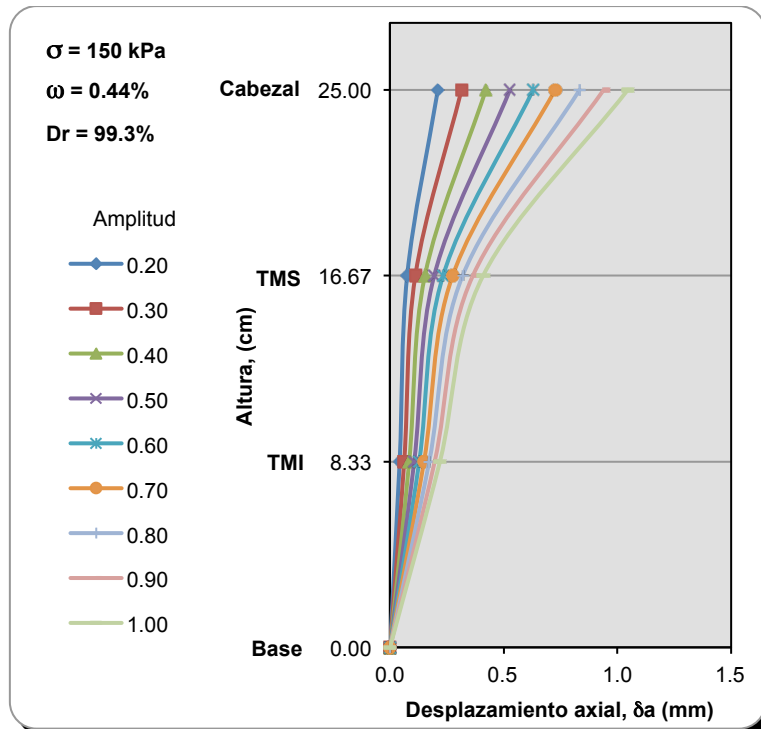


Figura A.34 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 1 (200 kPa)

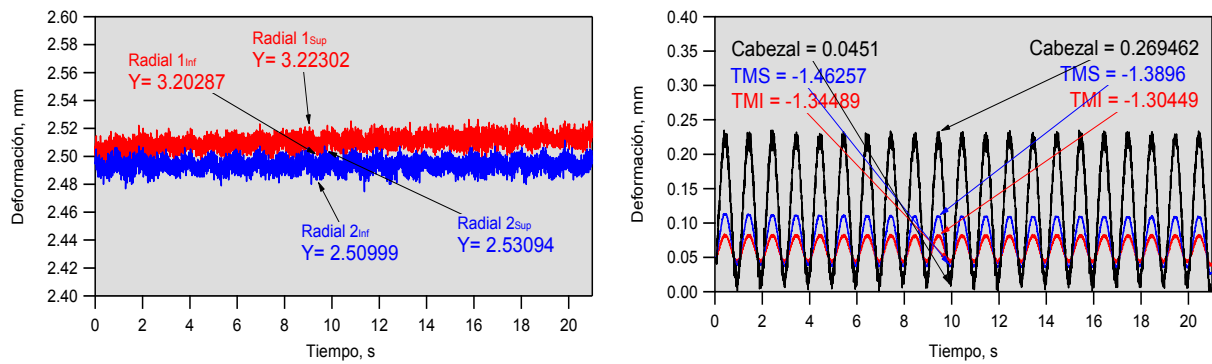


Figura A.35 Amplitud de 0.20 mm.

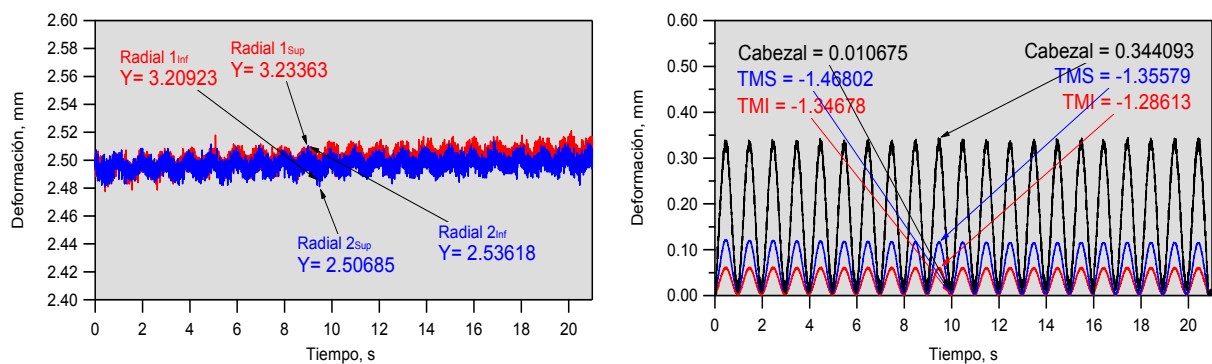


Figura A.36 Amplitud de 0.30 mm.

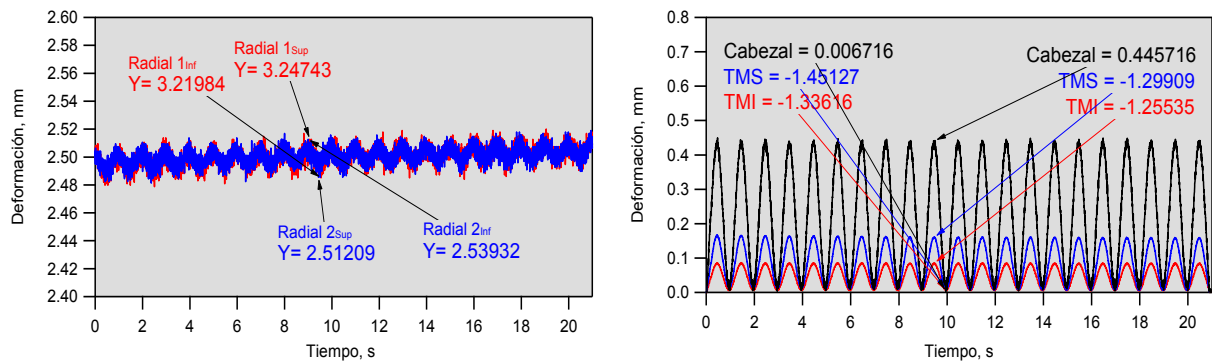


Figura A.37 Amplitud de 0.40 mm.

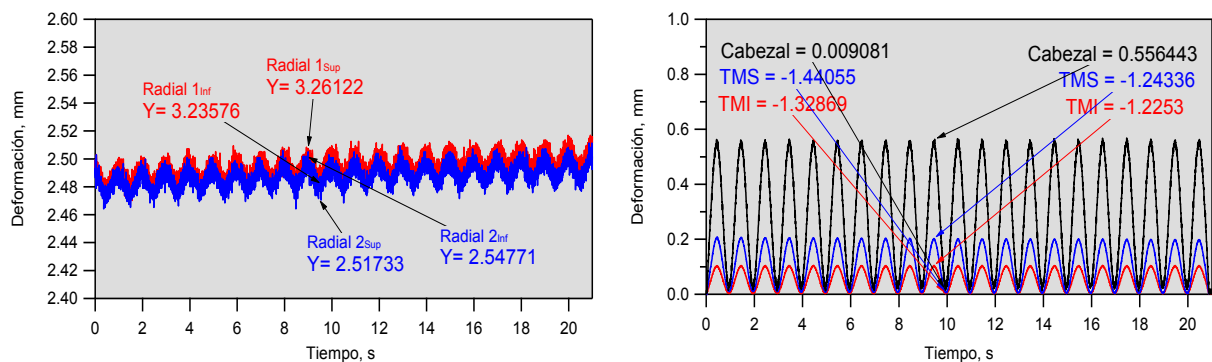


Figura A.38 Amplitud de 0.50 mm.

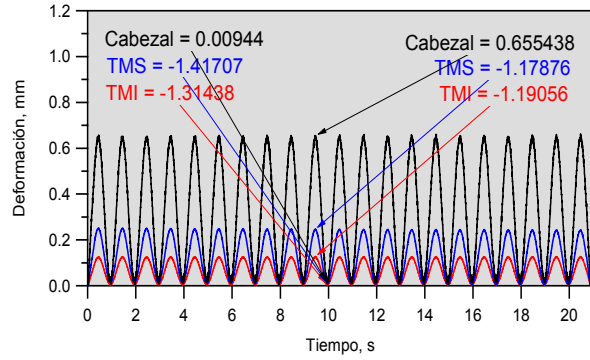
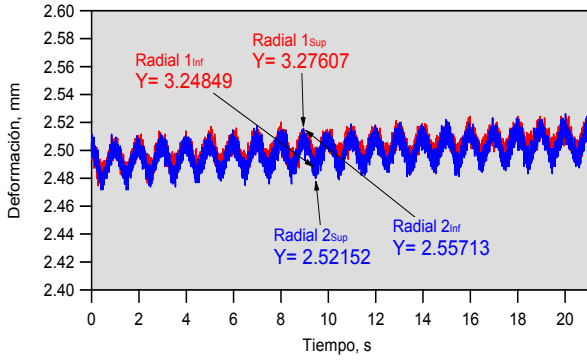


Figura A.39 Amplitud de 0.60 mm.

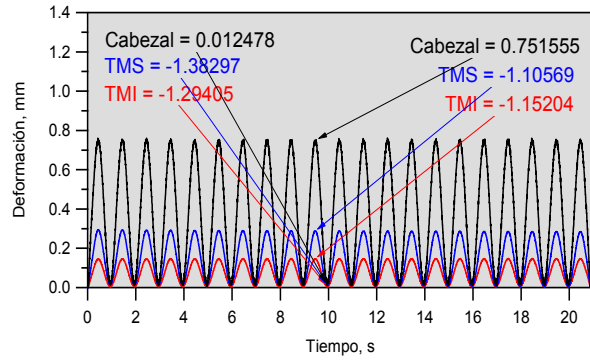
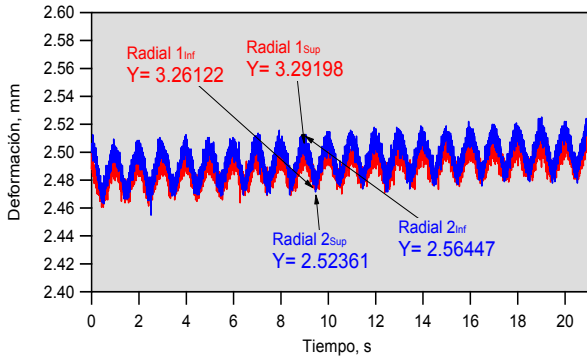


Figura A.40 Amplitud de 0.70 mm.

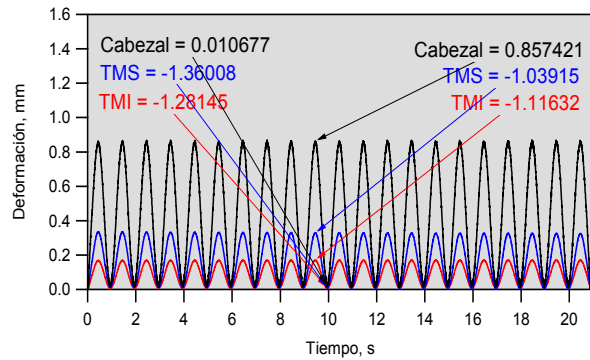
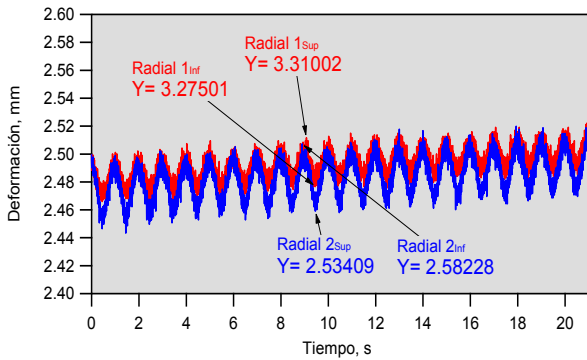


Figura A.41 Amplitud de 0.80 mm.

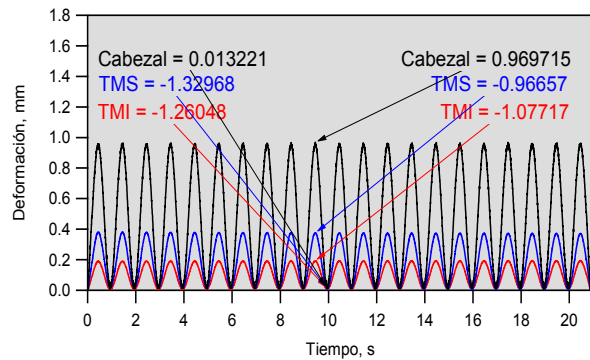
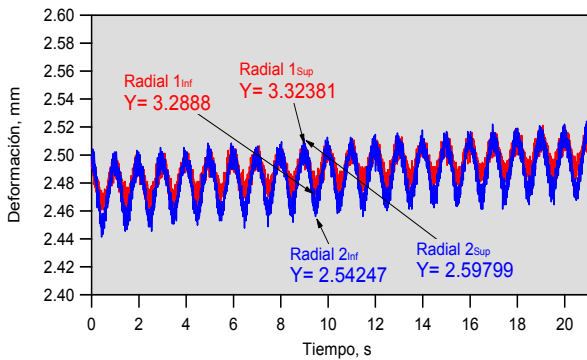


Figura A.42 Amplitud de 0.90 mm.

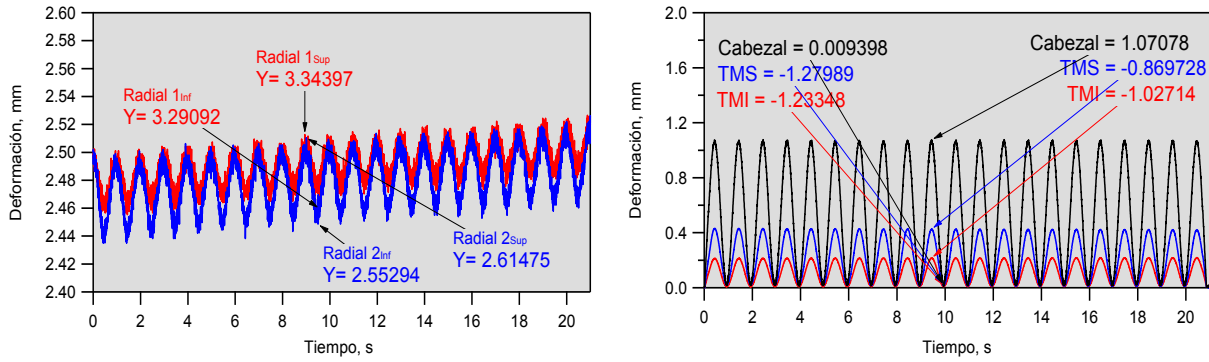


Figura A.43 Amplitud de 1.00 mm.

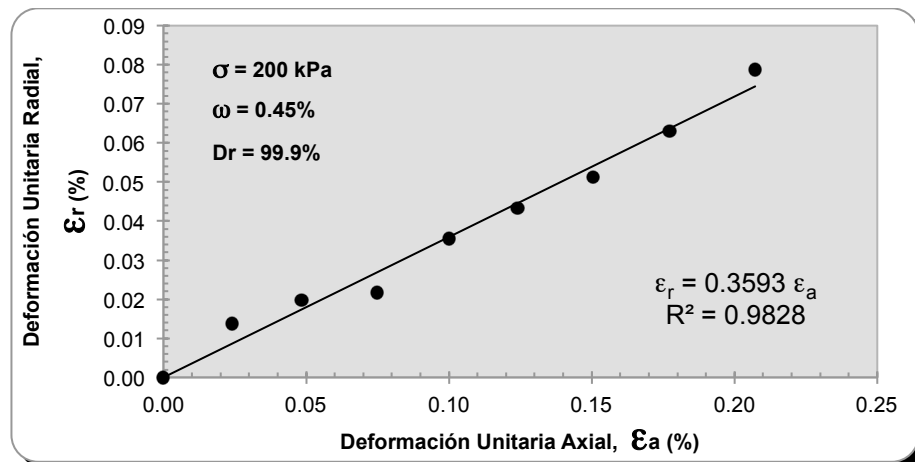


Figura A.44 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

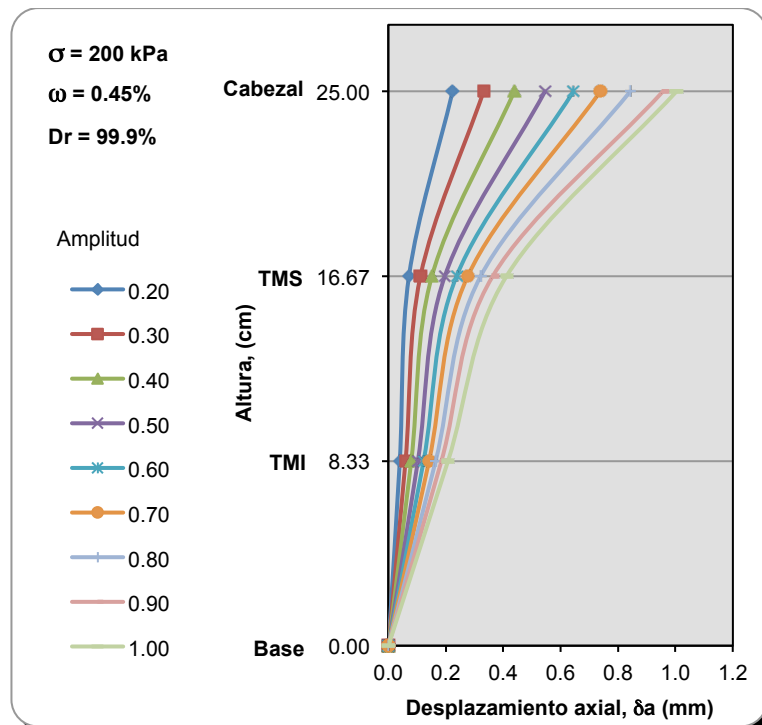


Figura A.45 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.



• Serie 1 (250 kPa)

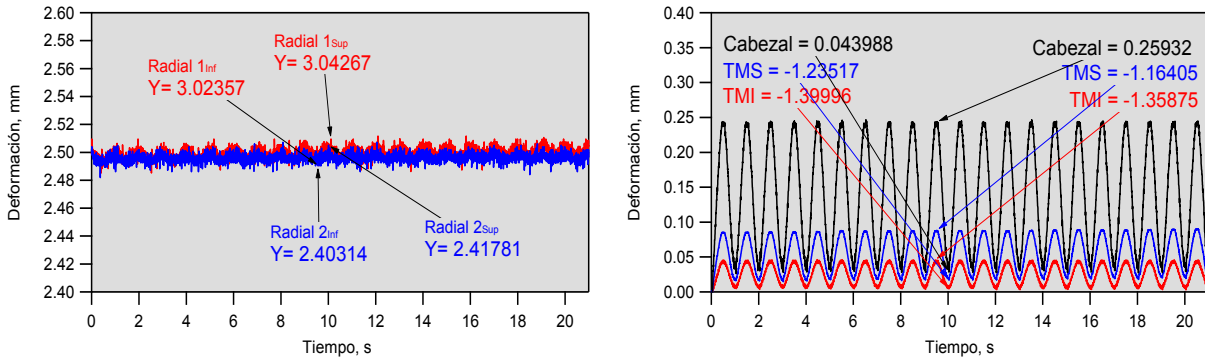


Figura A.46 Amplitud de 0.20 mm.

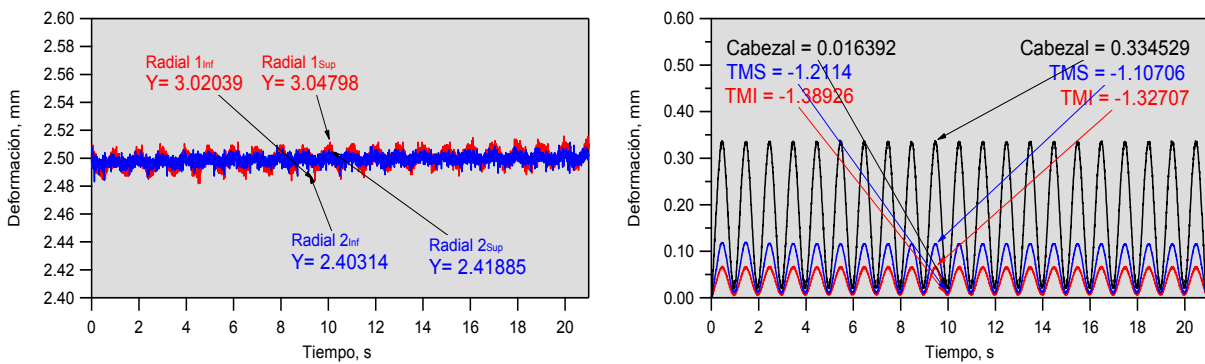


Figura A.47 Amplitud de 0.30 mm.

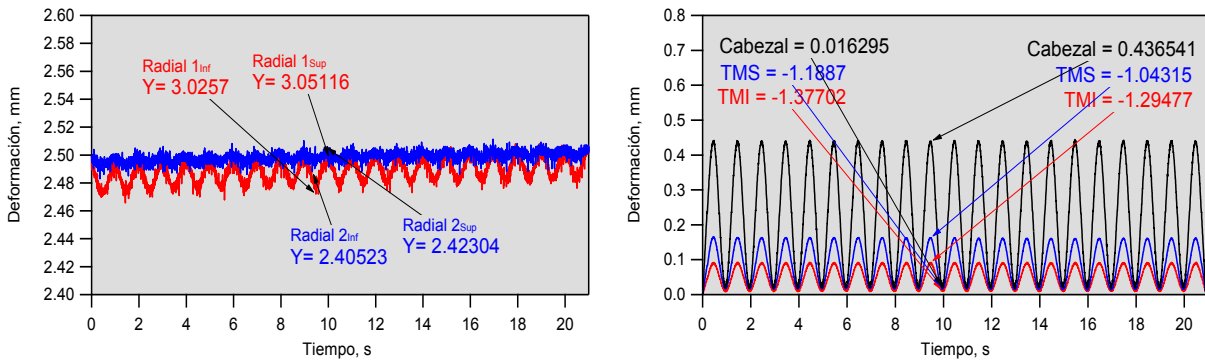


Figura A.48 Amplitud de 0.40 mm.

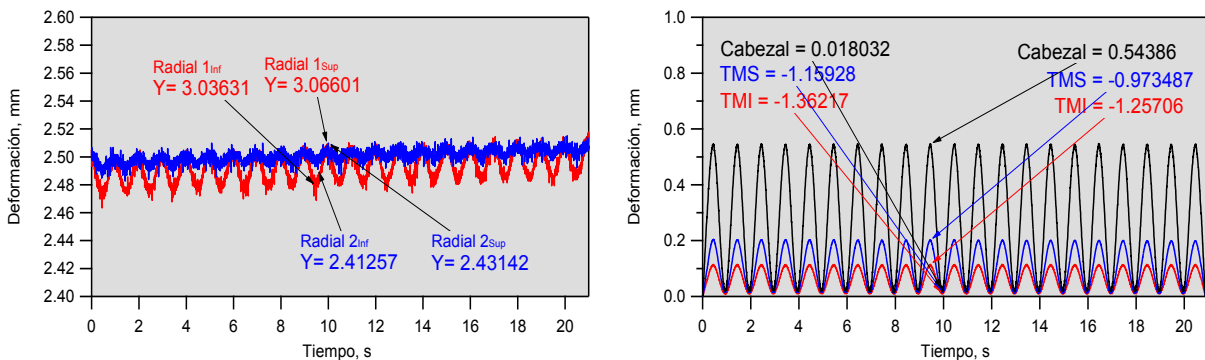


Figura A.49 Amplitud de 0.50 mm.

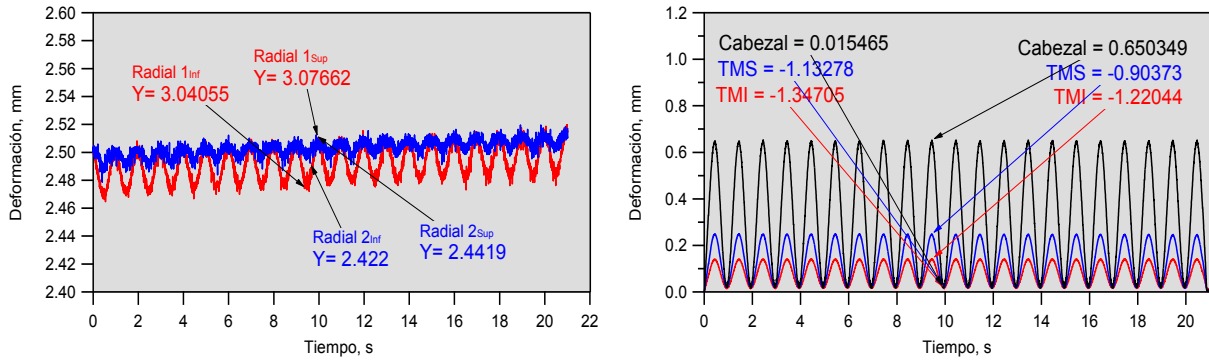


Figura A.50 Amplitud de 0.60 mm.

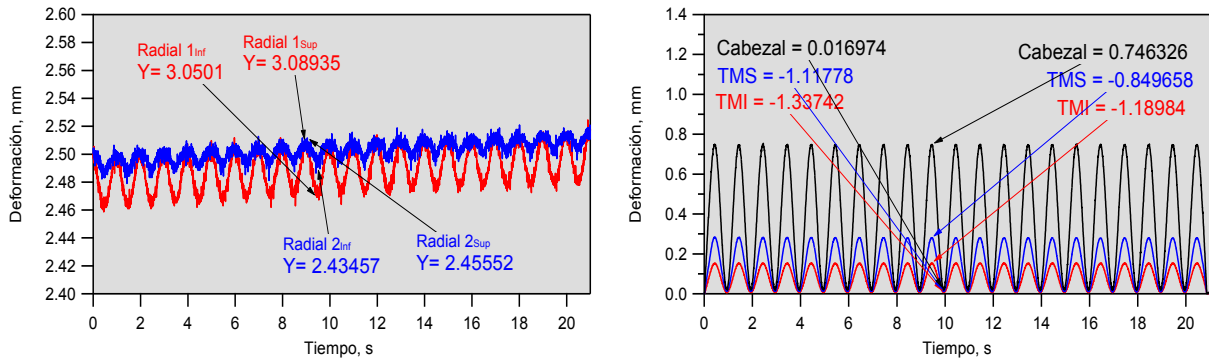


Figura A.51 Amplitud de 0.70 mm.

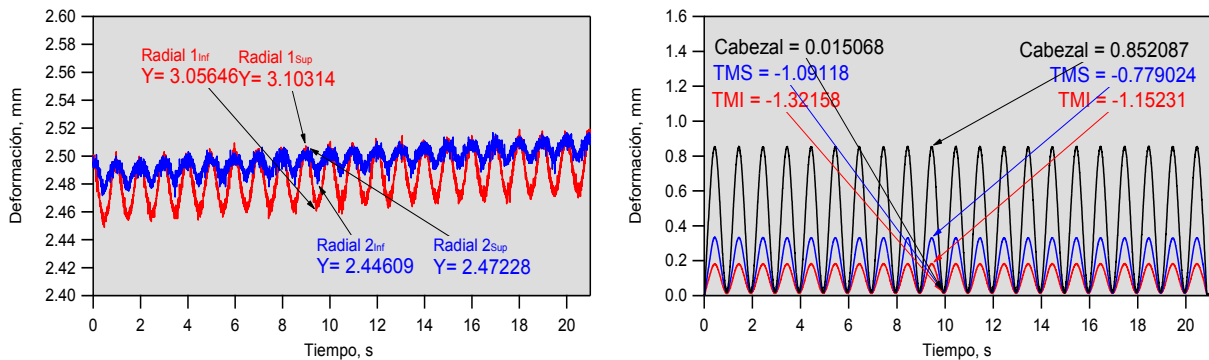


Figura A.52 Amplitud de 0.80 mm.

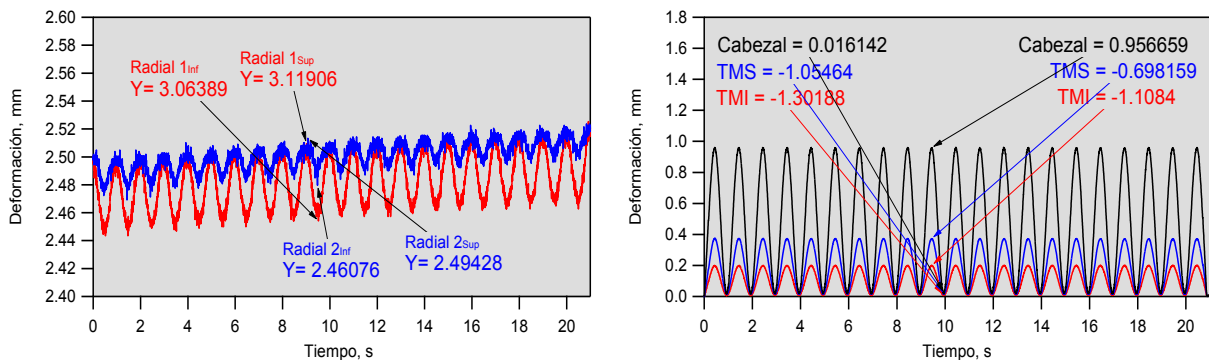


Figura A.53 Amplitud de 0.90 mm.

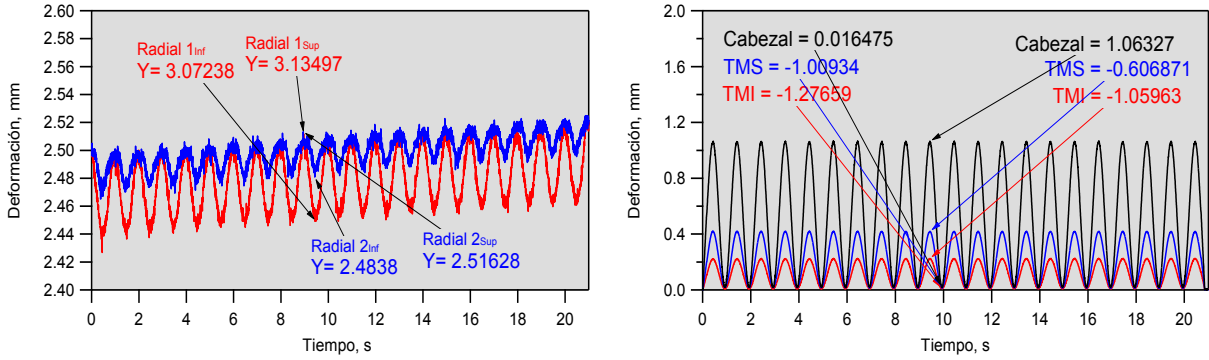


Figura A.54 Amplitud de 1.00 mm.

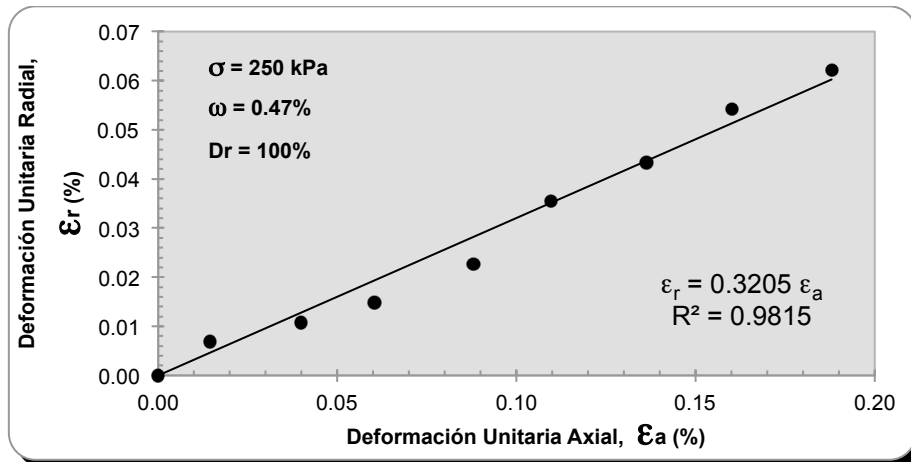


Figura A.55 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

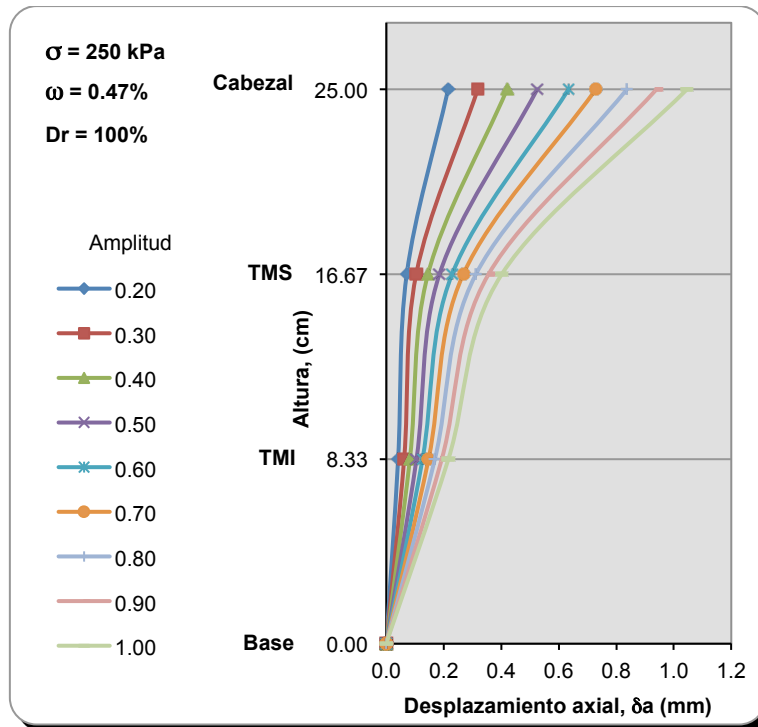
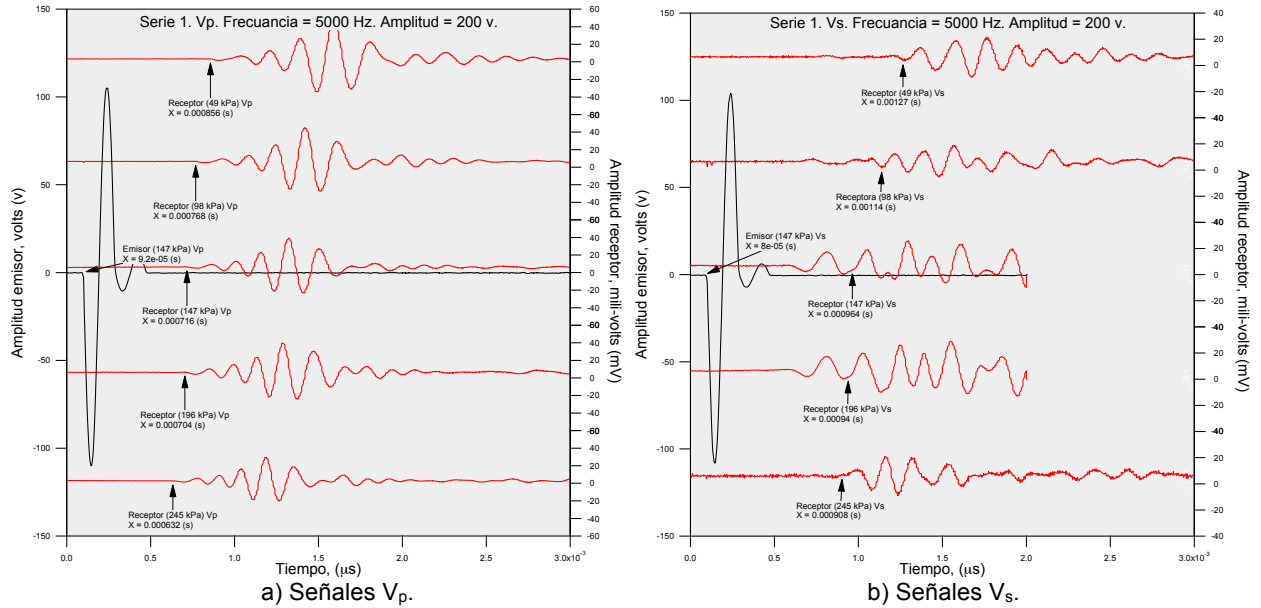
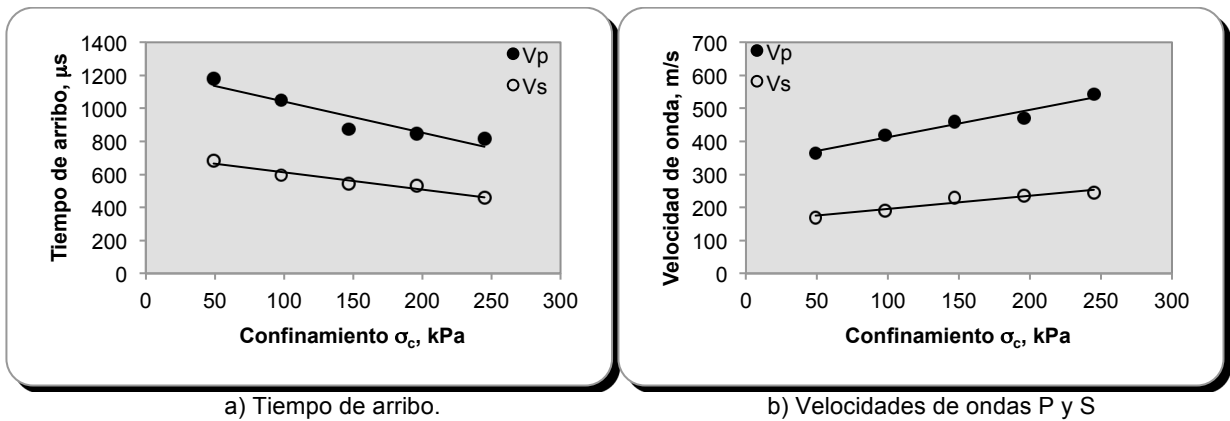


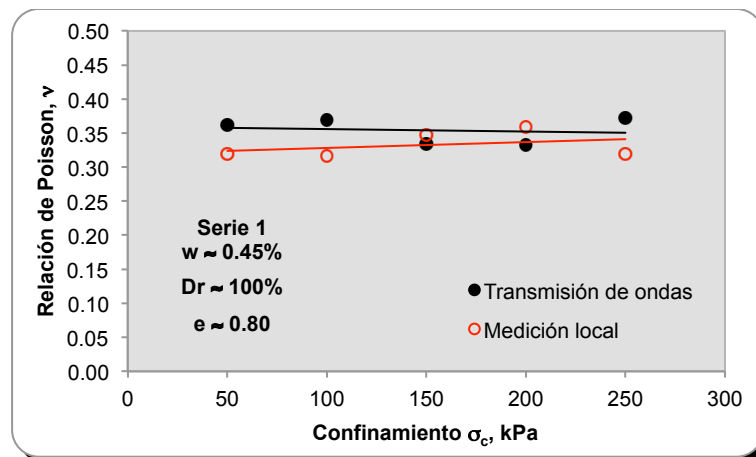
Figura A.56 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.



A.57 Análisis de arribo de señales Vp y Vs (serie 1)



A.58 Comportamiento del tiempo de arribo y velocidad de onda con respecto al esfuerzo de confinamiento.



A.59 Comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento.

Serie 2.  $\omega \approx 5.30$ ;  $Wp = 4kg$  ( $Dr \approx 66.5$ ;  $e \approx 1.064$ )

Tabla A-3 Resultados del contenido de agua obtenidos para la serie 2

Confinamiento kPa	$W_{pison}$ kg	Contenido de agua				
		N° cápsula	Tara g	$W_{mh+t}$ g	$W_{ms+t}$ g	w %
49	4.00	124	119.70	201.30	197.10	5.43
98	4.00	20	118.00	212.60	207.90	5.23
147	4.00	124	119.70	207.90	203.50	5.25
196	4.00	42	118.80	222.90	217.50	5.47
245	4.00	121	119.70	217.60	212.50	5.50

Tabla A-4 Resultados calculados (serie 2).

Etapa kPa	Radio mm	Volumen cm <sup>3</sup>	e	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	Dr (%)
molde	50.70	2018.86	1.082	1.263	64.3
050	50.63	2013.52	1.077	1.266	64.9
100	50.53	2005.14	1.067	1.272	66.1
150	50.49	2002.56	1.062	1.275	66.7
200	50.46	1999.55	1.054	1.281	67.8
250	50.29	1986.45	1.043	1.287	69.1

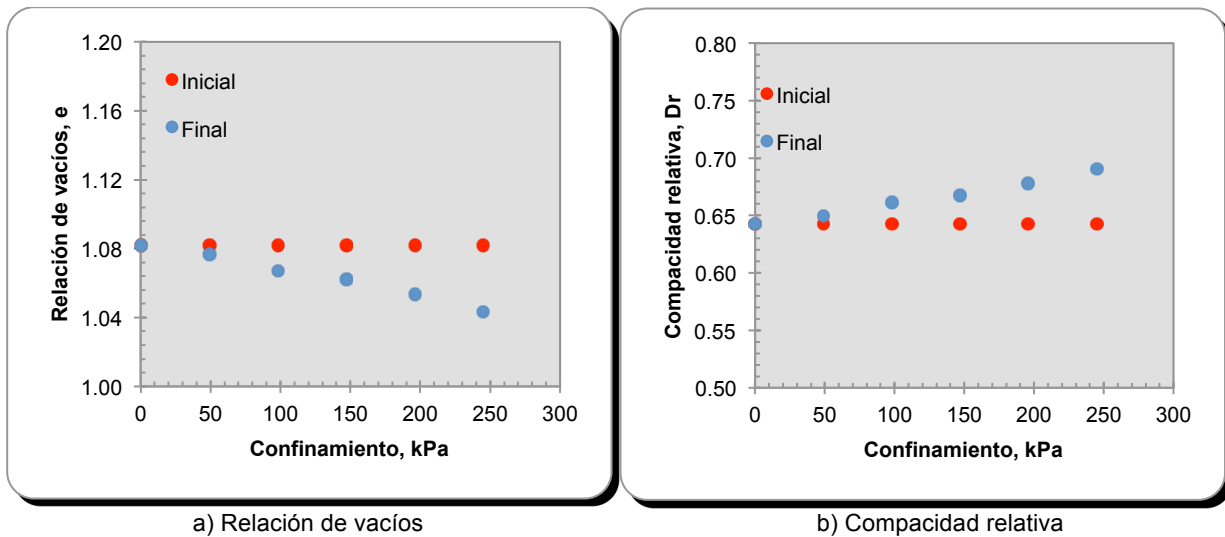


Figura A.60 Variación de la relación de vacíos y compacidad relativa, respecto al esfuerzo de confinamiento (serie 2).

• Serie 2 (0.5kPa)

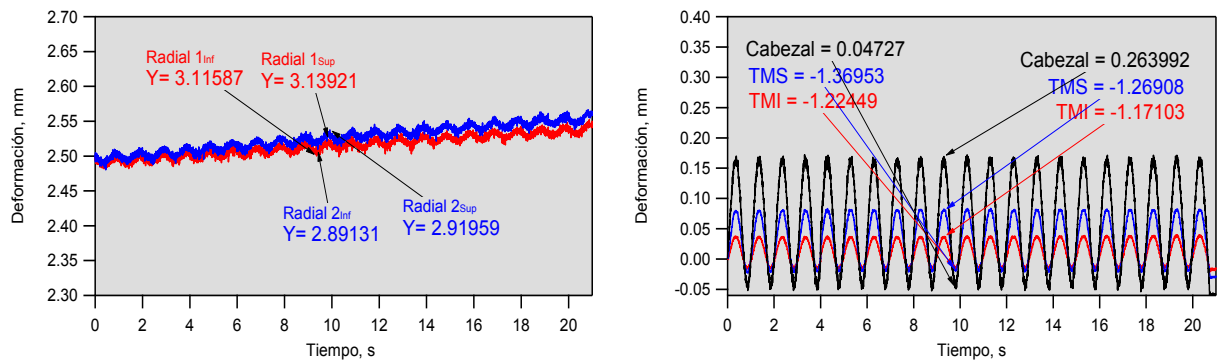


Figura A.61 Amplitud de 0.20 mm.

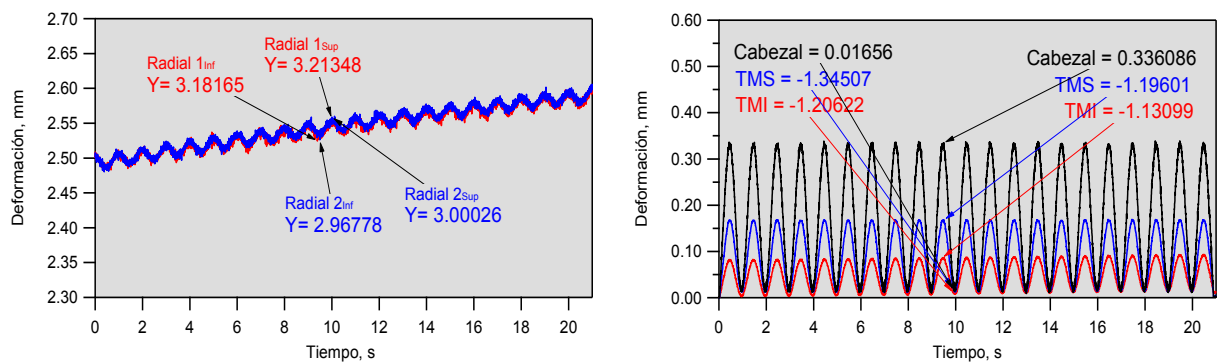


Figura A.62 Amplitud de 0.30 mm.

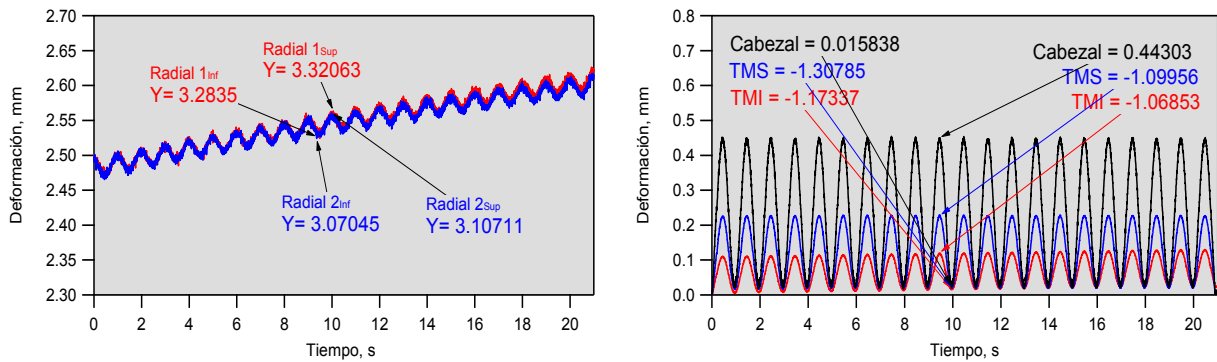


Figura A.63 Amplitud de 0.40 mm.

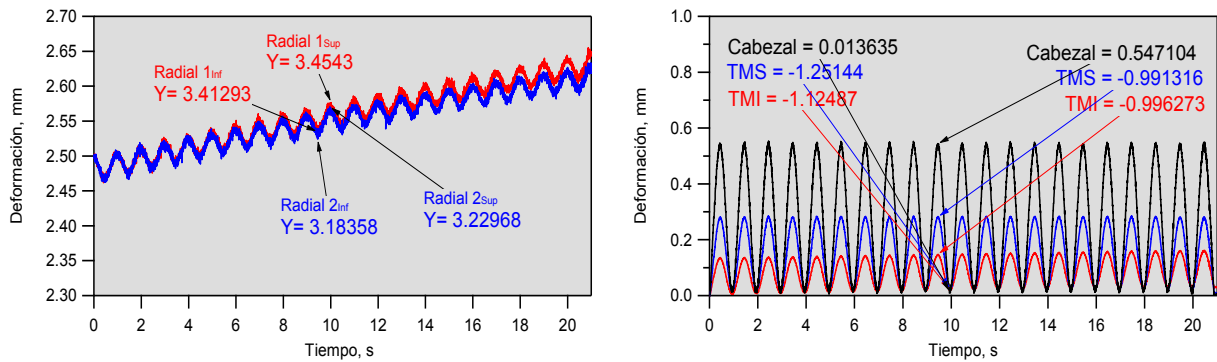


Figura A.64 Amplitud de 0.50 mm.

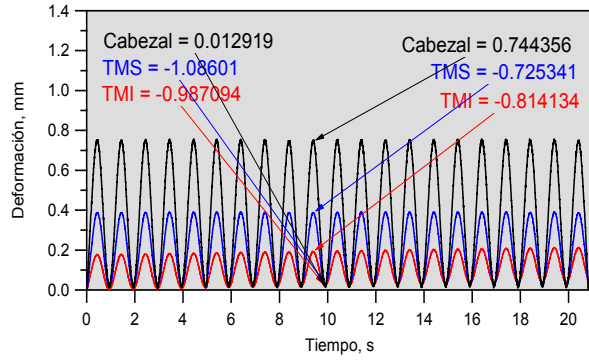
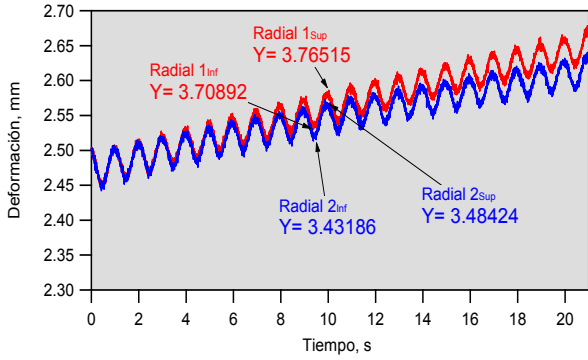


Figura A.65 Amplitud de 0.60 mm.

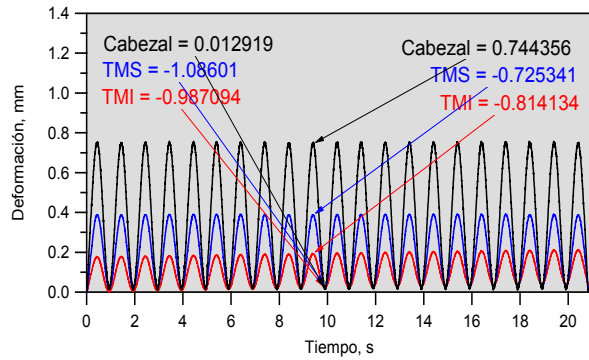
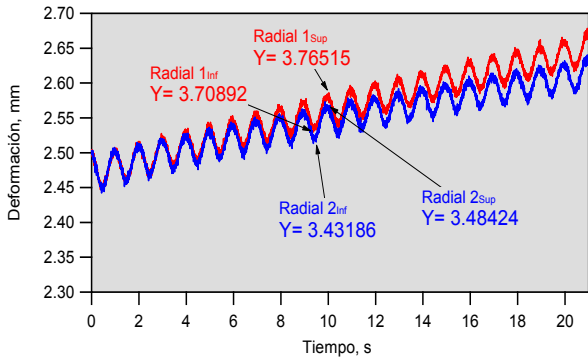


Figura A.66 Amplitud de 0.70 mm.

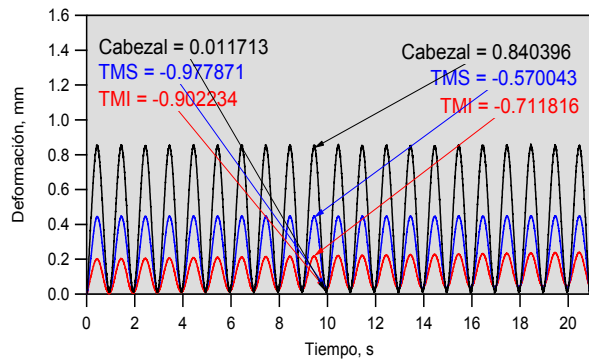
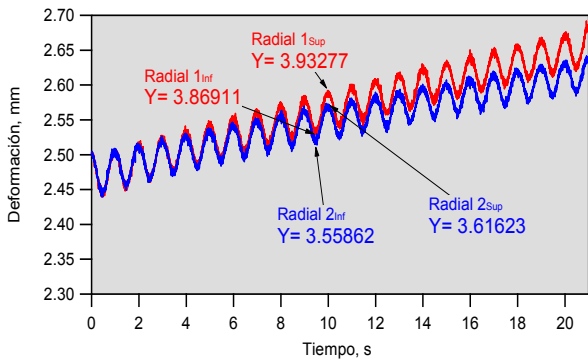


Figura A.67 Amplitud de 0.80 mm.

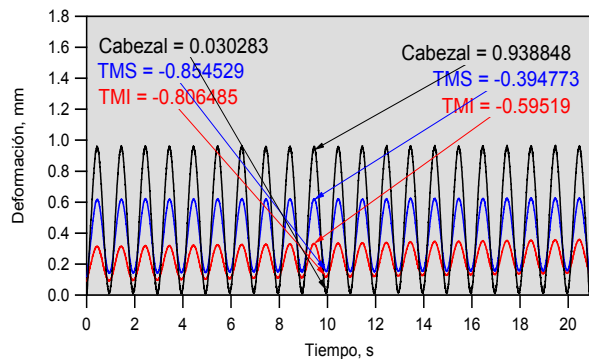
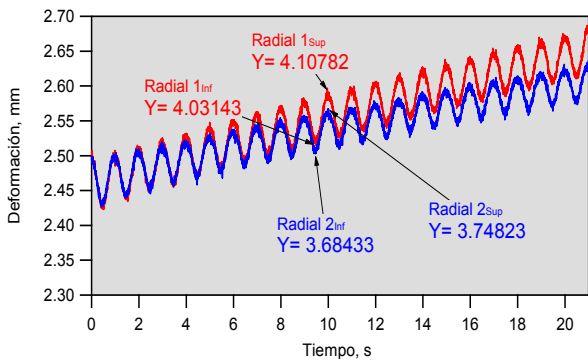


Figura A.68 Amplitud de 0.90 mm.

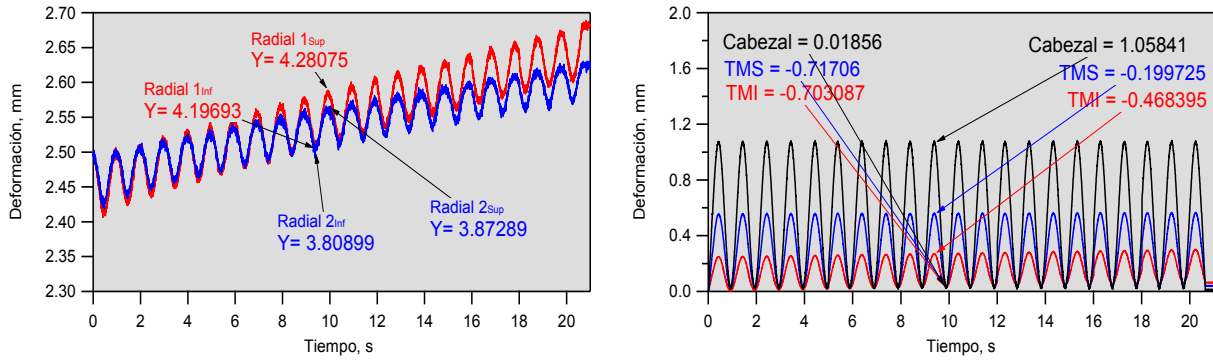


Figura A.69 Amplitud de 1.00 mm.

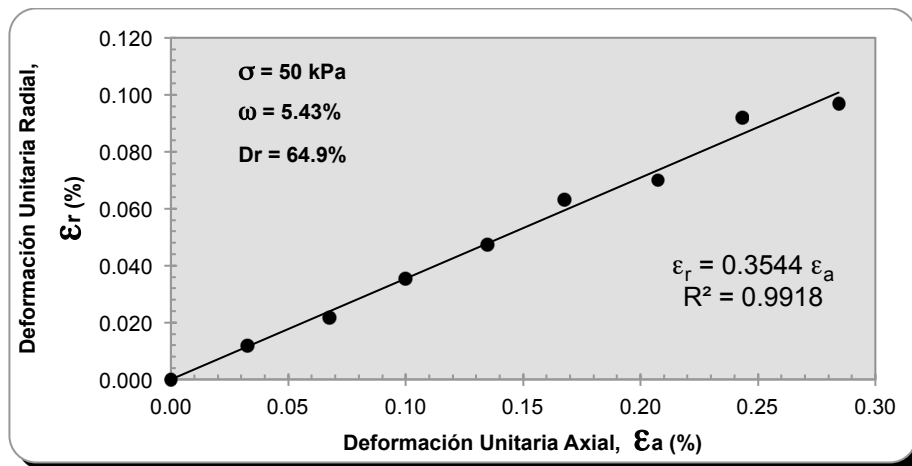


Figura A.70 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

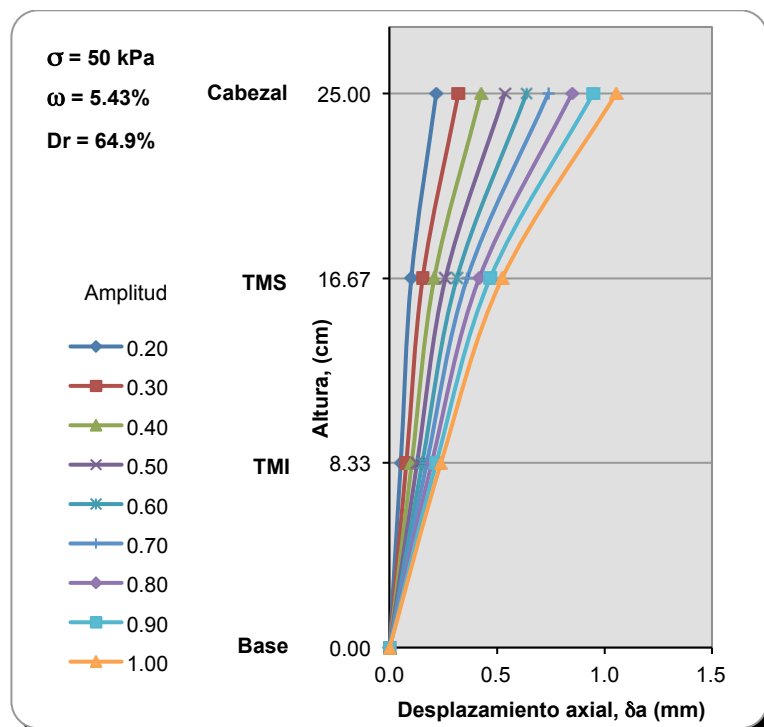


Figura A.71 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.



• Serie 2 (100 kPa)

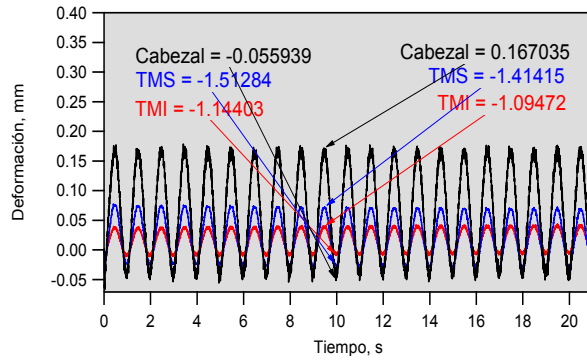
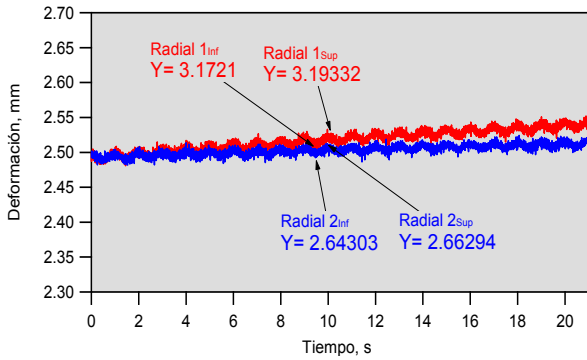


Figura A.72 Amplitud de 0.20 mm.

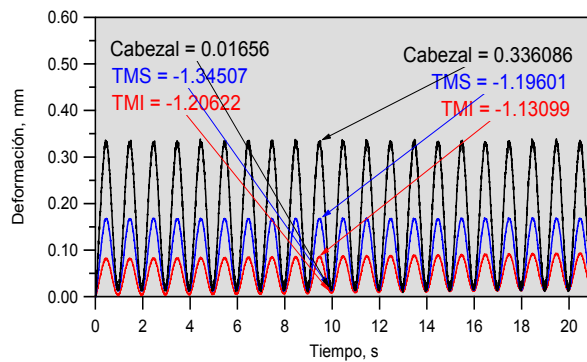
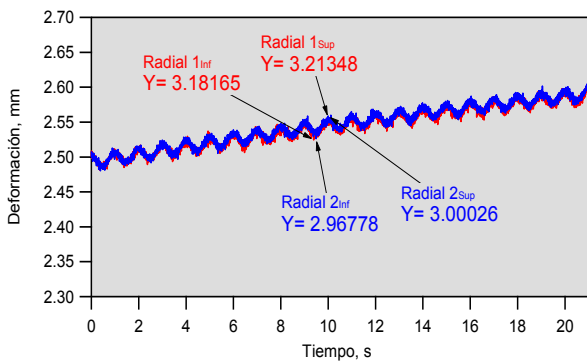


Figura A.73 Amplitud de 0.30 mm.

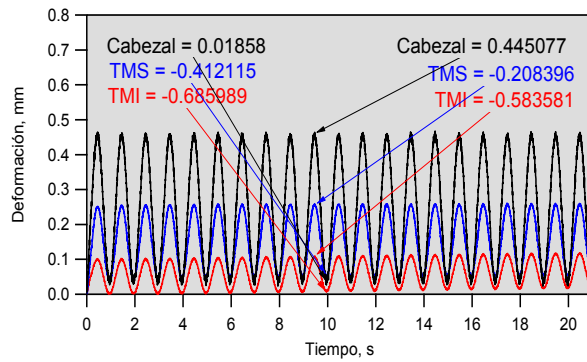
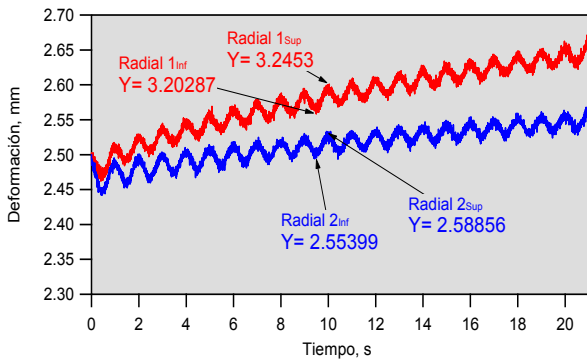


Figura A.74 Amplitud de 0.40 mm.

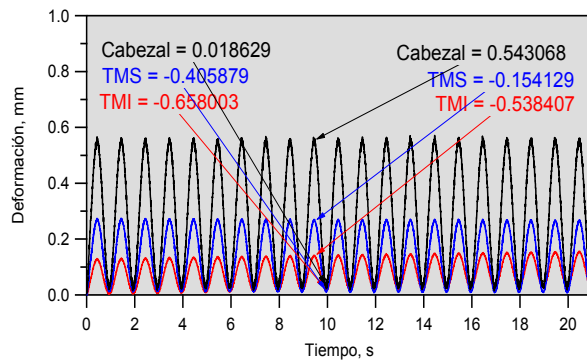
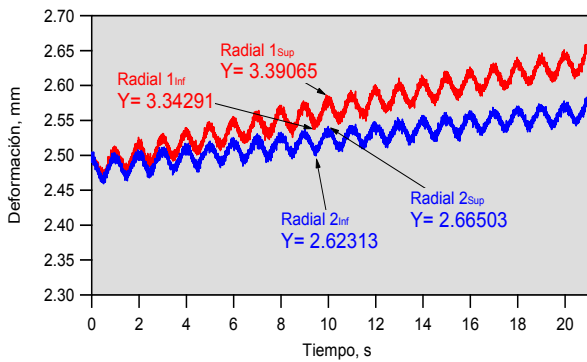


Figura A.75 Amplitud de 0.50 mm.

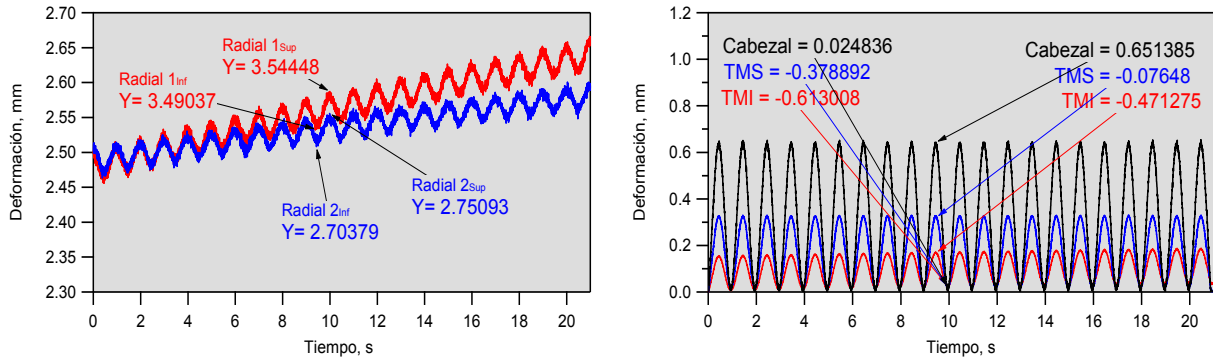


Figura A.76 Amplitud de 0.60 mm.

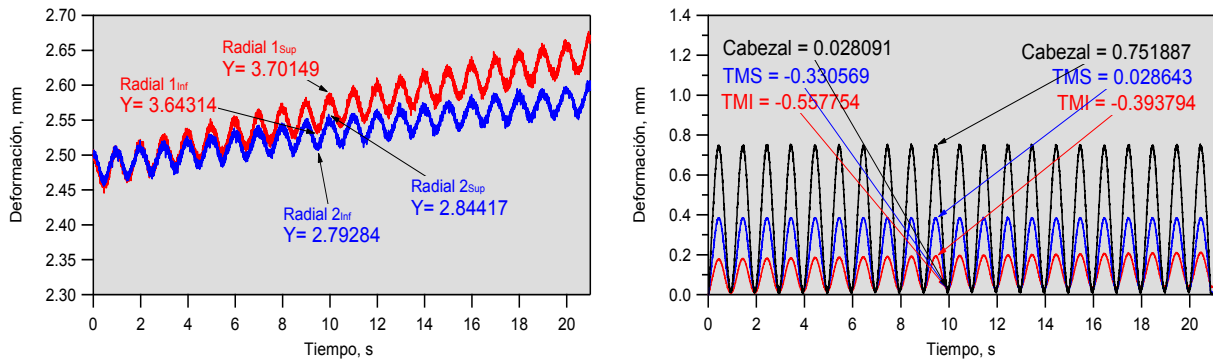


Figura A.77 Amplitud de 0.70 mm.

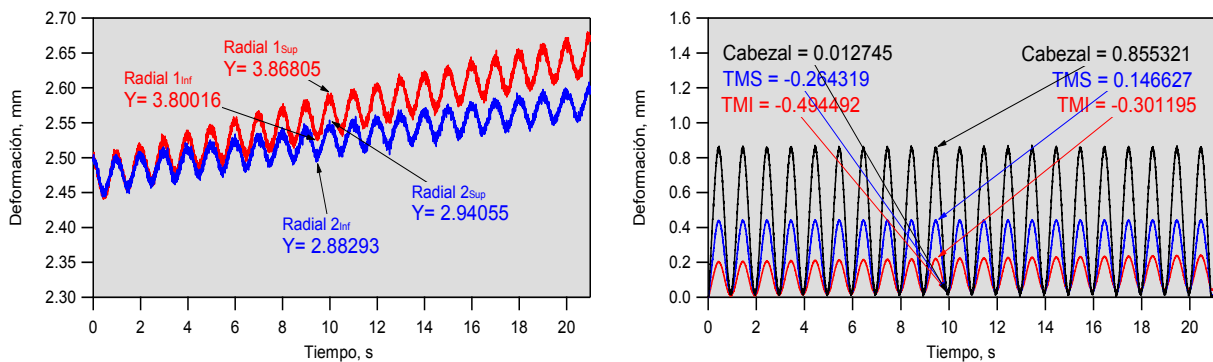


Figura A.78 Amplitud de 0.80 mm.

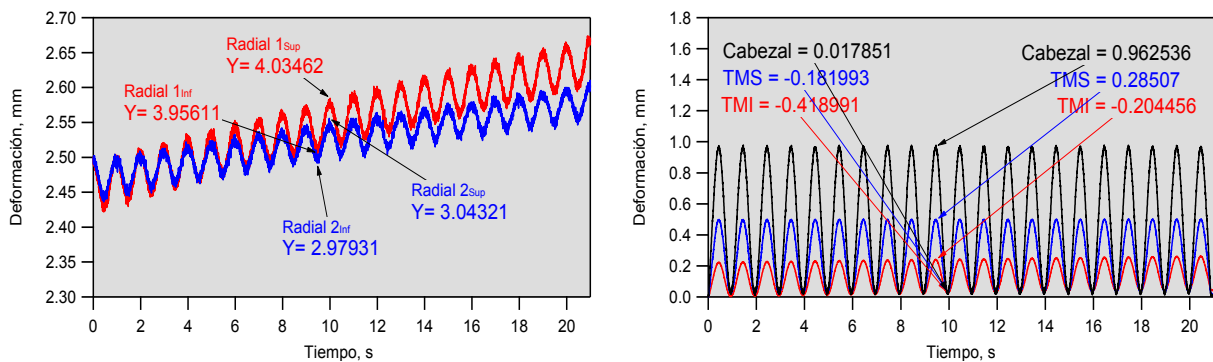


Figura A.79 Amplitud de 0.90 mm.

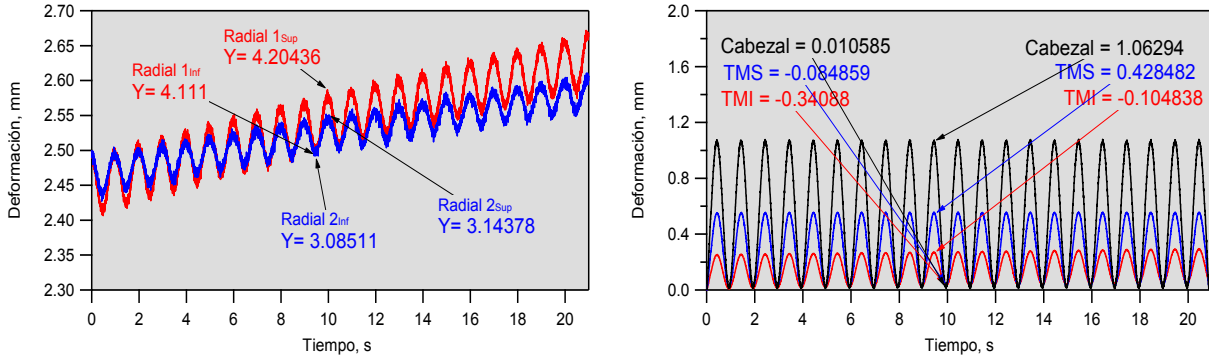


Figura A.80 Amplitud de 1.00 mm.

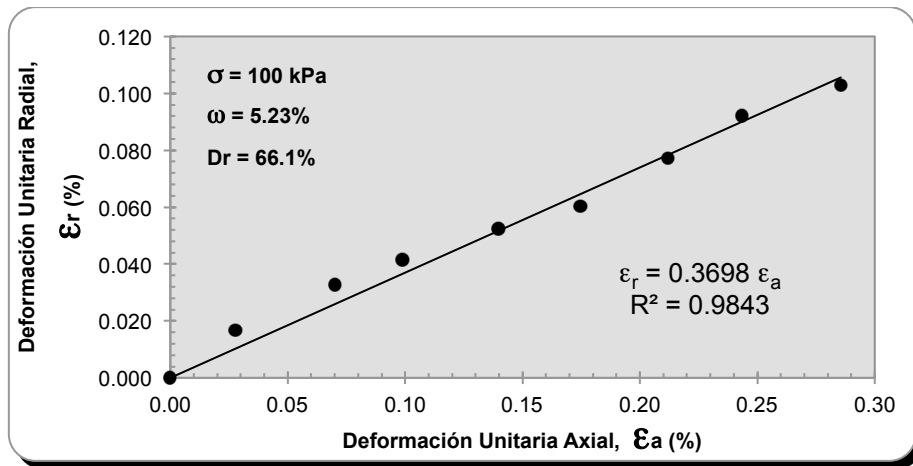


Figura A.81 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

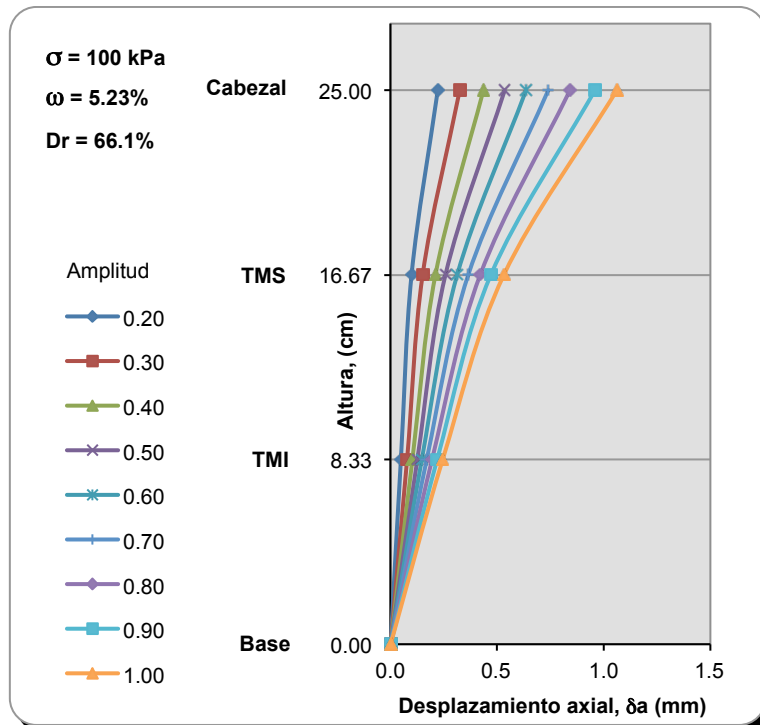


Figura A.82 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 2 (150 kPa)

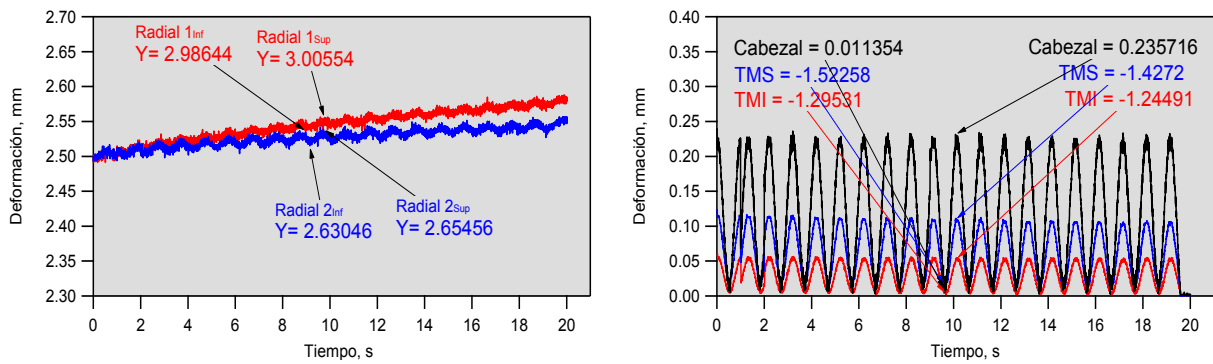


Figura A.83 Amplitud de 0.20 mm.

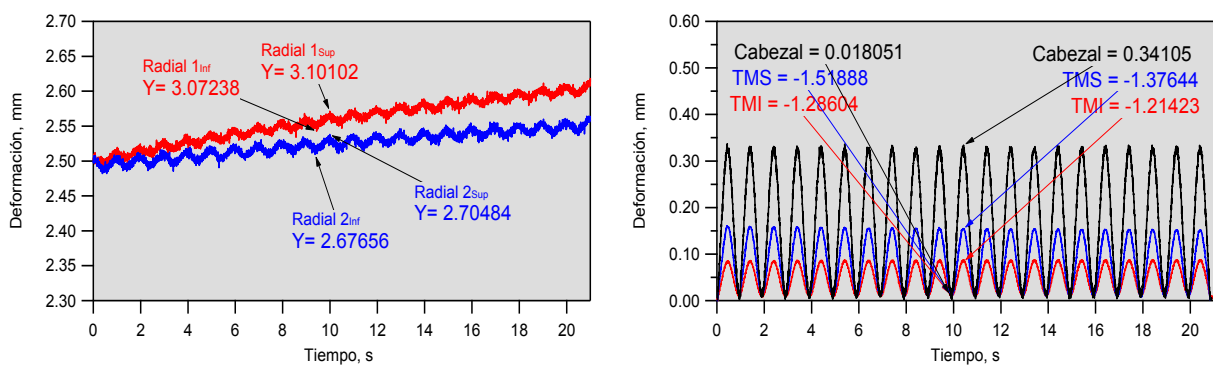


Figura A.84 Amplitud de 0.30 mm.

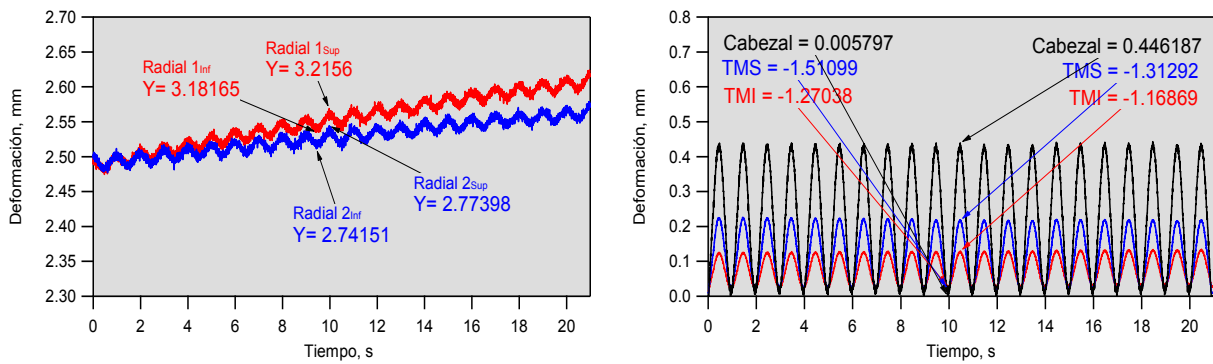


Figura A.85 Amplitud de 0.40 mm.

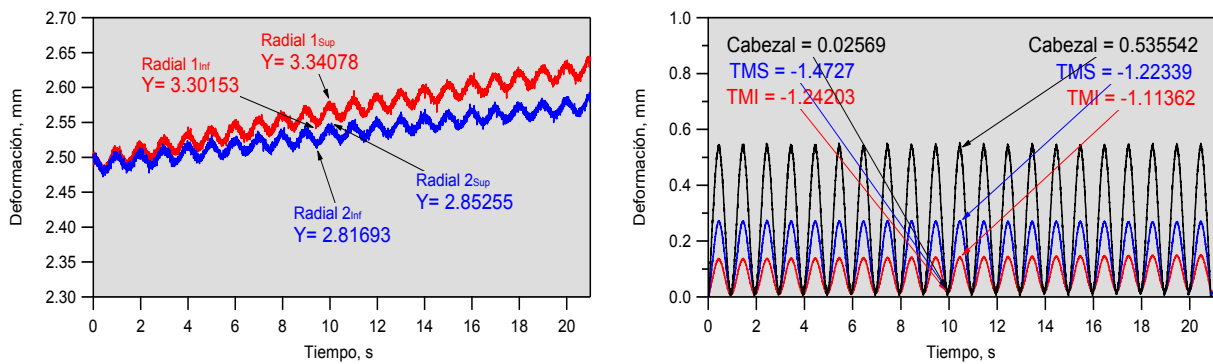


Figura A.86 Amplitud de 0.50 mm.

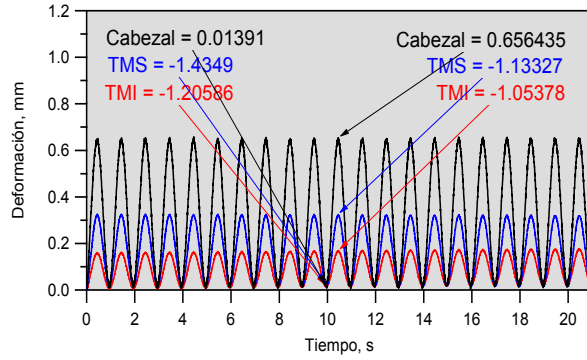
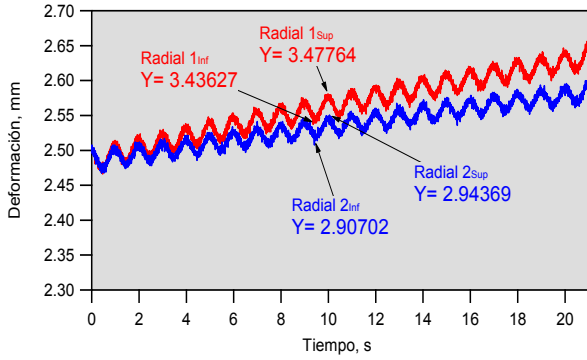


Figura A.87 Amplitud de 0.60 mm.

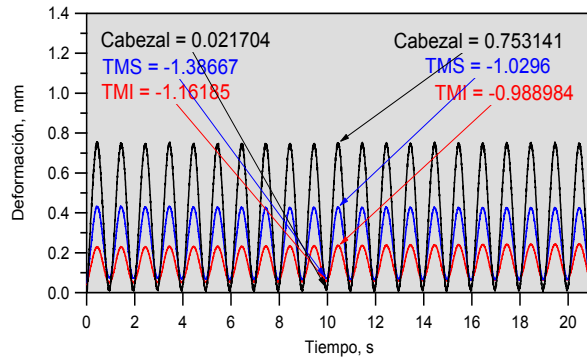
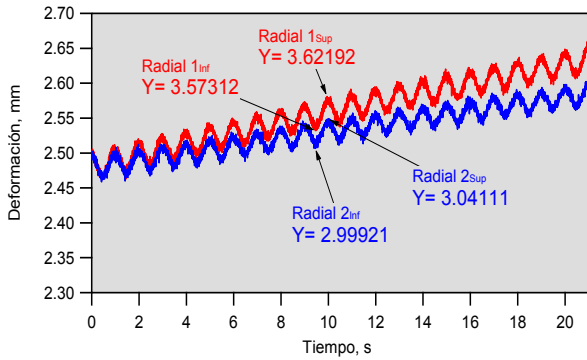


Figura A.88 Amplitud de 0.70 mm.

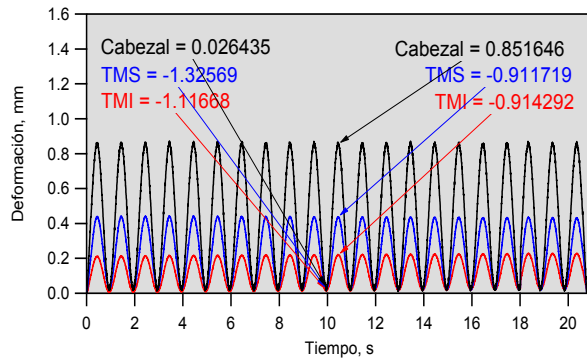
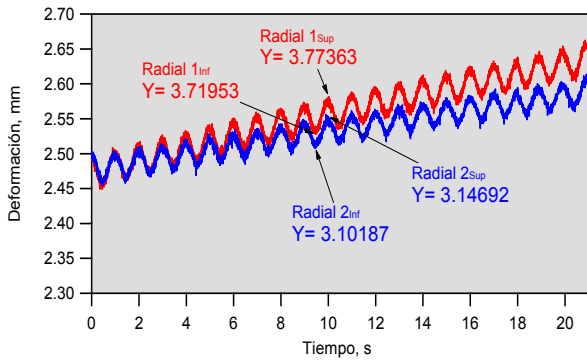


Figura A.89 Amplitud de 0.80 mm.

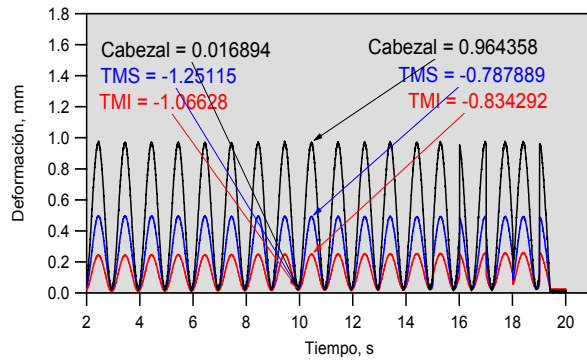
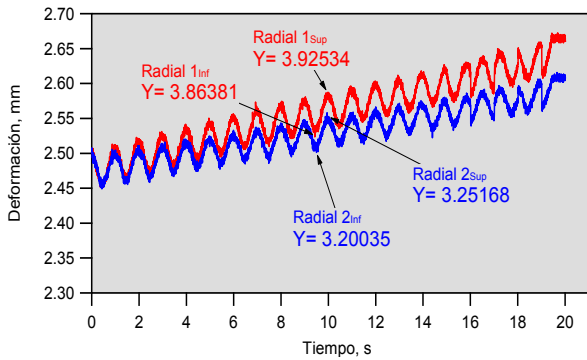


Figura A.90 Amplitud de 0.90 mm.

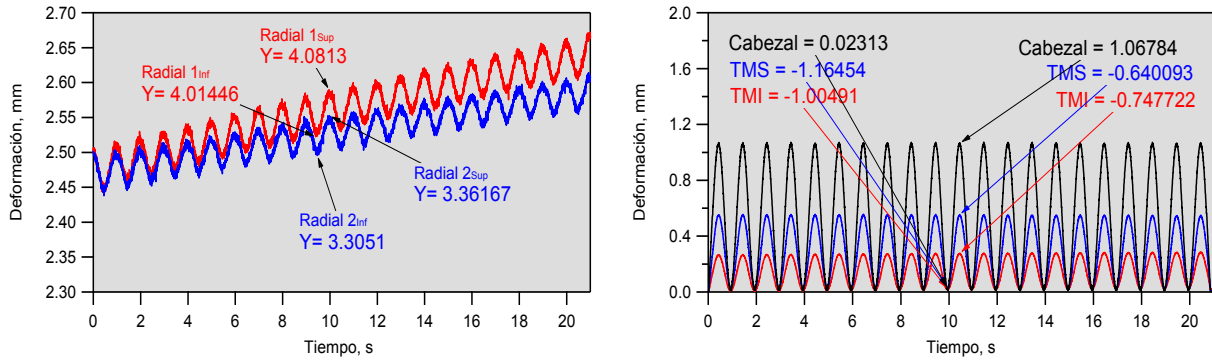


Figura A.91 Amplitud de 1.00 mm.

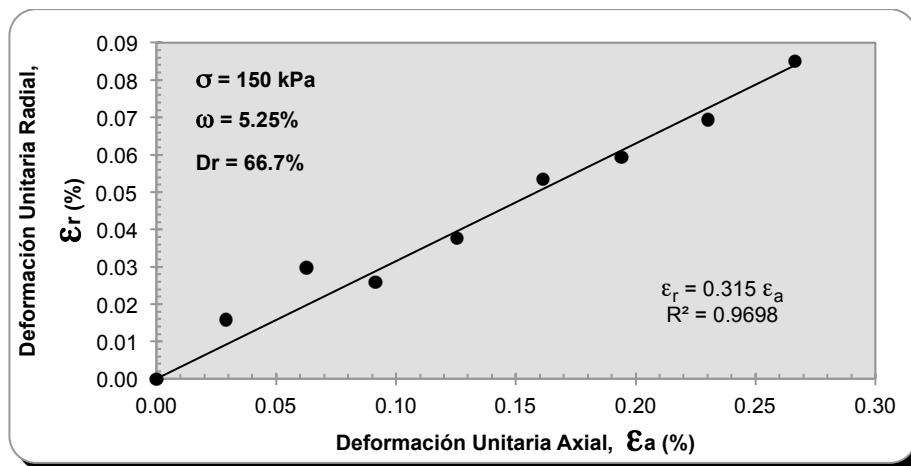


Figura A.92 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

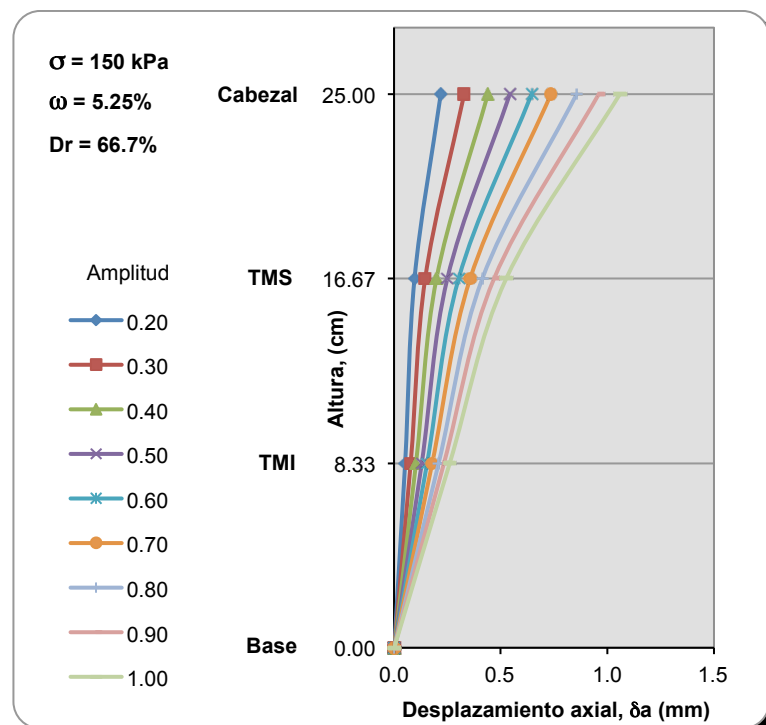


Figura A.93 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 2 (200 kPa)

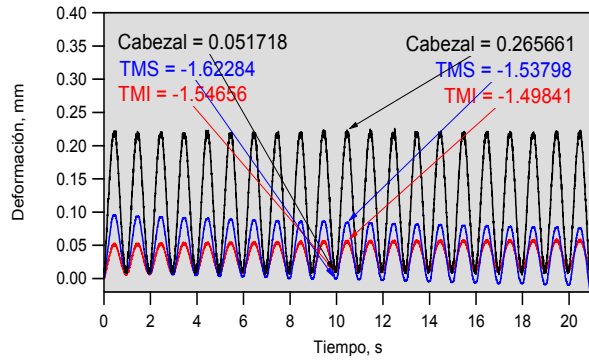
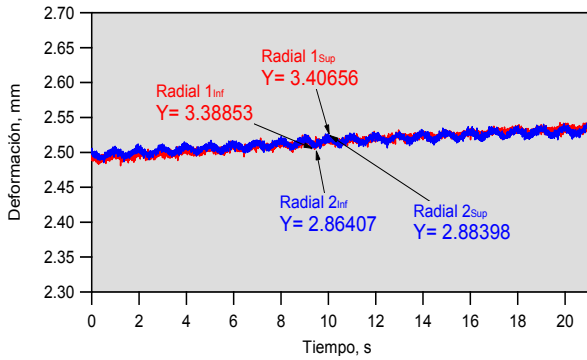


Figura A.94 Amplitud de 0.20 mm.

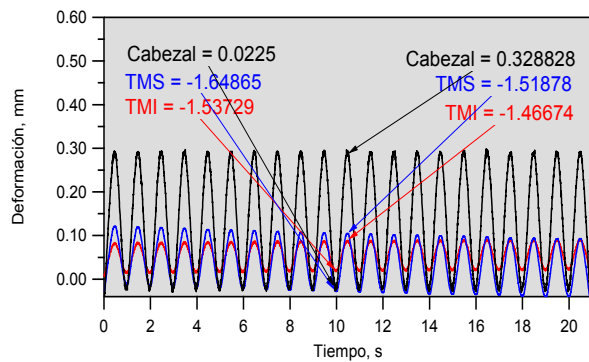
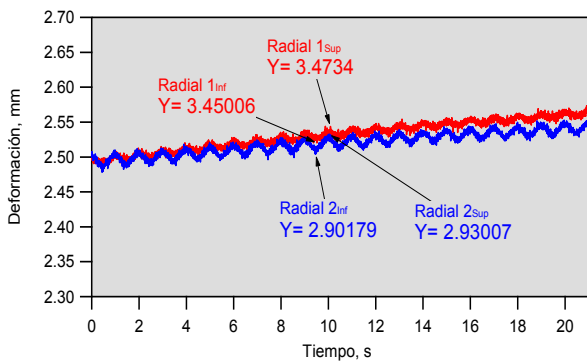


Figura A.95 Amplitud de 0.30 mm.

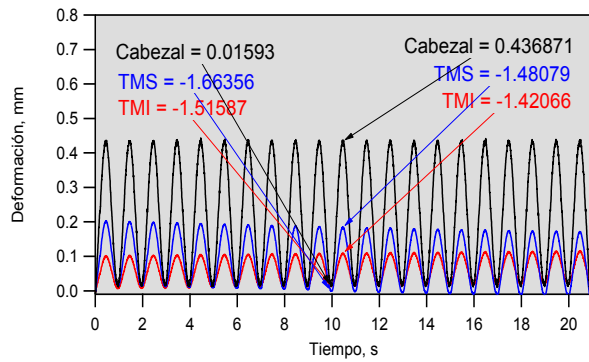
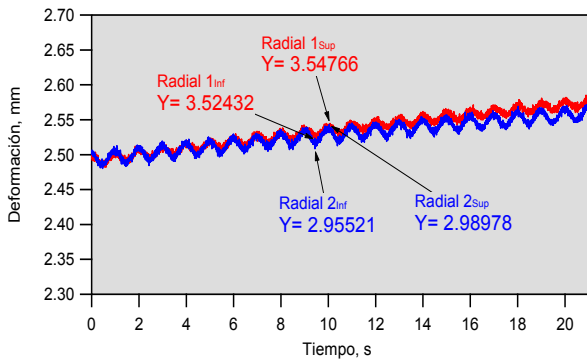


Figura A.96 Amplitud de 0.40 mm.

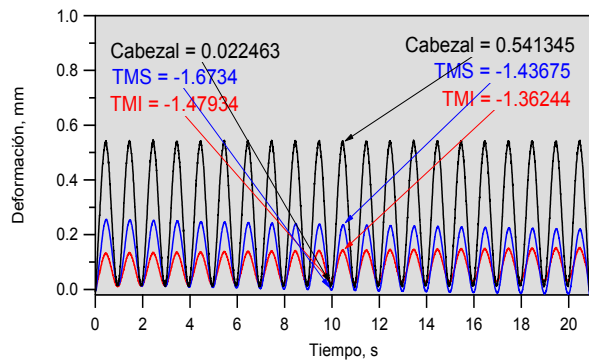
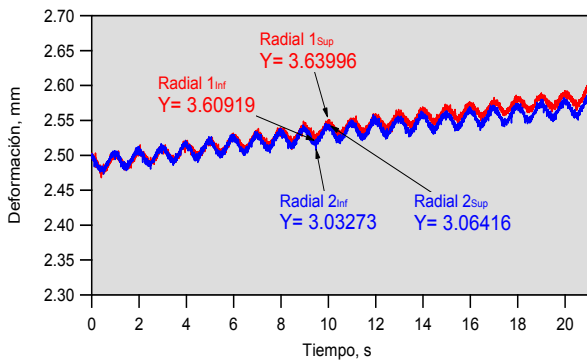


Figura A.97 Amplitud de 0.50 mm.

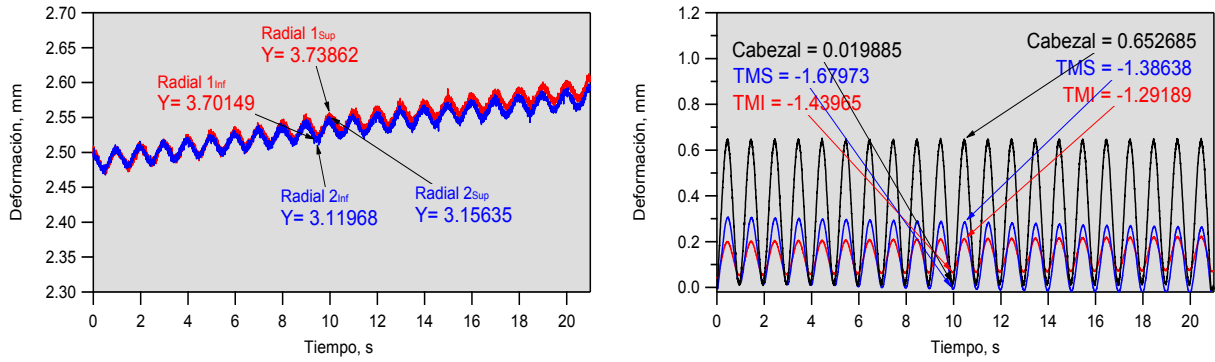


Figura A.98 Amplitud de 0.60 mm.

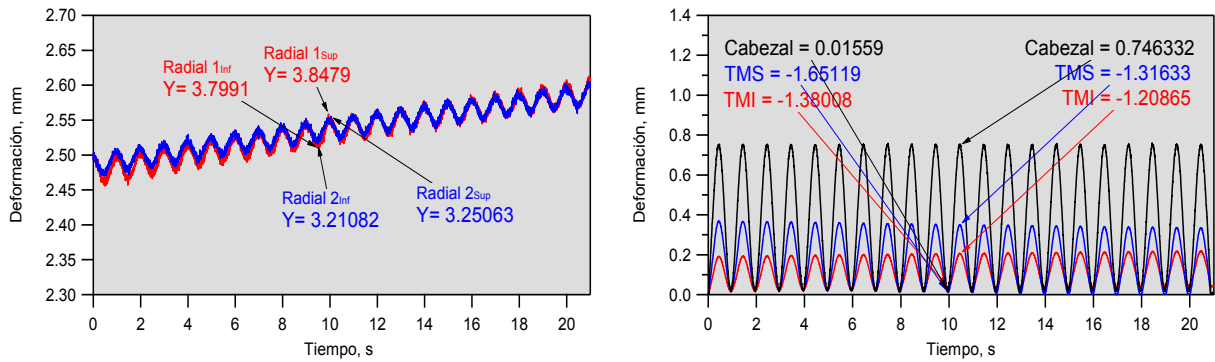


Figura A.99 Amplitud de 0.70 mm.

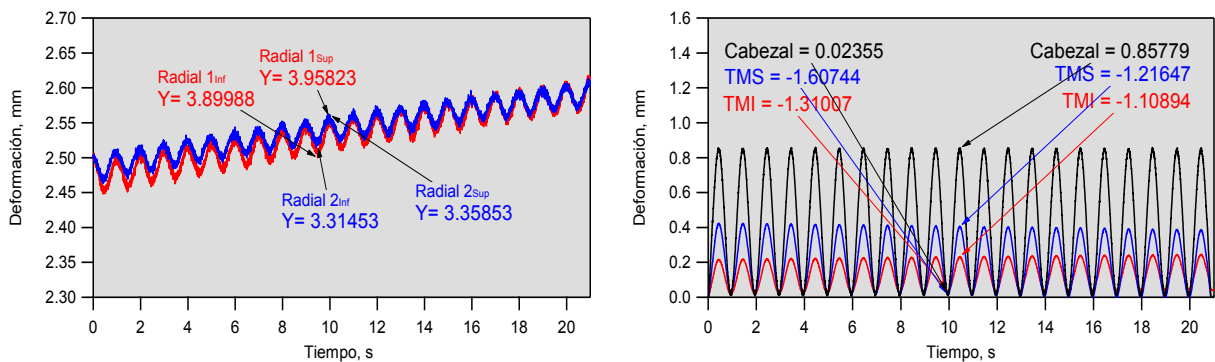


Figura A.100 Amplitud de 0.80 mm.

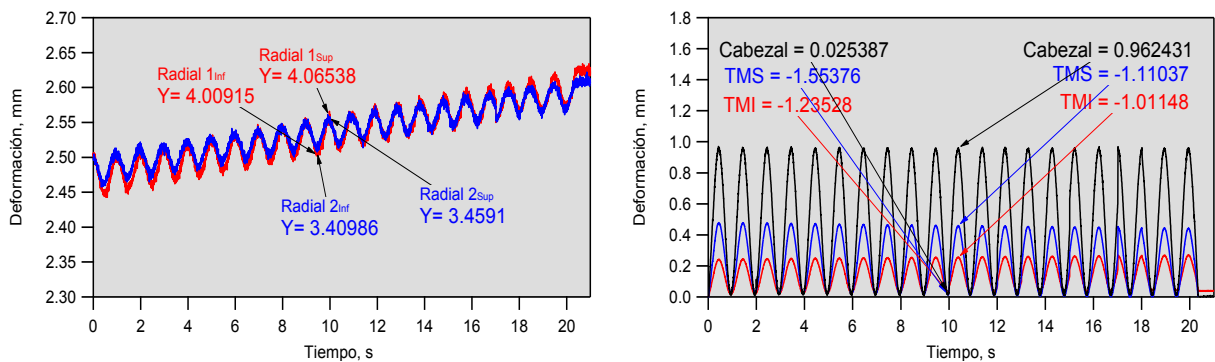


Figura A.101 Amplitud de 0.90 mm.



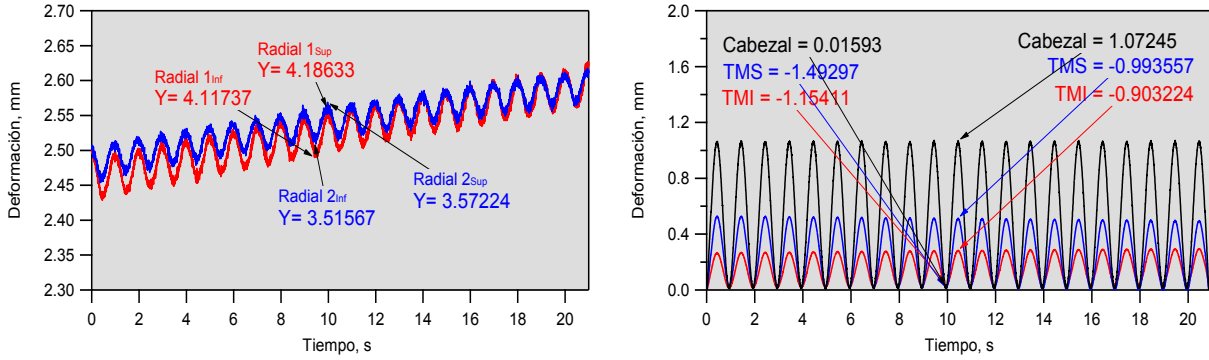


Figura A.102 Amplitud de 1.00 mm.

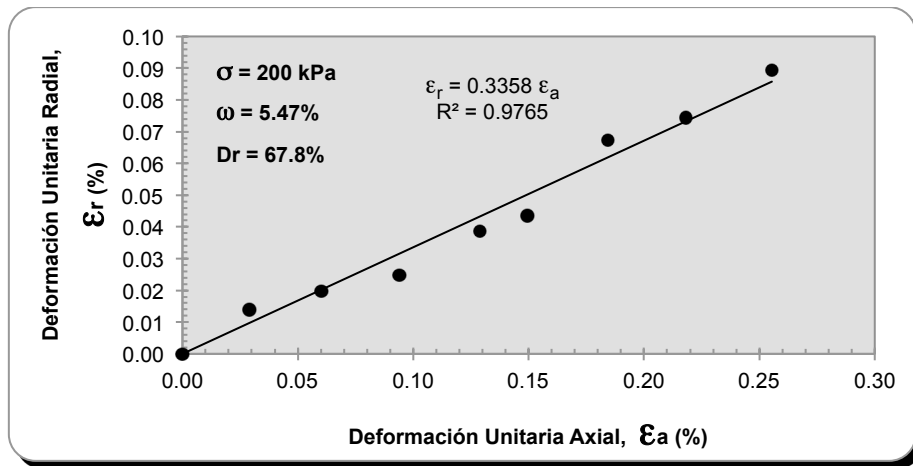


Figura A.103 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

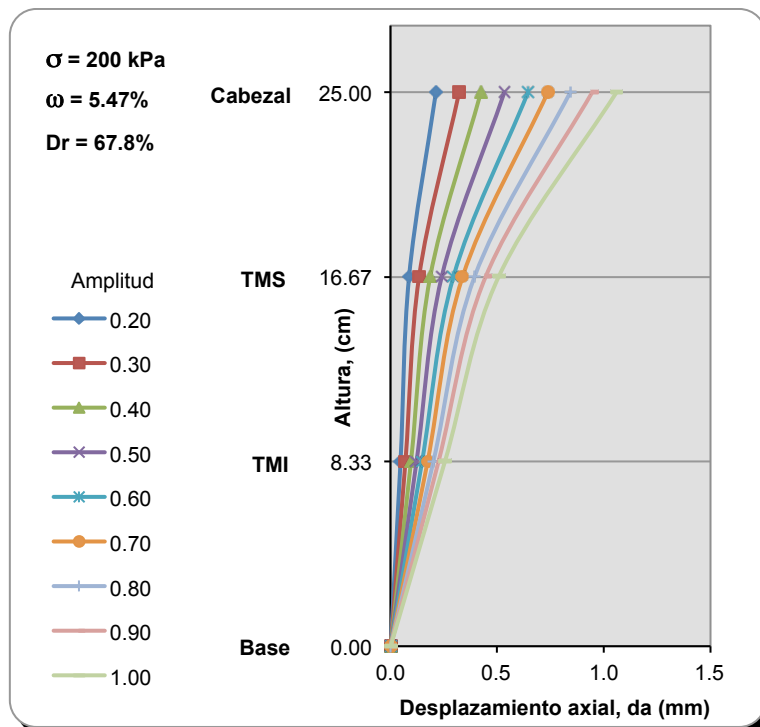


Figura A.104 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 2 (250 kPa)

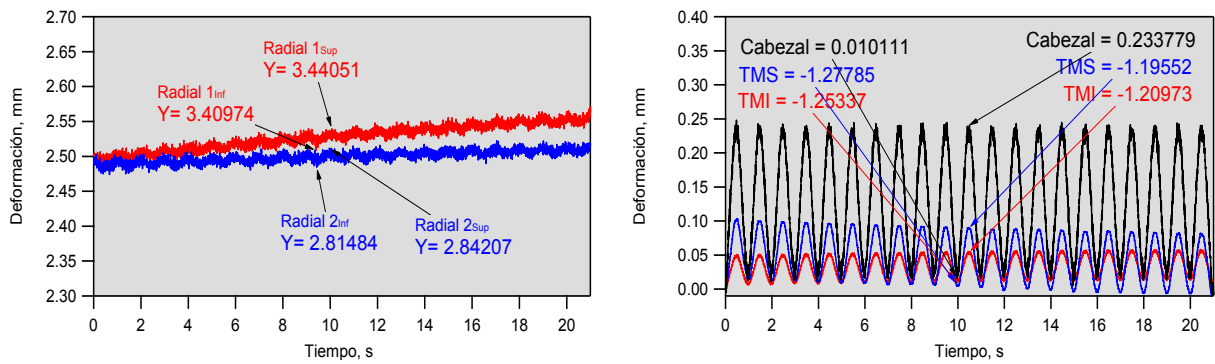


Figura A.105 Amplitud de 0.20 mm.

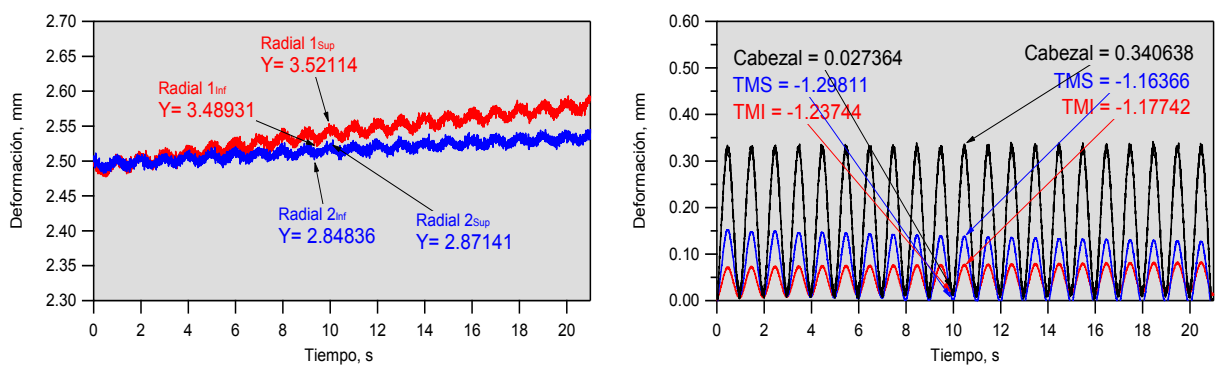


Figura A.106 Amplitud de 0.30 mm.

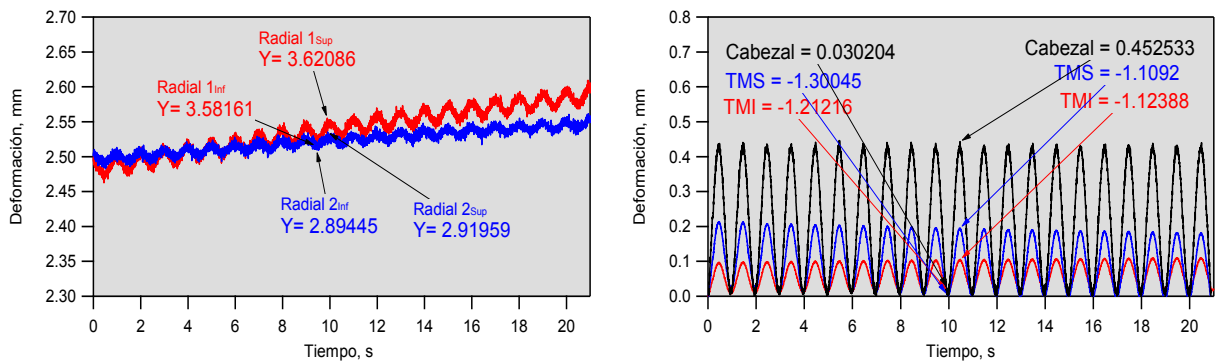


Figura A.107 Amplitud de 0.40 mm.

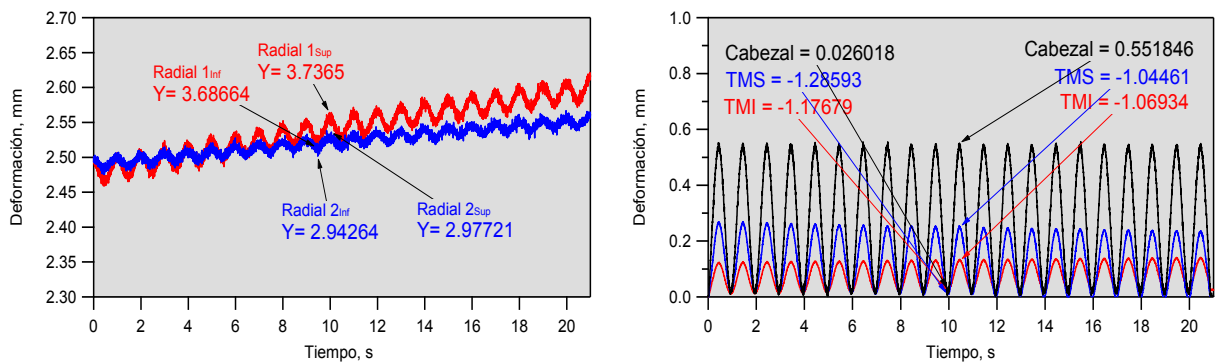


Figura A.108 Amplitud de 0.50 mm.

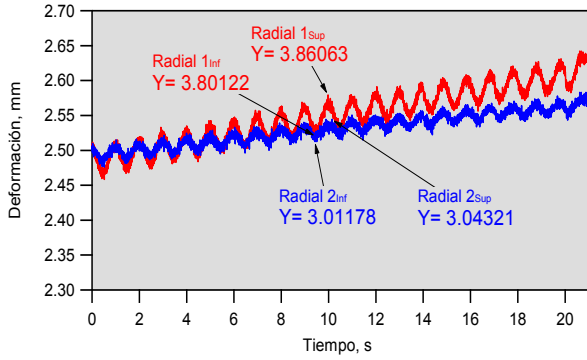


Figura A.109 Amplitud de 0.60 mm.

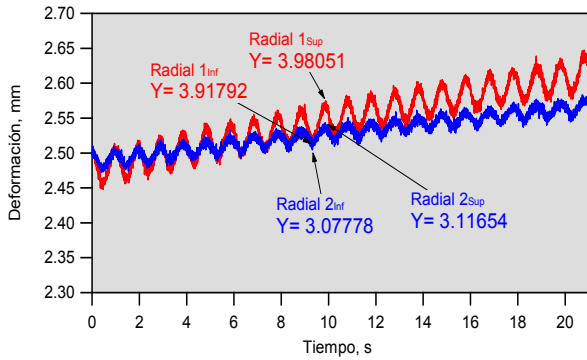


Figura A.110 Amplitud de 0.70 mm.

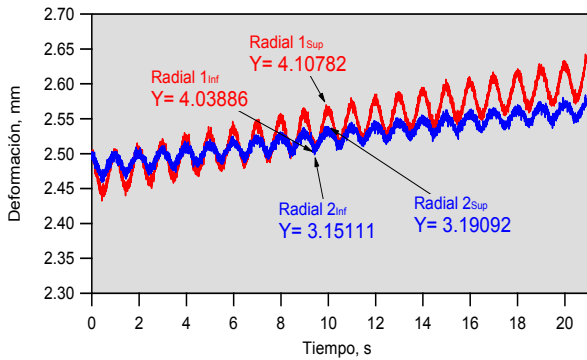


Figura A.111 Amplitud de 0.80 mm.

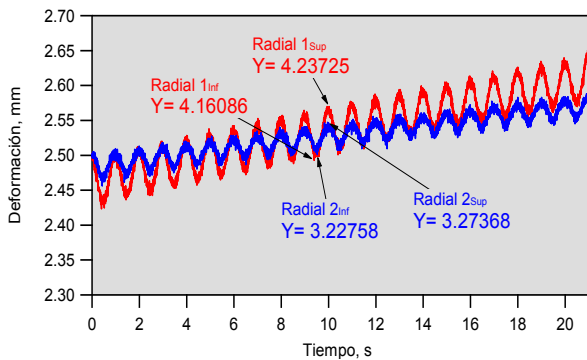


Figura A.112 Amplitud de 0.90 mm.

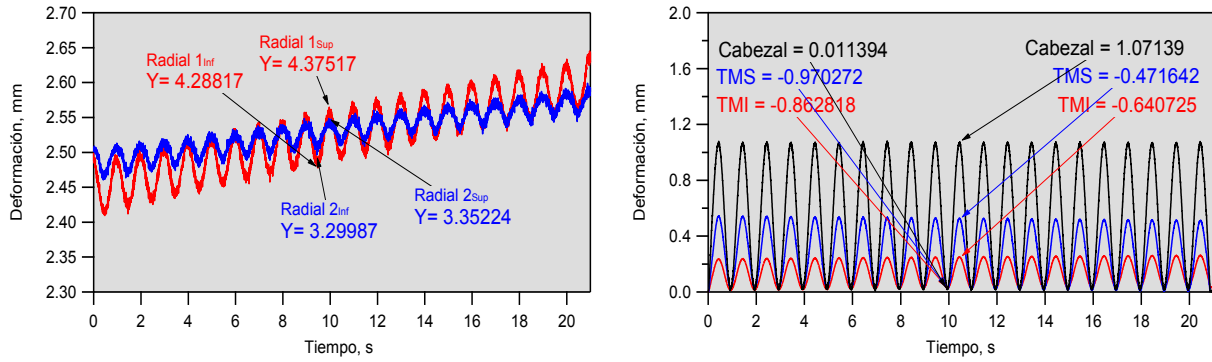


Figura A.113 Amplitud de 1.00 mm.

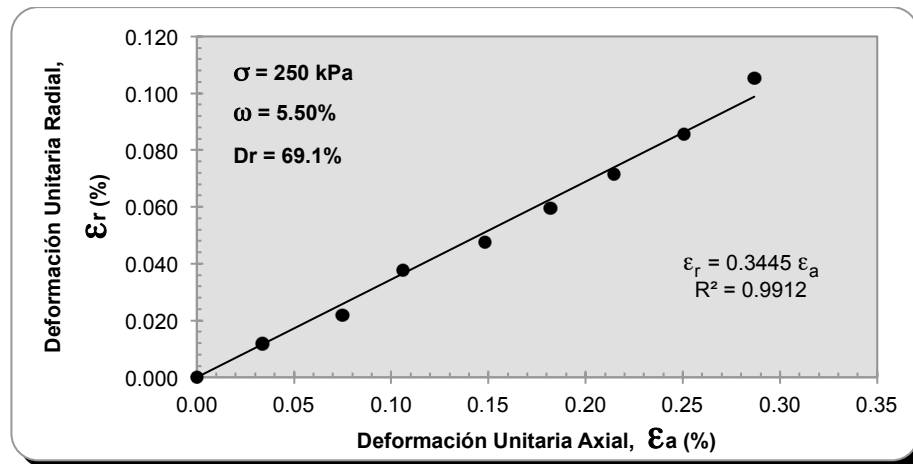


Figura A.114 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

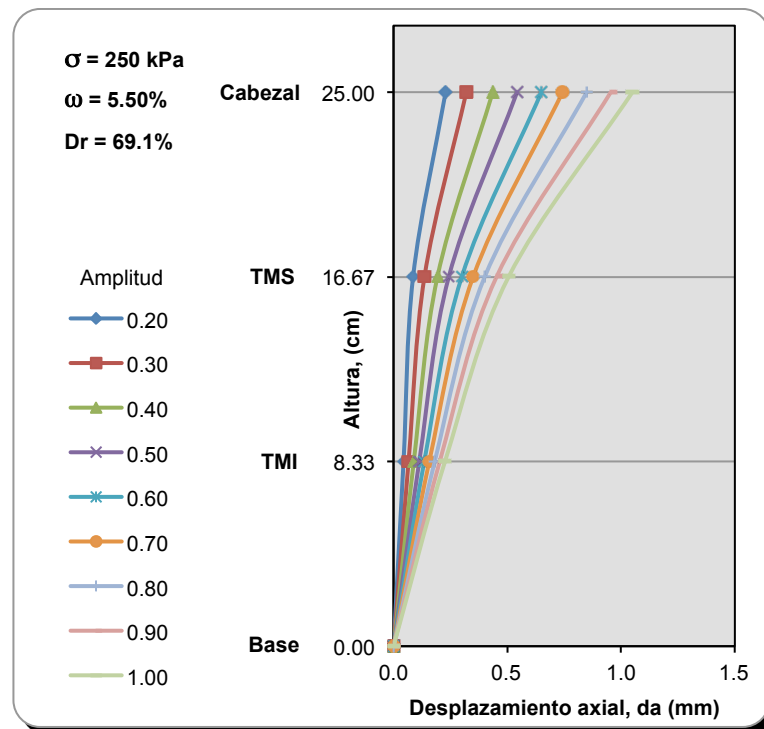
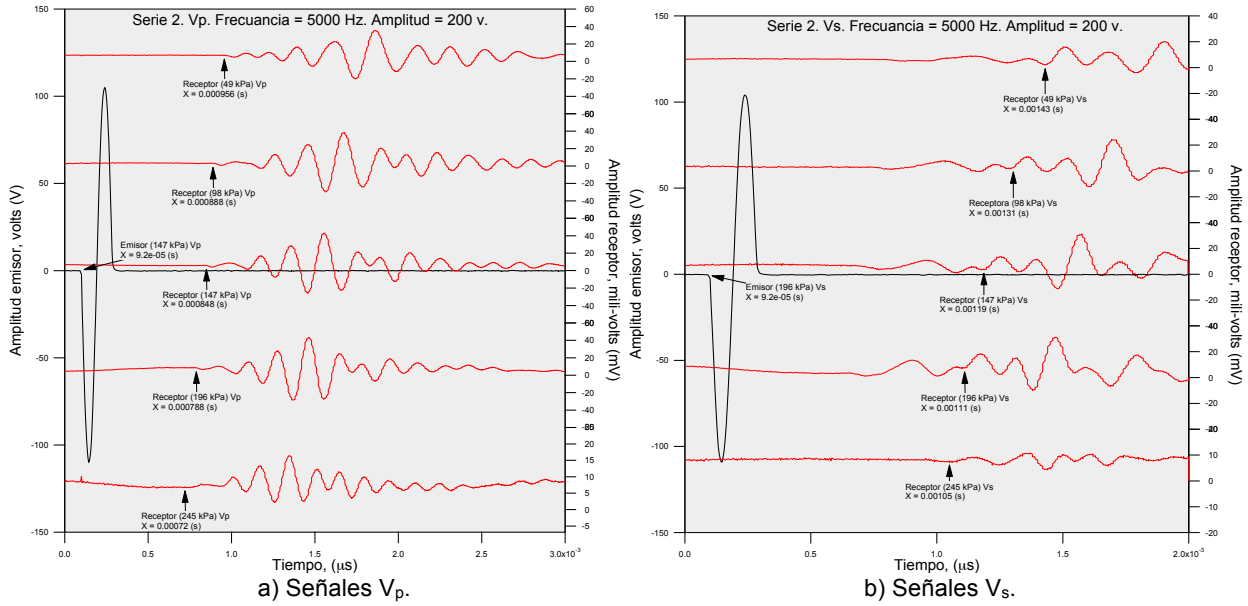
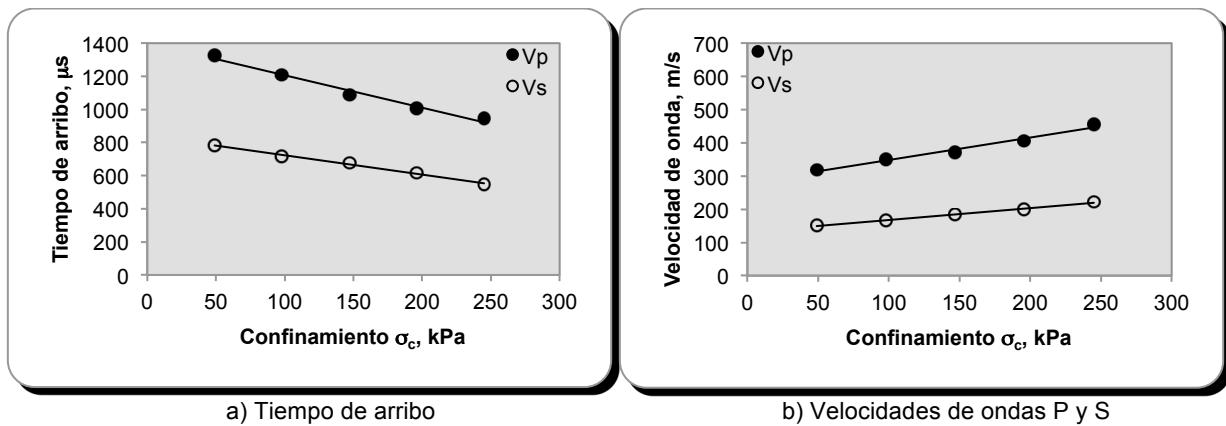


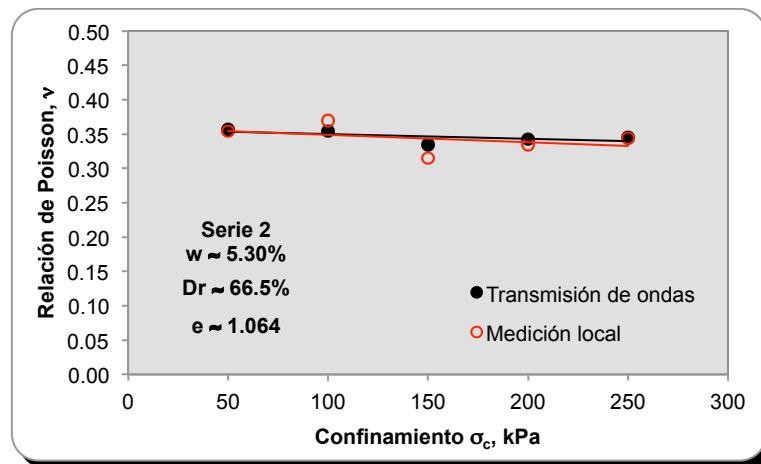
Figura A.115 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.



A.116 Análisis de arribo de señales  $V_p$  y  $V_s$  (serie 2)



A.117 Comportamiento del tiempo de arribo y velocidad de onda con respecto al esfuerzo de confinamiento.



A.118 Comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento.

Serie 3.  $\omega \approx 8.57$ ;  $Wp = 2kg$  ( $Dr \approx 53.7$ ;  $e \approx 1.16$ )

Tabla A-5 Resultados del contenido de agua obtenidos para la serie 3.

Confinamiento kPa	$W_{pison}$ kg	Contenido de agua				
		N° cápsula	Tara g	$W_{mh+t}$ g	$W_{ms+t}$ g	w %
50	2.00	20	118.00	228.50	219.60	8.76
100	2.00	92	123.00	234.60	225.80	8.56
150	2.00	42	118.70	228.80	220.10	8.58
200	2.00	121	119.70	221.20	213.30	8.44
250	2.00	124	119.70	246.00	236.10	8.51

Tabla A-6 Resultados calculados (serie 3).

Etapa kPa	Radio mm	Volumen $cm^3$	e	$\gamma_d$ $g/cm^3$	Cr
molde	50.70	2018.86	1.217	1.186	47.5
0.50	50.32	1989.00	1.184	1.204	51.6
1.00	50.19	1978.42	1.172	1.211	53.2
1.50	50.10	1971.19	1.165	1.215	53.9
2.00	50.00	1963.63	1.155	1.221	55.2
2.50	49.83	1950.30	1.110	1.246	60.7

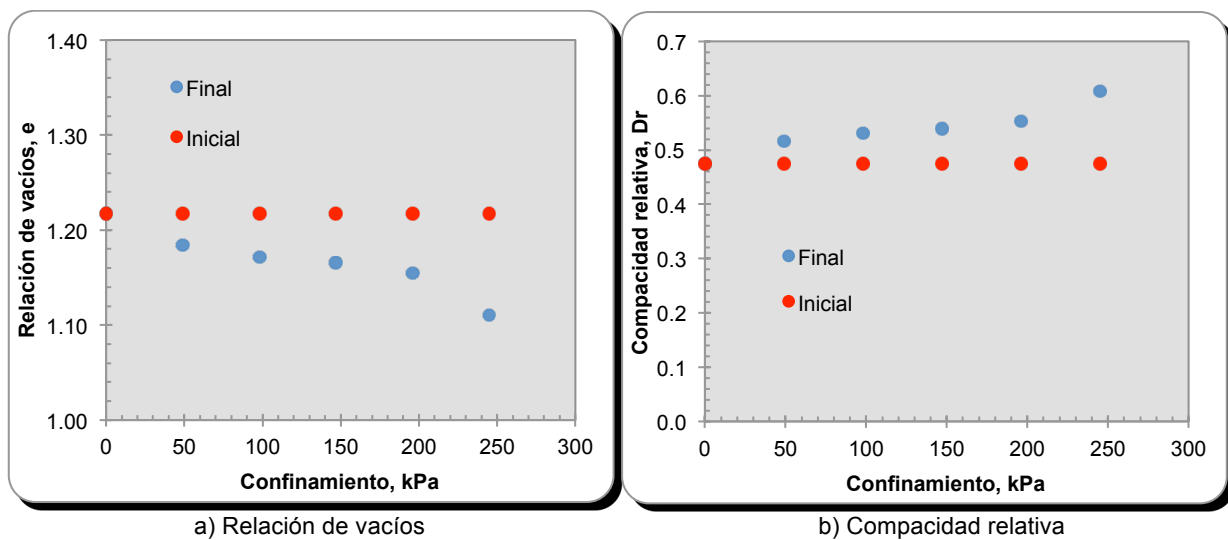


Figura A.119 Variación de la relación de vacíos y compacidad relativa, respecto al esfuerzo de confinamiento (serie 3).

• Serie 3 (0.5kPa)

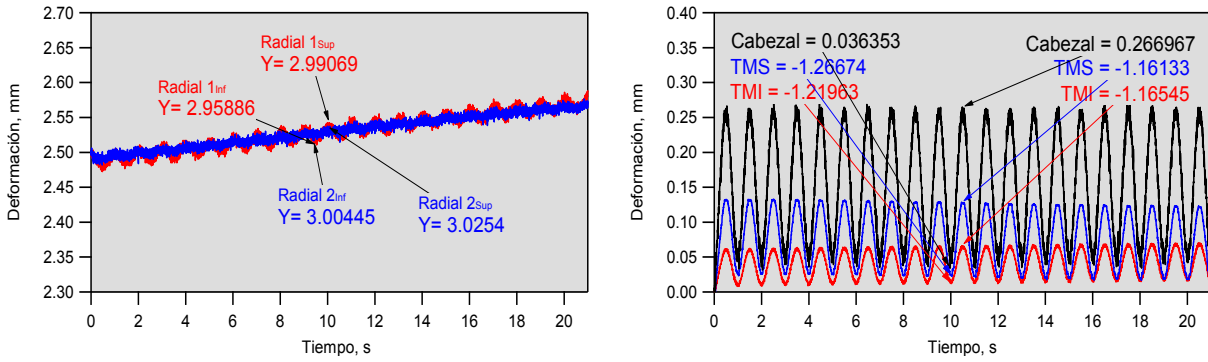


Figura A.120 Amplitud de 0.20 mm.

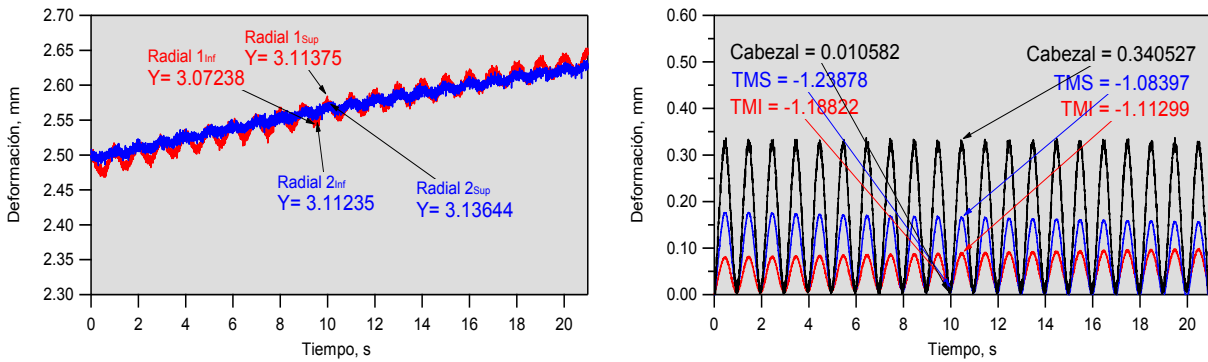


Figura A.121 Amplitud de 0.30 mm.

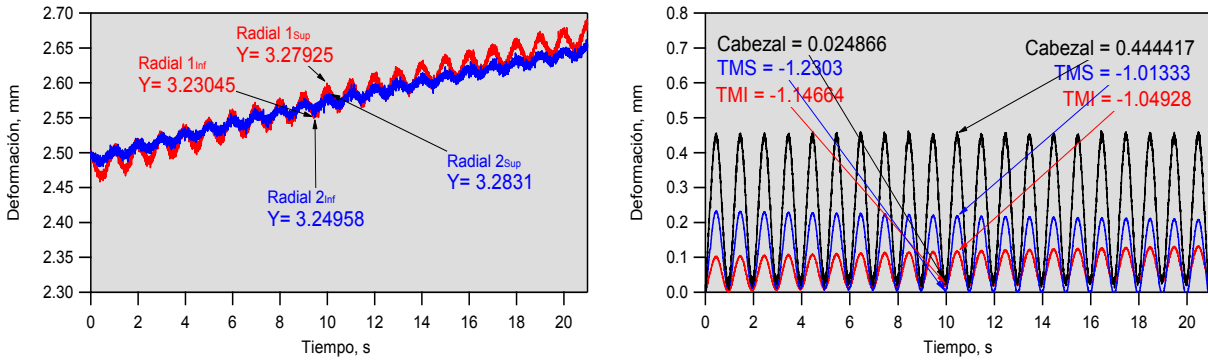


Figura A.122 Amplitud de 0.40 mm.

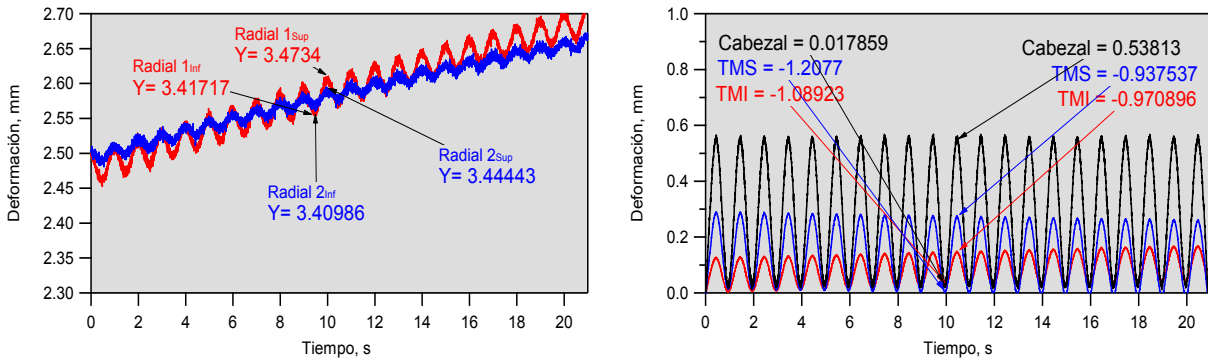


Figura A.123 Amplitud de 0.50 mm.

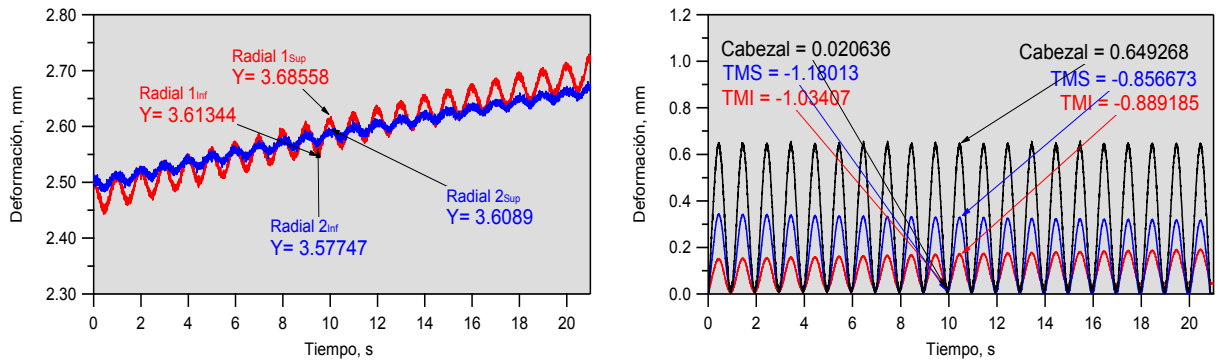


Figura A.124 Amplitud de 0.60 mm.

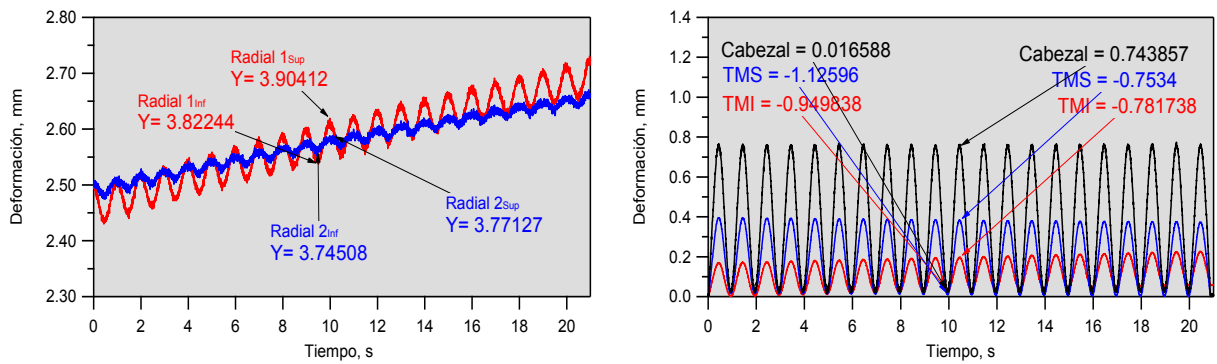


Figura A.125 Amplitud de 0.70 mm.

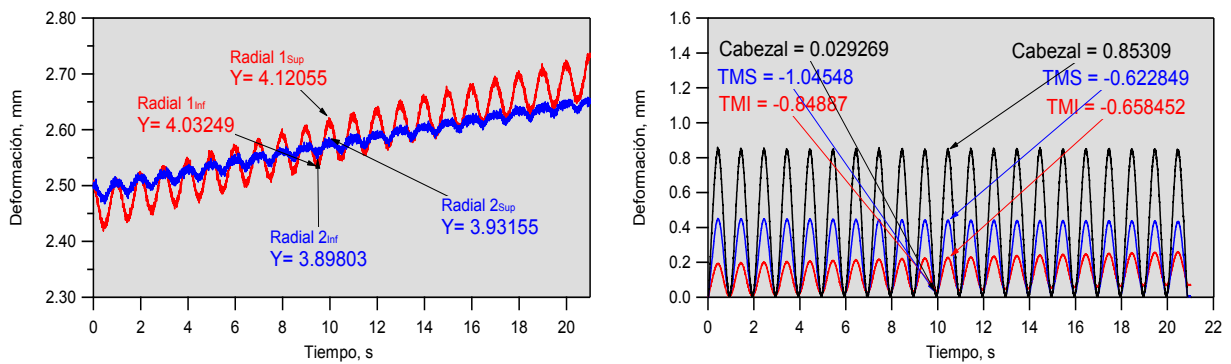


Figura A.126 Amplitud de 0.80 mm.

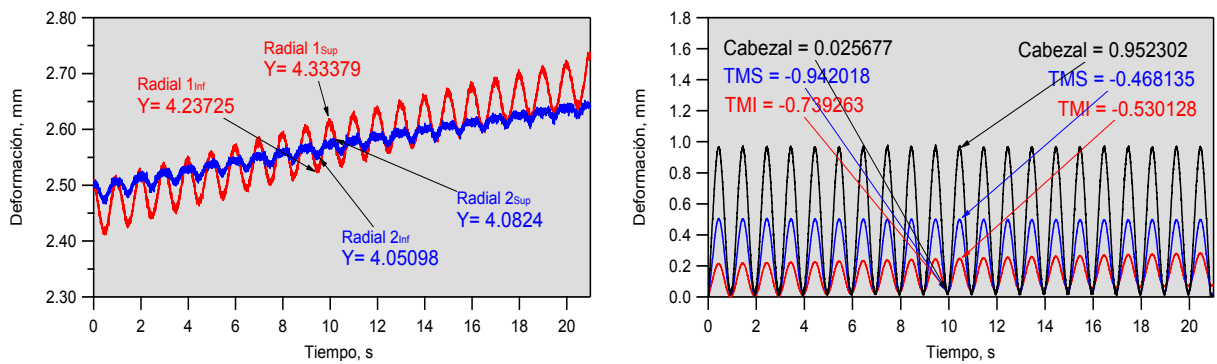


Figura A.127 Amplitud de 0.90 mm.



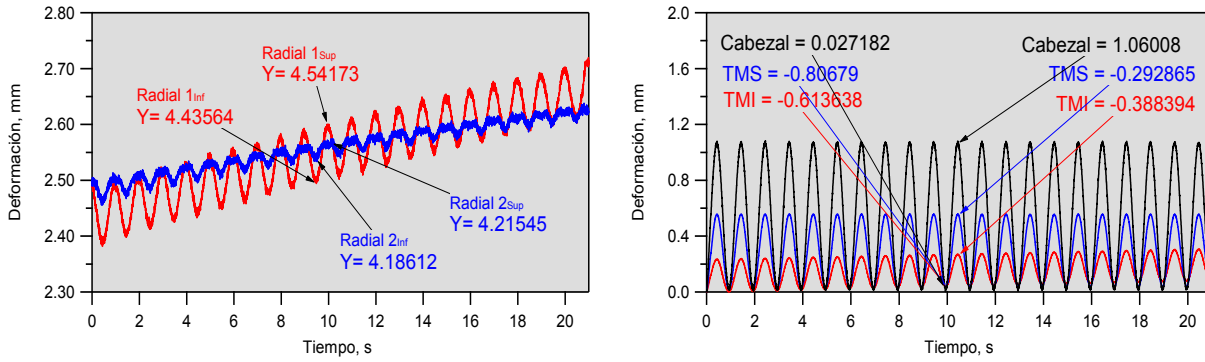


Figura A.128 Amplitud de 1.00 mm.

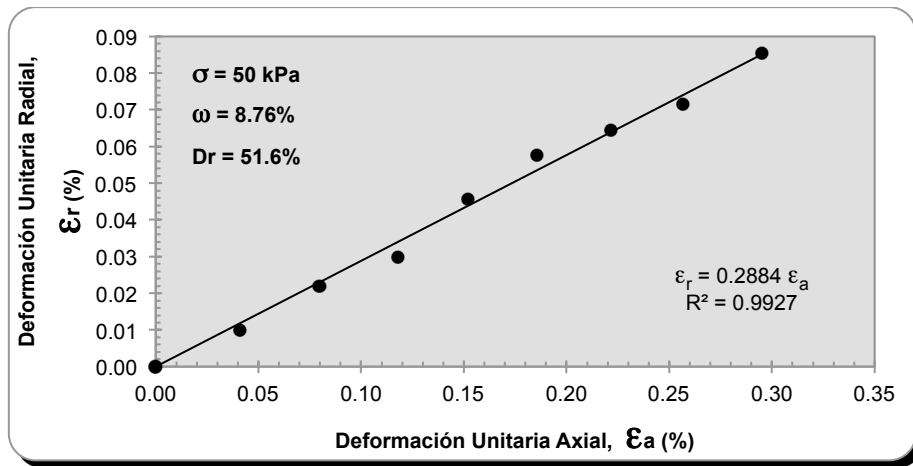


Figura A.129 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

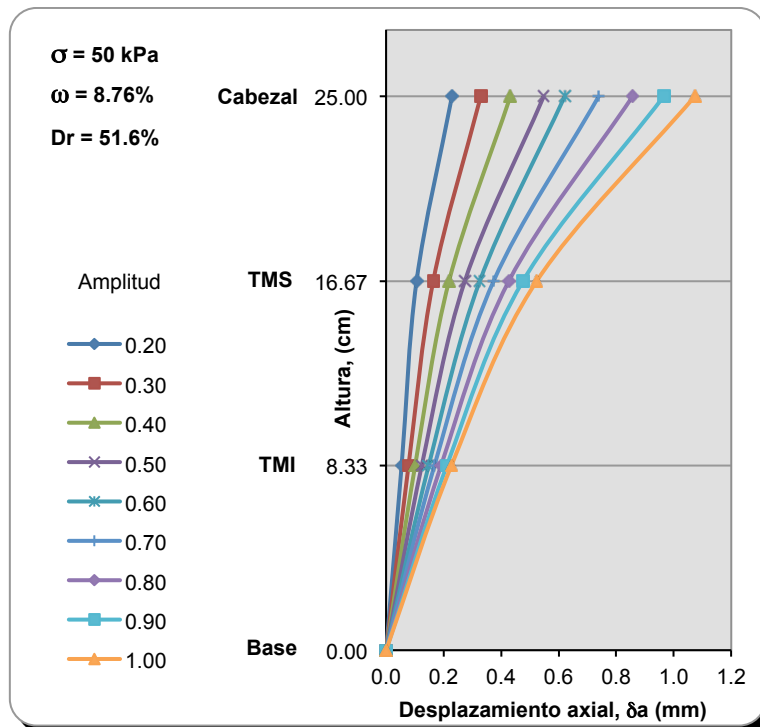


Figura A.130 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 3 (100 kPa)

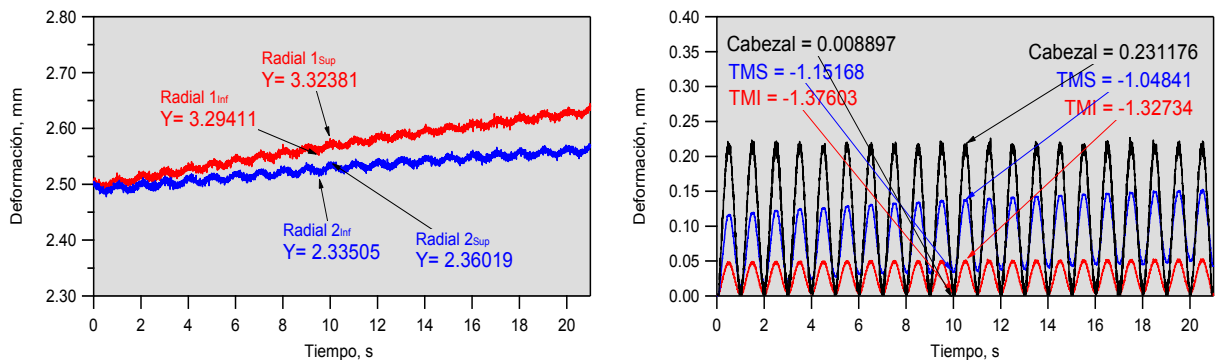


Figura A.131 Amplitud de 0.20 mm.

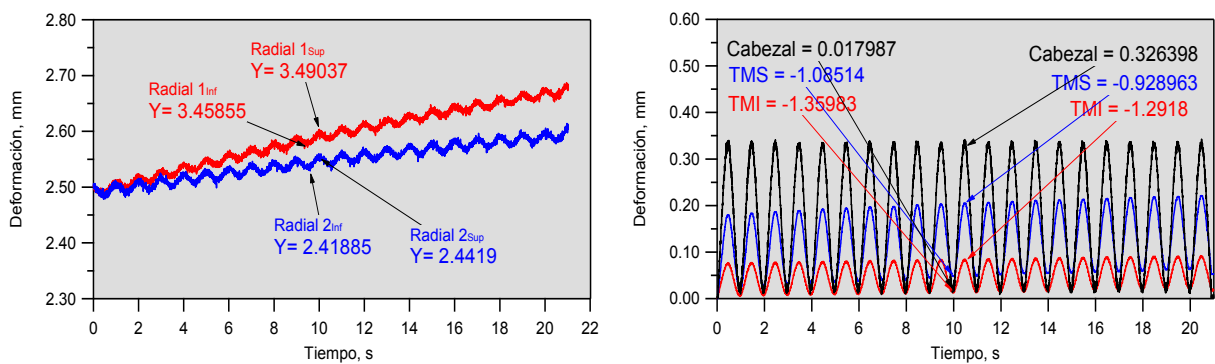


Figura A.132 Amplitud de 0.30 mm.

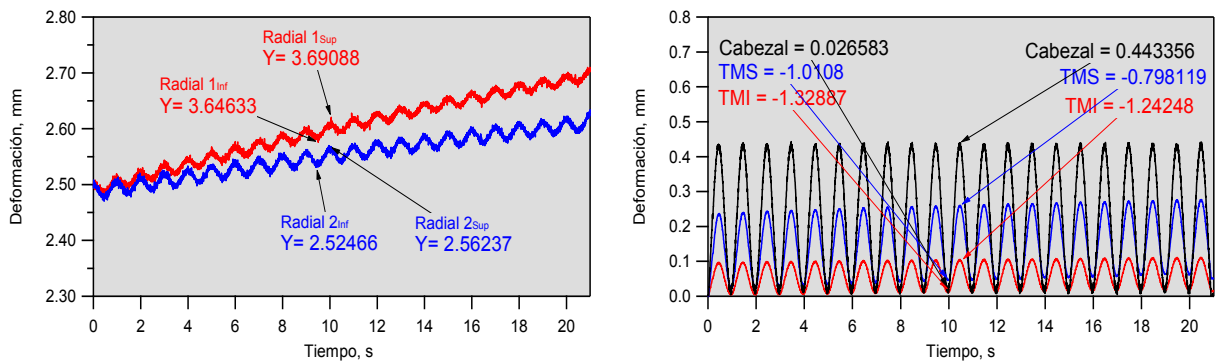


Figura A.133 Amplitud de 0.40 mm.

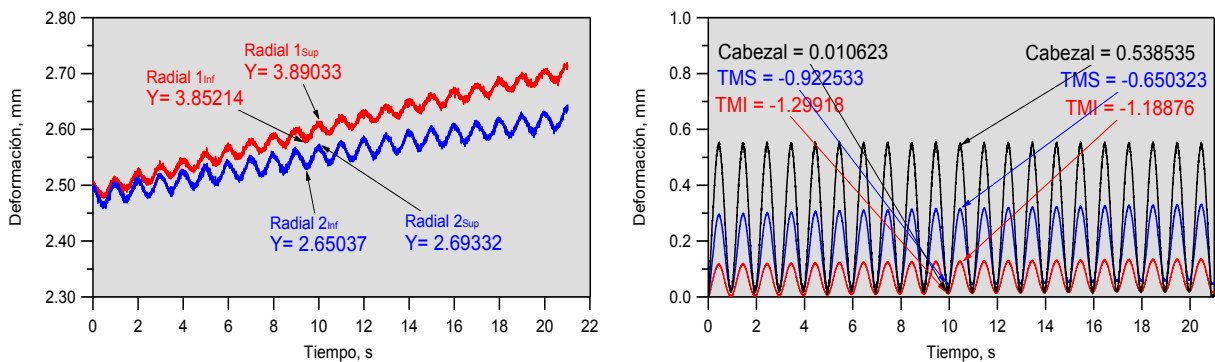


Figura A.134 Amplitud de 0.50 mm.

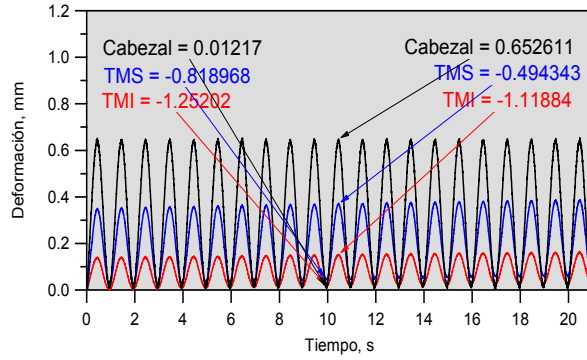
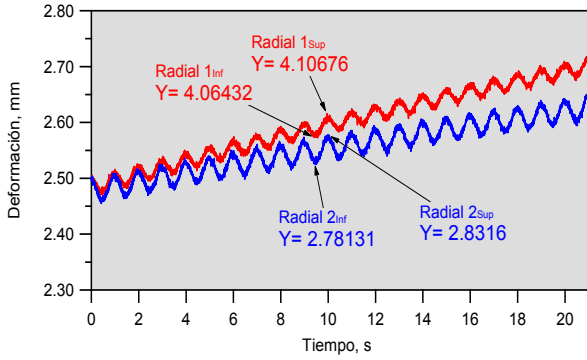


Figura A.135 Amplitud de 0.60 mm.

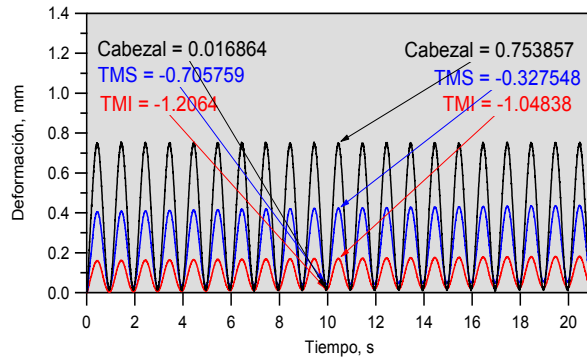
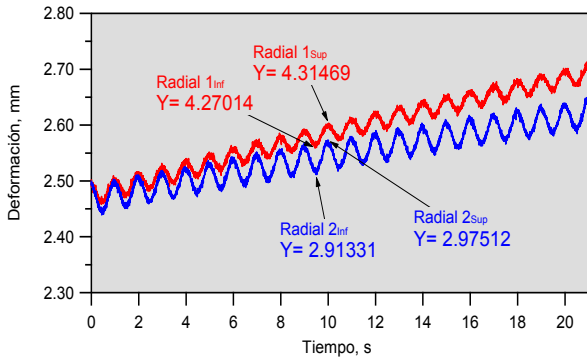


Figura A.136 Amplitud de 0.70 mm.

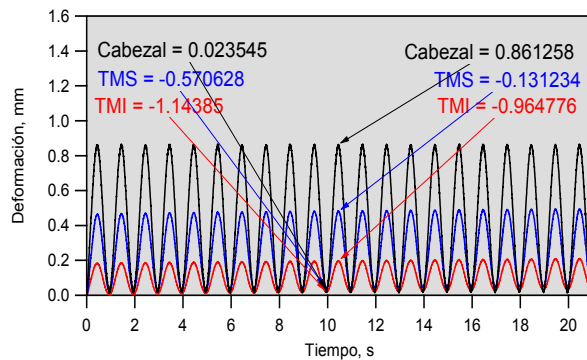
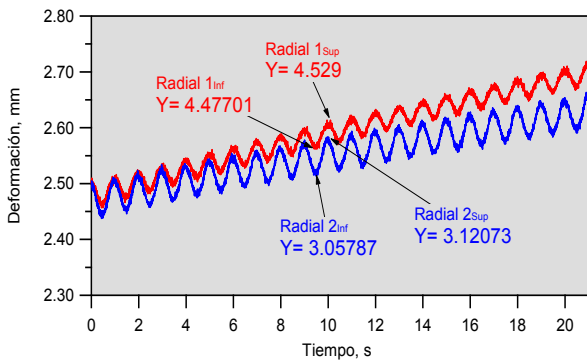


Figura A.137 Amplitud de 0.80 mm.

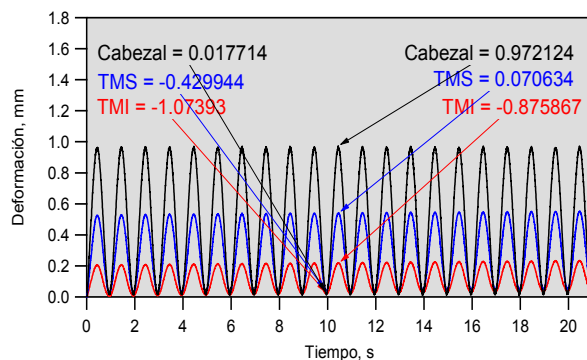
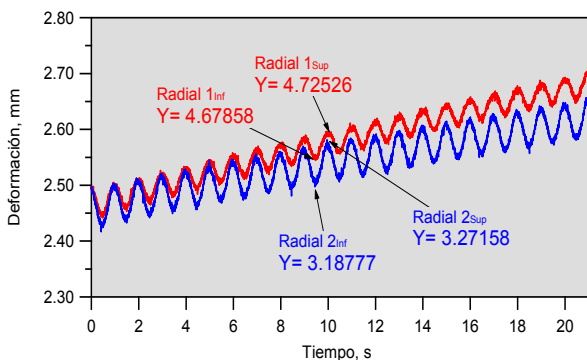


Figura A.138 Amplitud de 0.90 mm.

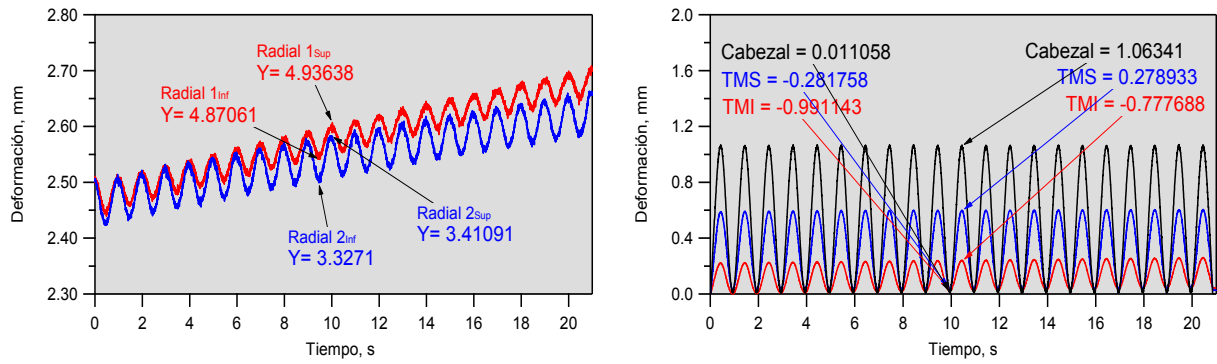


Figura A.139 Amplitud de 1.00 mm.

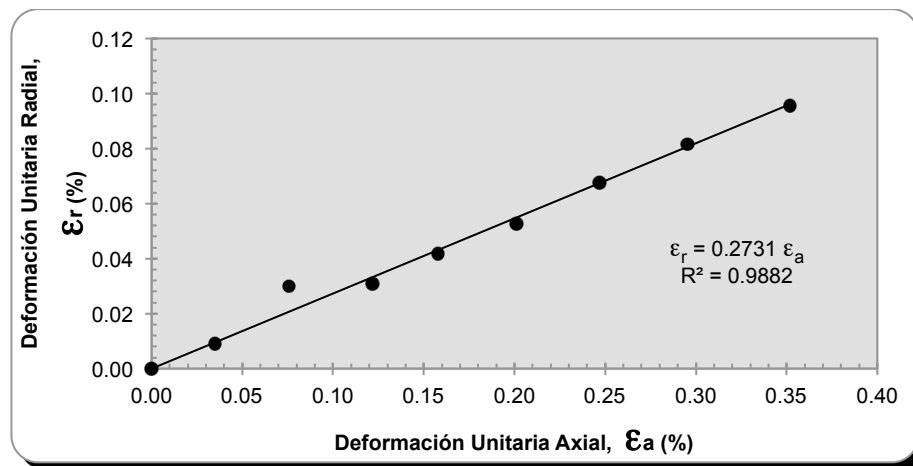


Figura A.140 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

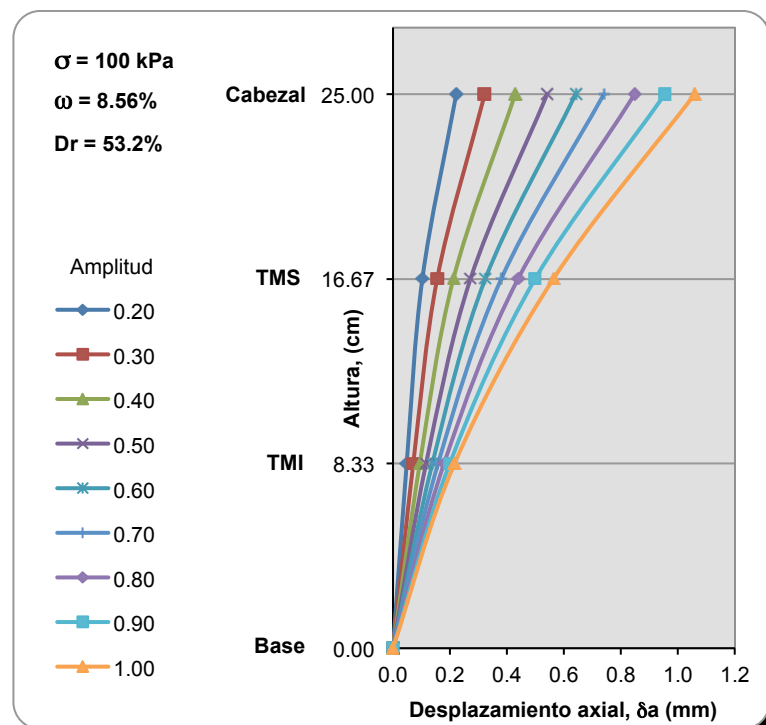


Figura A.141 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 3 (150 kPa)

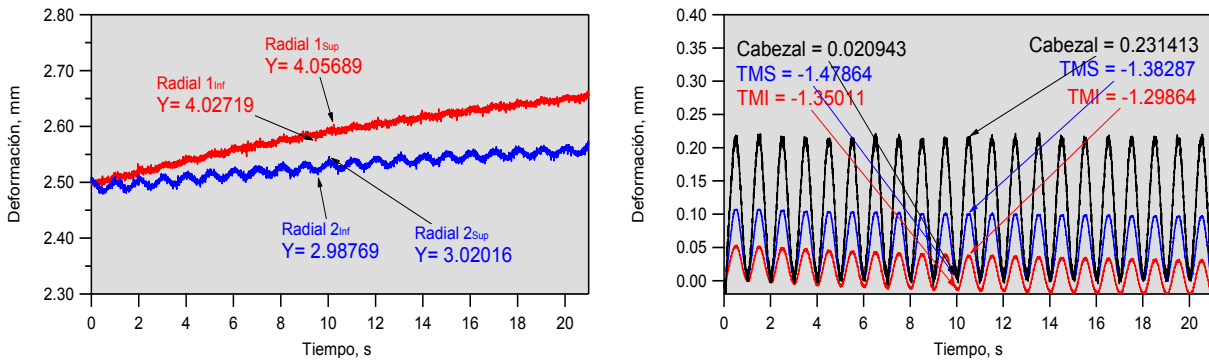


Figura A.142 Amplitud de 0.20 mm.

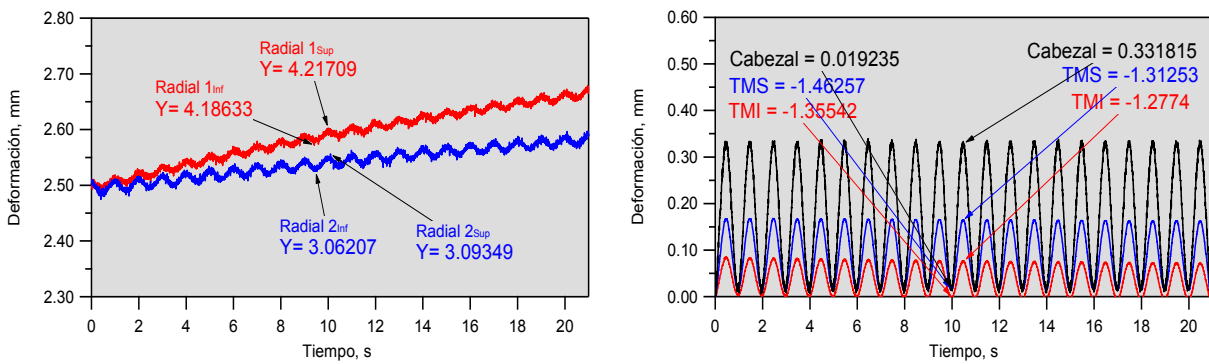


Figura A.143 Amplitud de 0.30 mm.

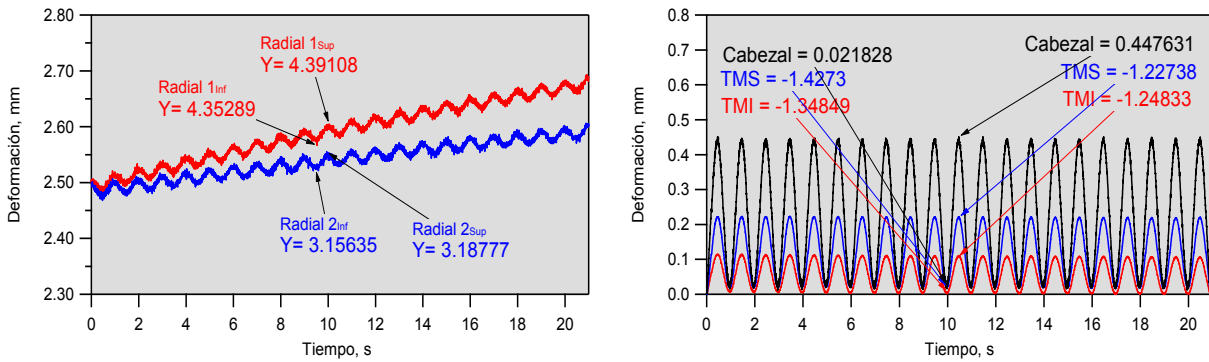


Figura A.144 Amplitud de 0.40 mm.

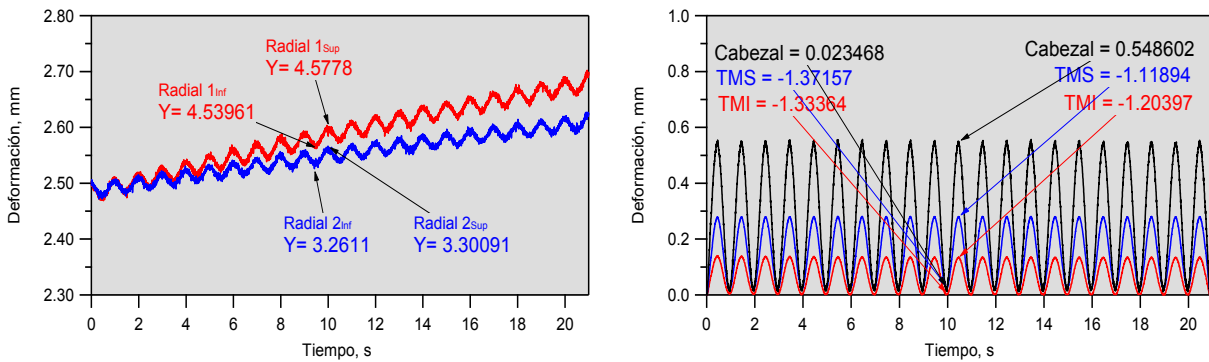


Figura A.145 Amplitud de 0.50 mm.

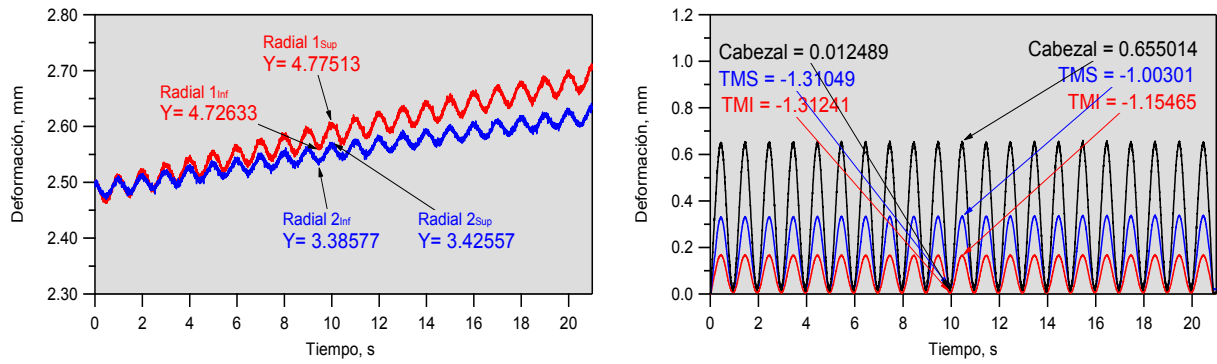


Figura A.146 Amplitud de 0.60 mm.

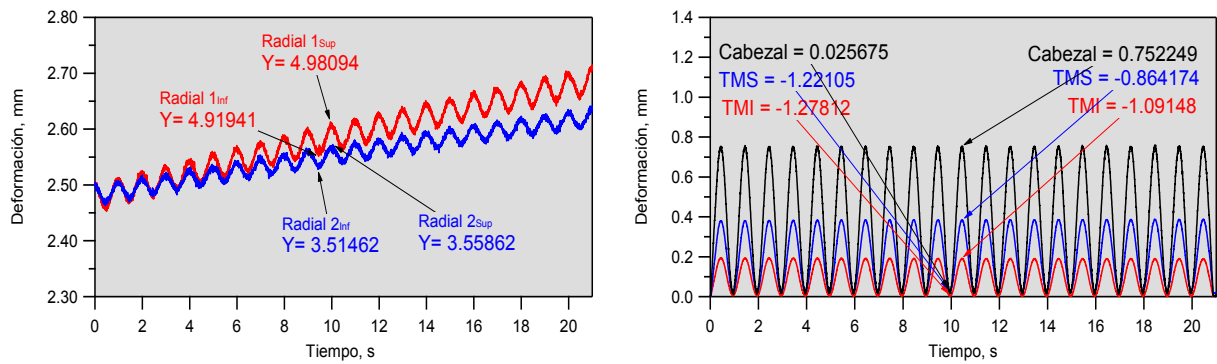


Figura A.147 Amplitud de 0.70 mm.

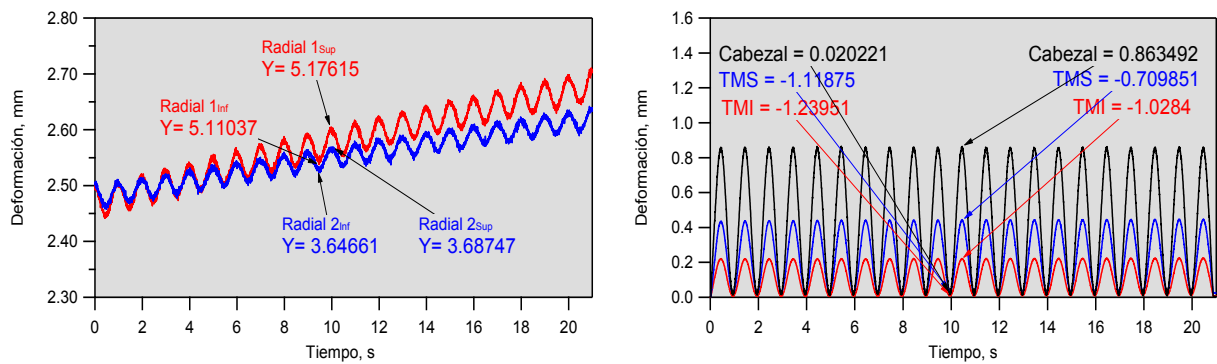


Figura A.148 Amplitud de 0.80 mm.

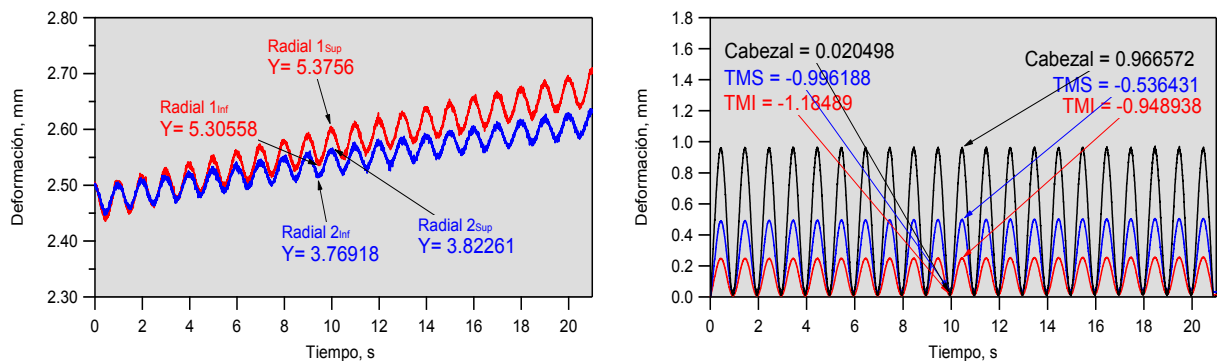


Figura A.149 Amplitud de 0.90 mm.

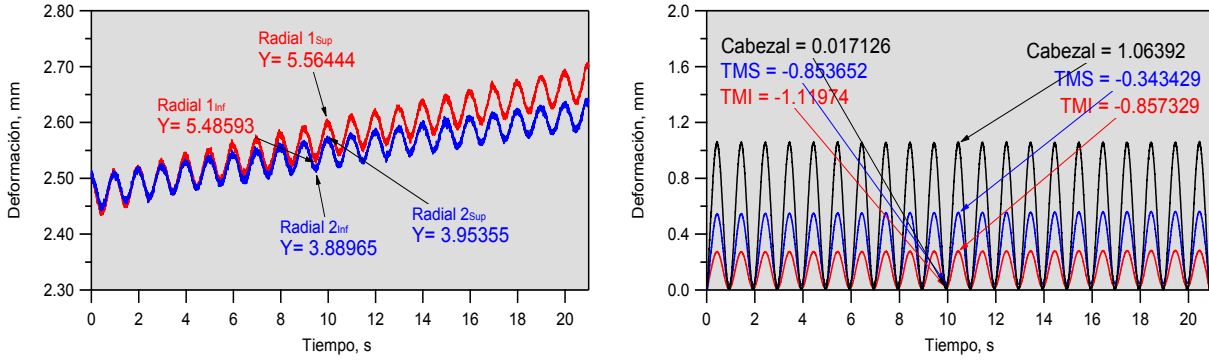


Figura A.150 Amplitud de 1.00 mm.

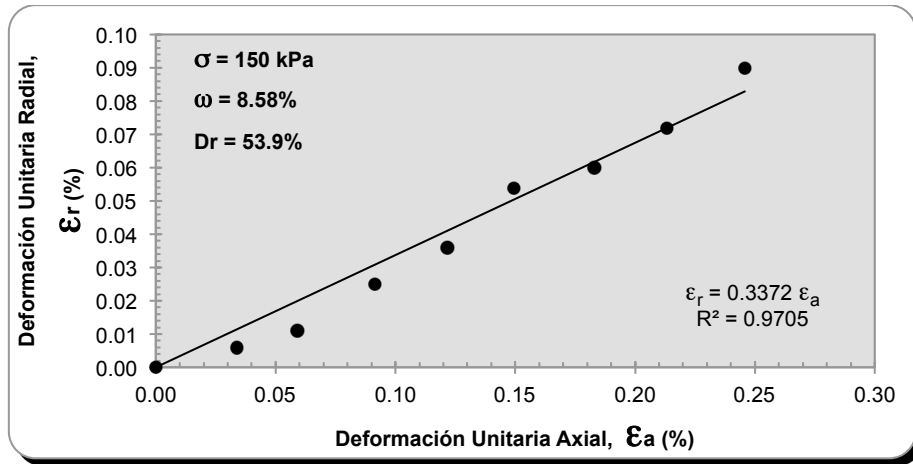


Figura A.151 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

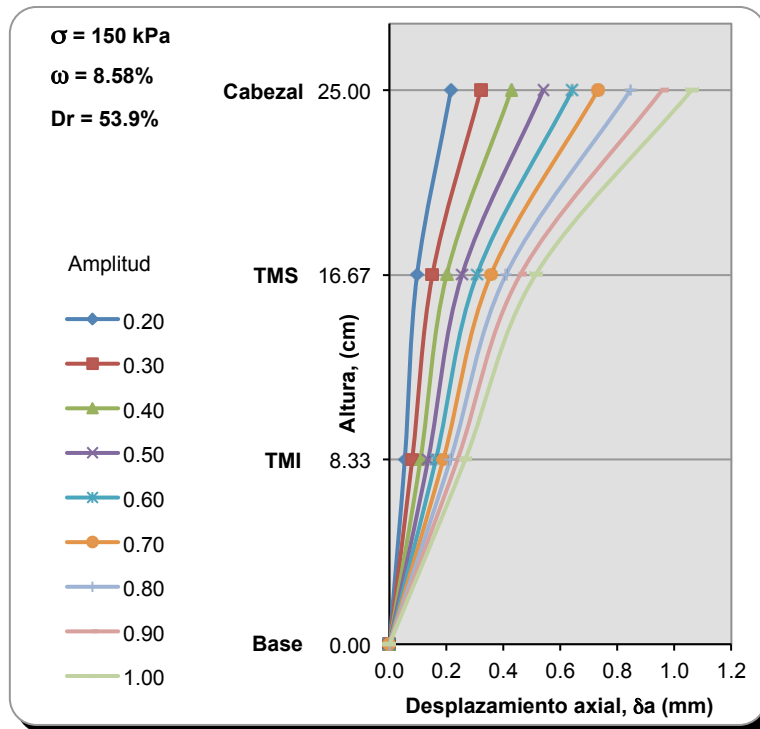


Figura A.152 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 3 (200 kPa)

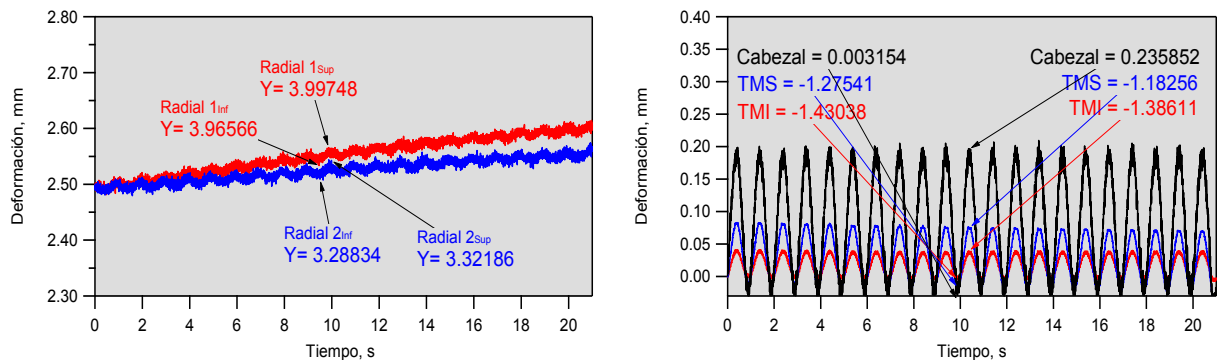


Figura A.153 Amplitud de 0.20 mm.

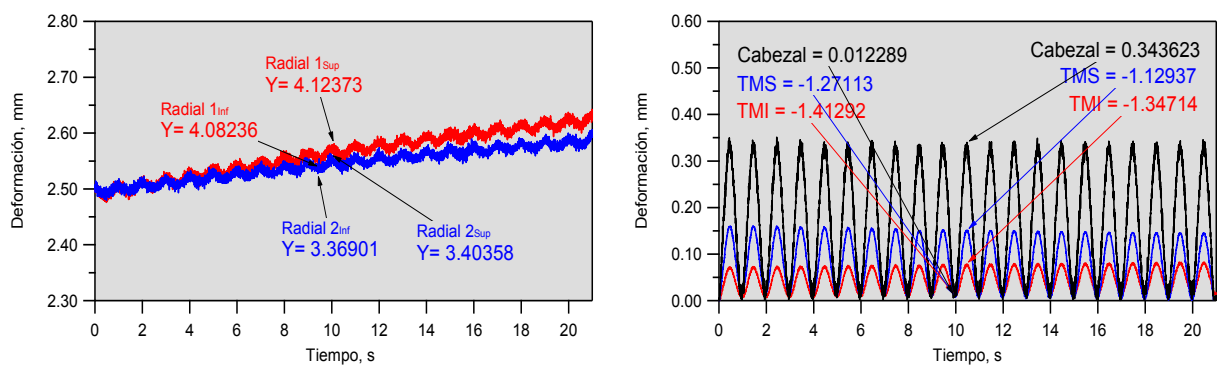


Figura A.154 Amplitud de 0.30 mm.

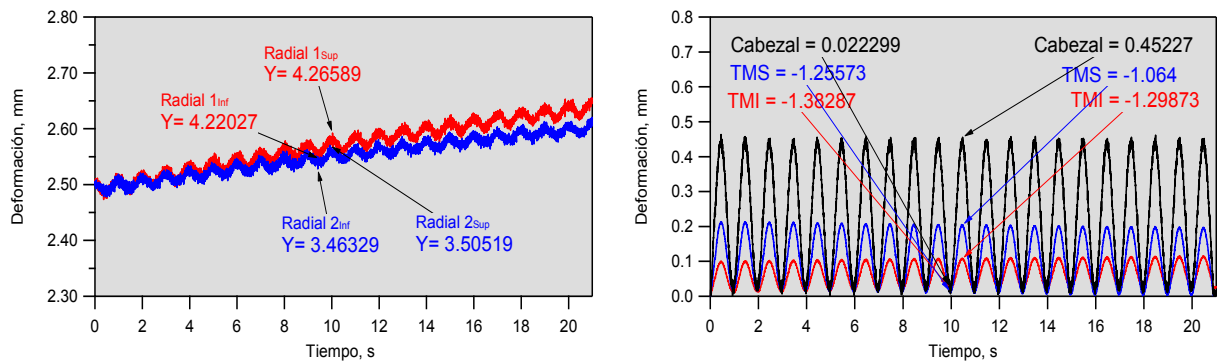


Figura A.155 Amplitud de 0.40 mm.

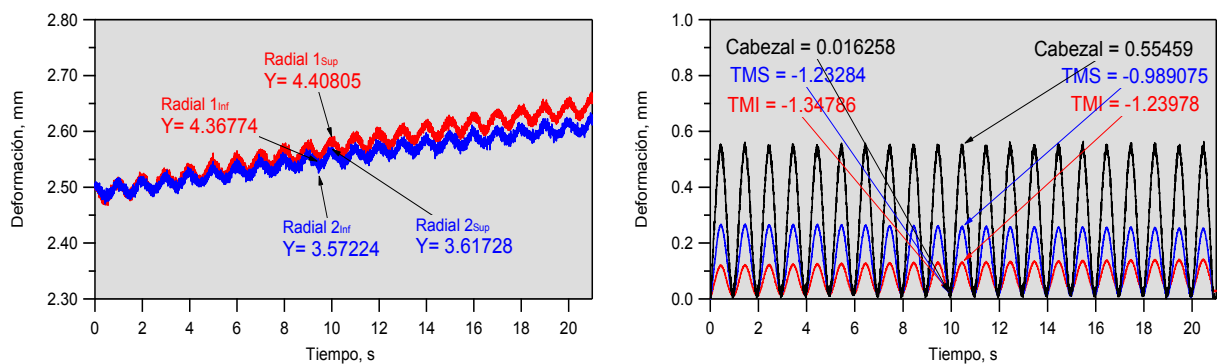


Figura A.156 Amplitud de 0.50 mm.



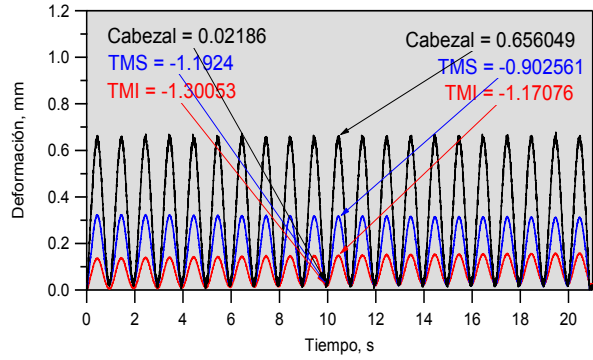
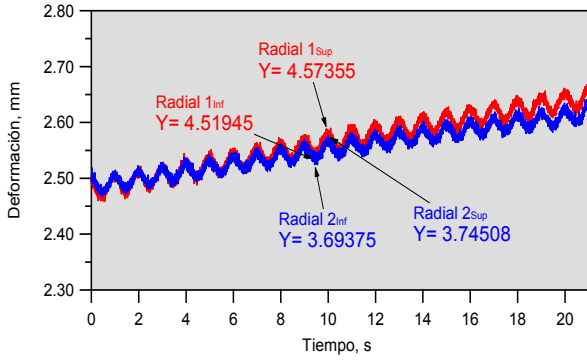


Figura A.157 Amplitud de 0.60 mm.

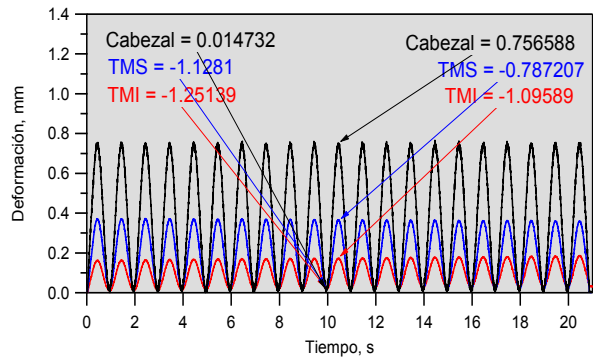
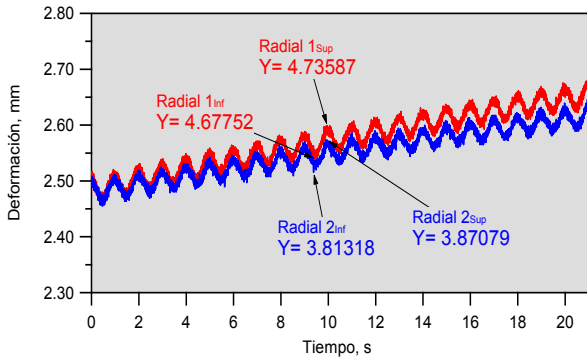


Figura A.158 Amplitud de 0.70 mm.

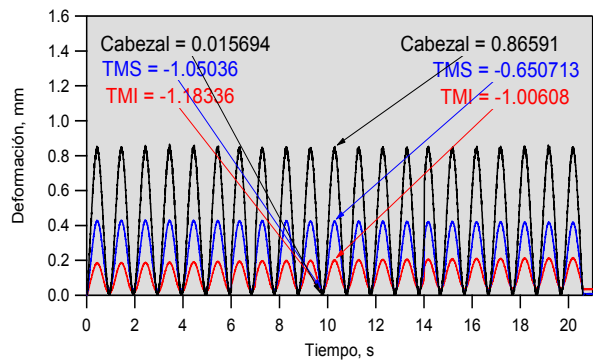
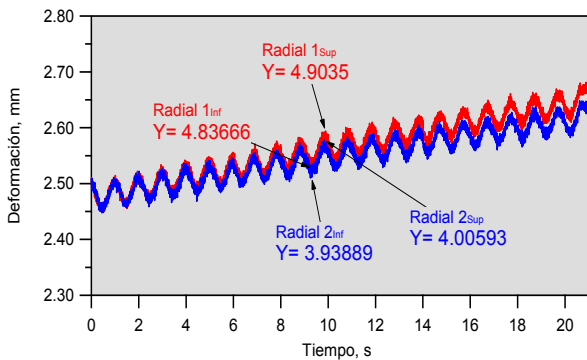


Figura A.159 Amplitud de 0.80 mm.

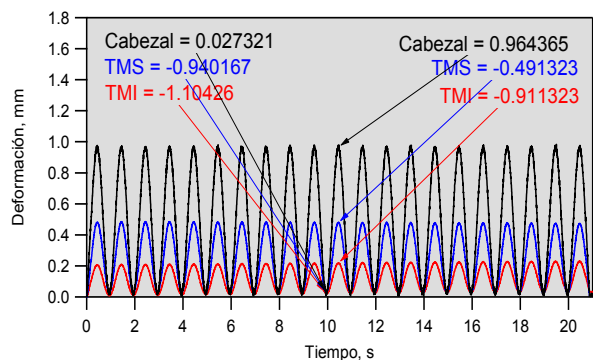
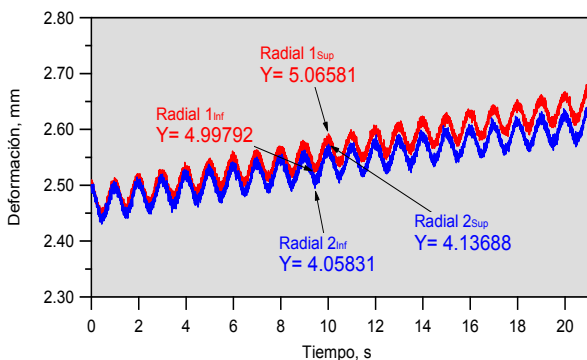


Figura A.160 Amplitud de 0.90 mm.

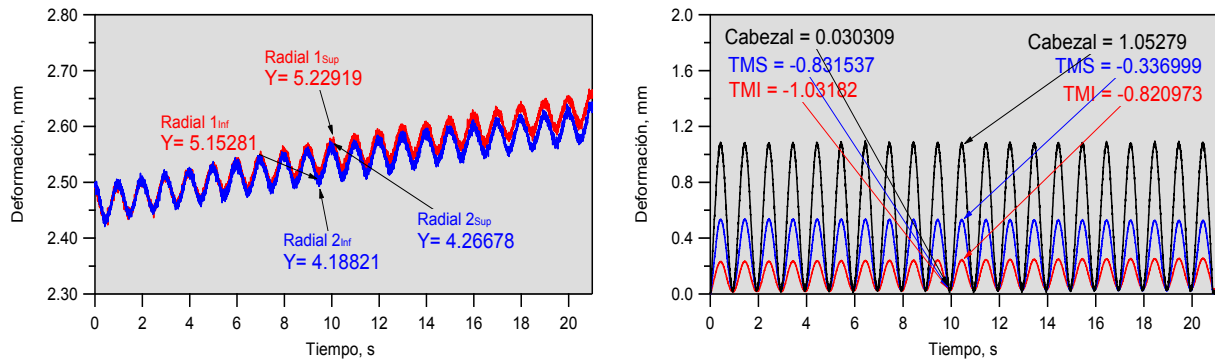


Figura A.161 Amplitud de 1.00 mm.

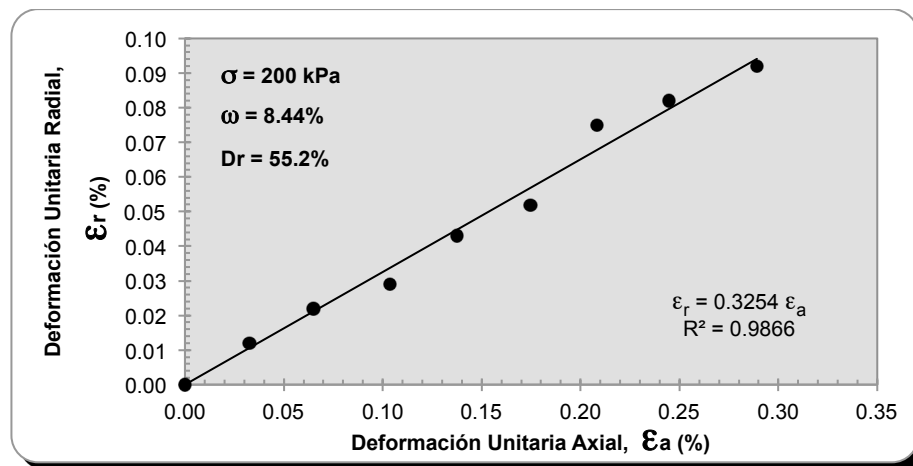


Figura A.162 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

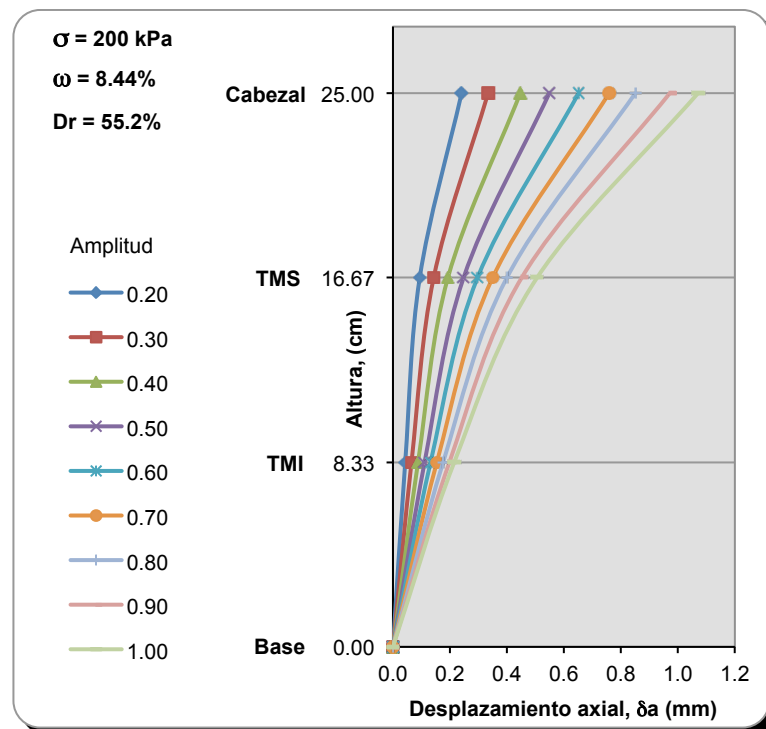


Figura A.163 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 3 (250 kPa)

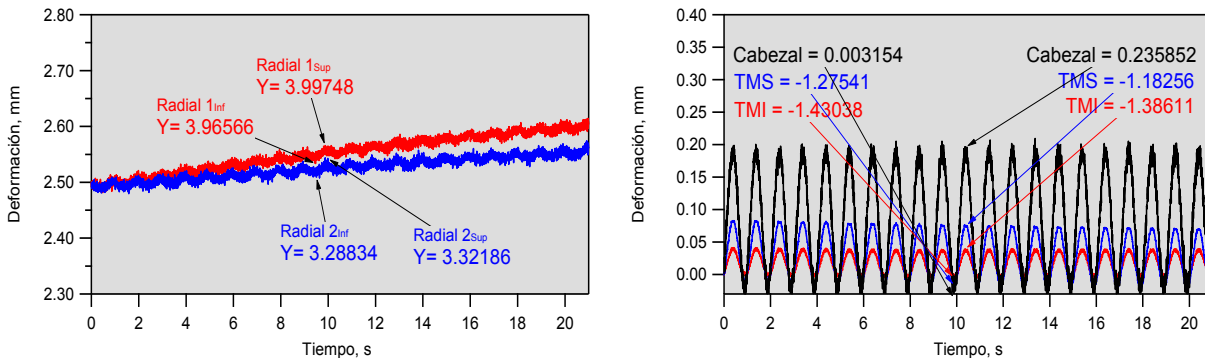


Figura A.164 Amplitud de 0.20 mm.

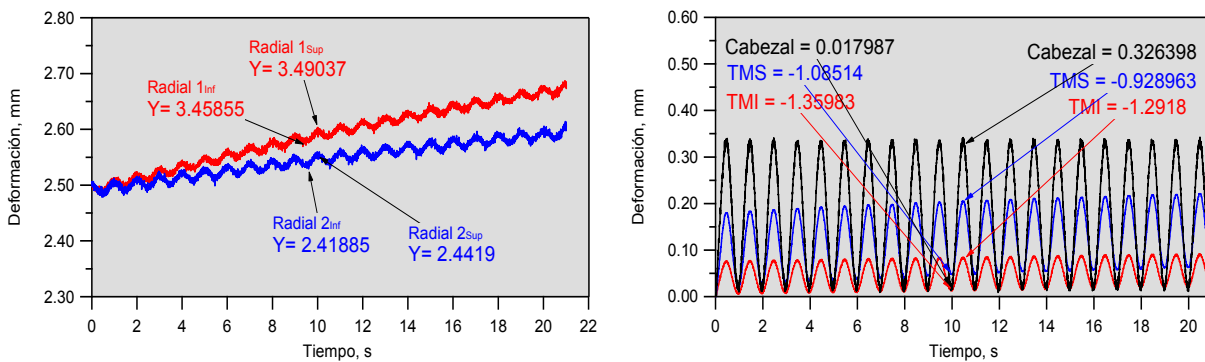


Figura A.165 Amplitud de 0.30 mm.

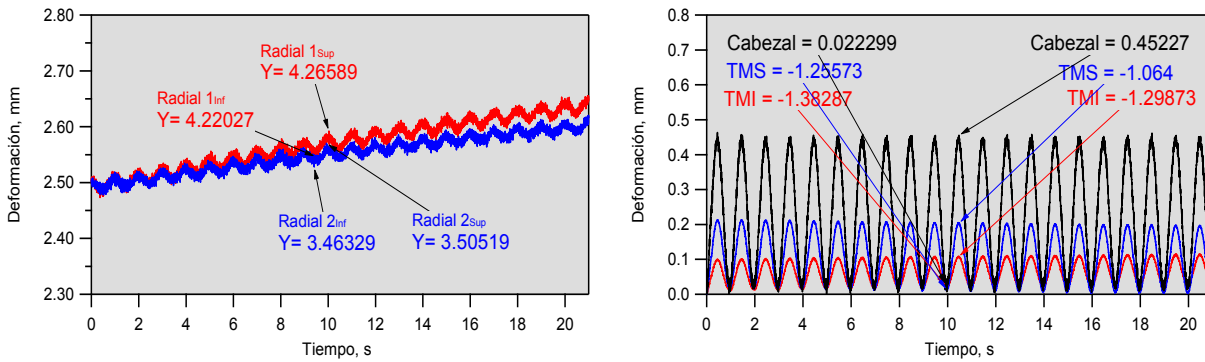


Figura A.166 Amplitud de 0.40 mm.

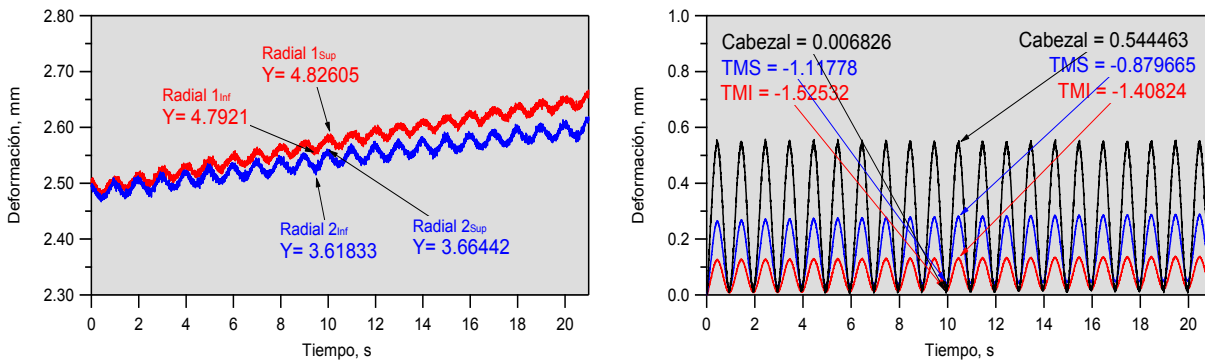


Figura A.167 Amplitud de 0.50 mm.

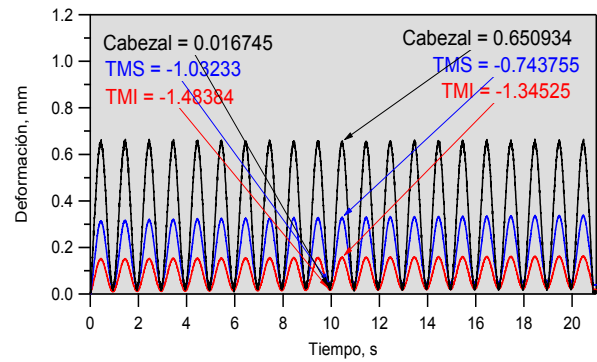
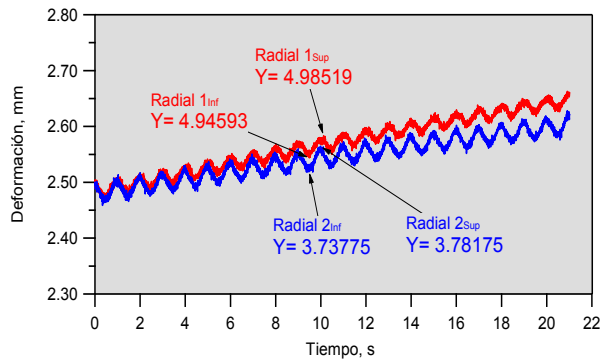


Figura A.168 Amplitud de 0.60 mm.

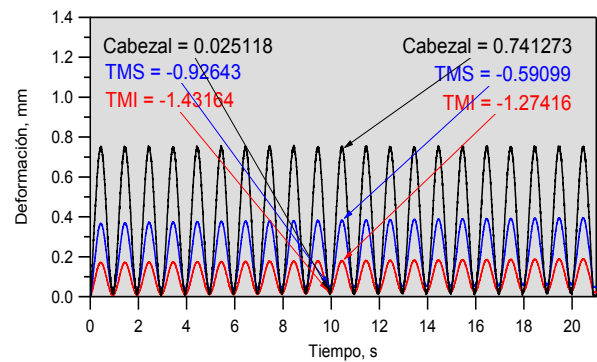
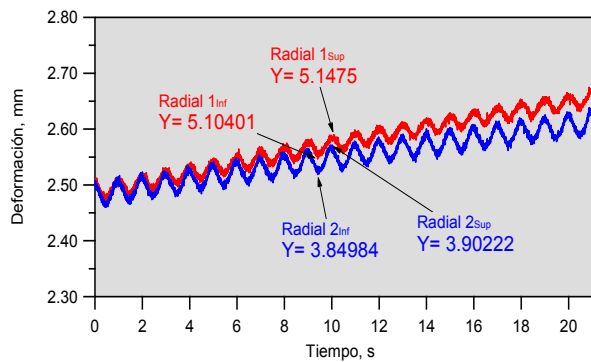


Figura A.169 Amplitud de 0.70 mm.

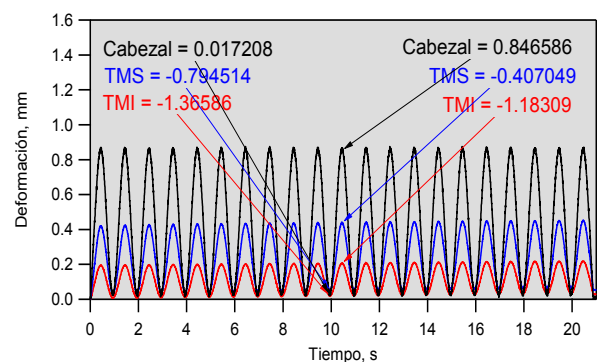
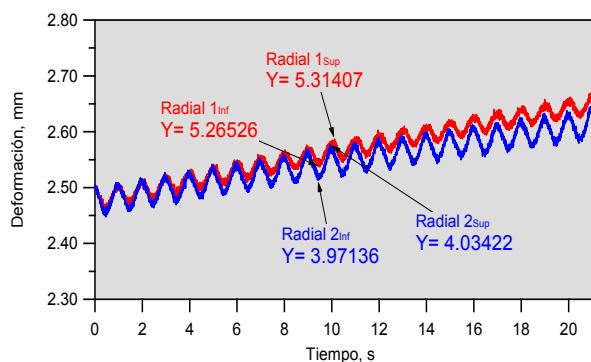


Figura A.170 Amplitud de 0.80 mm.

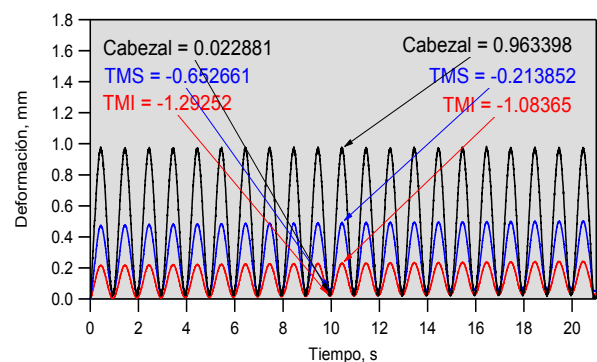
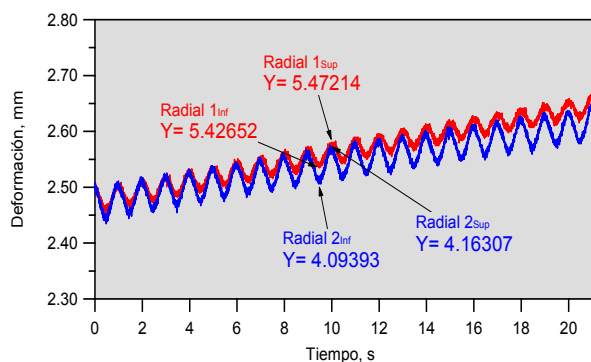


Figura A.171 Amplitud de 0.90 mm.

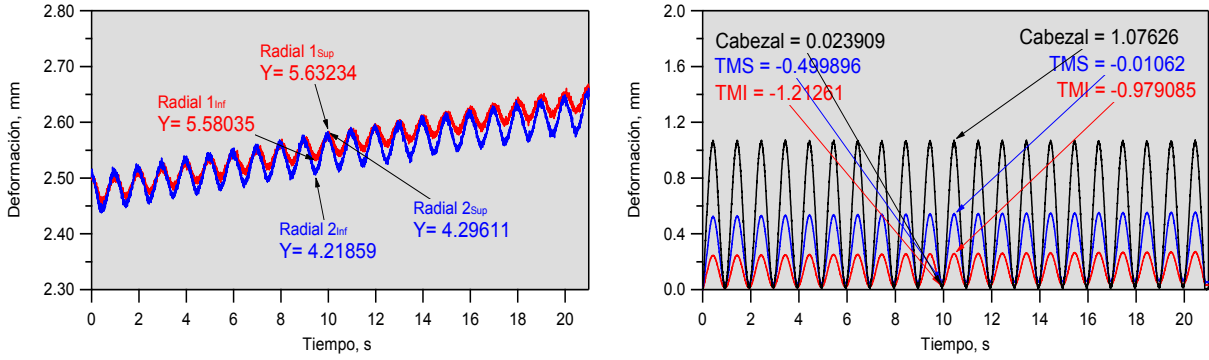


Figura A.172 Amplitud de 1.00 mm.

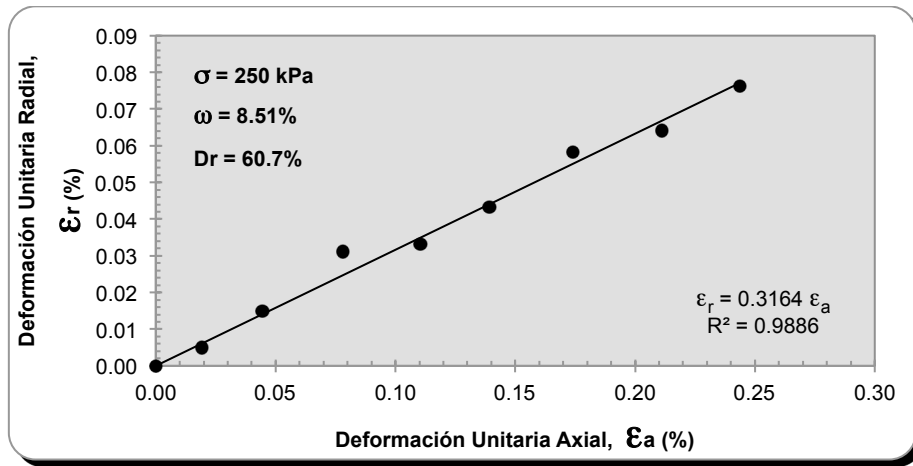


Figura A.173 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

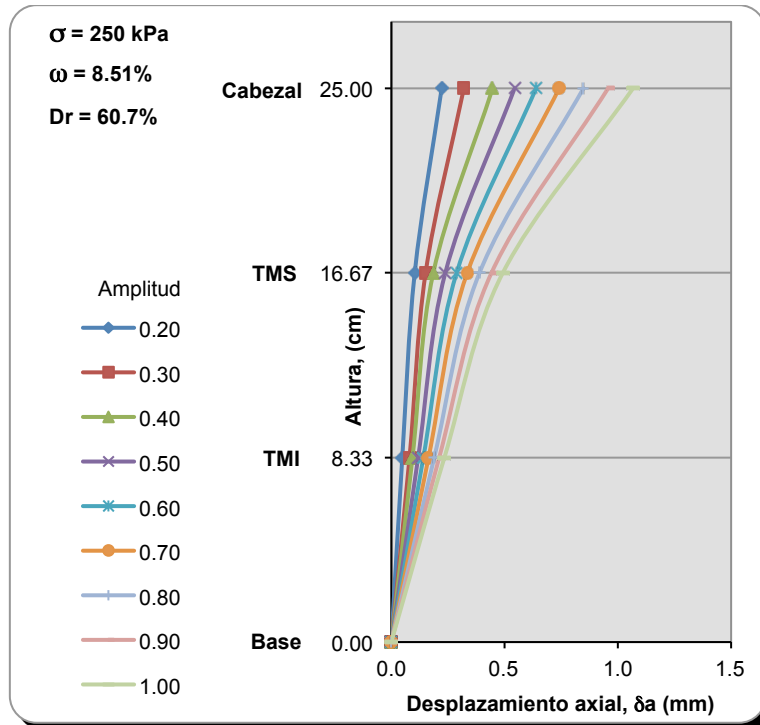
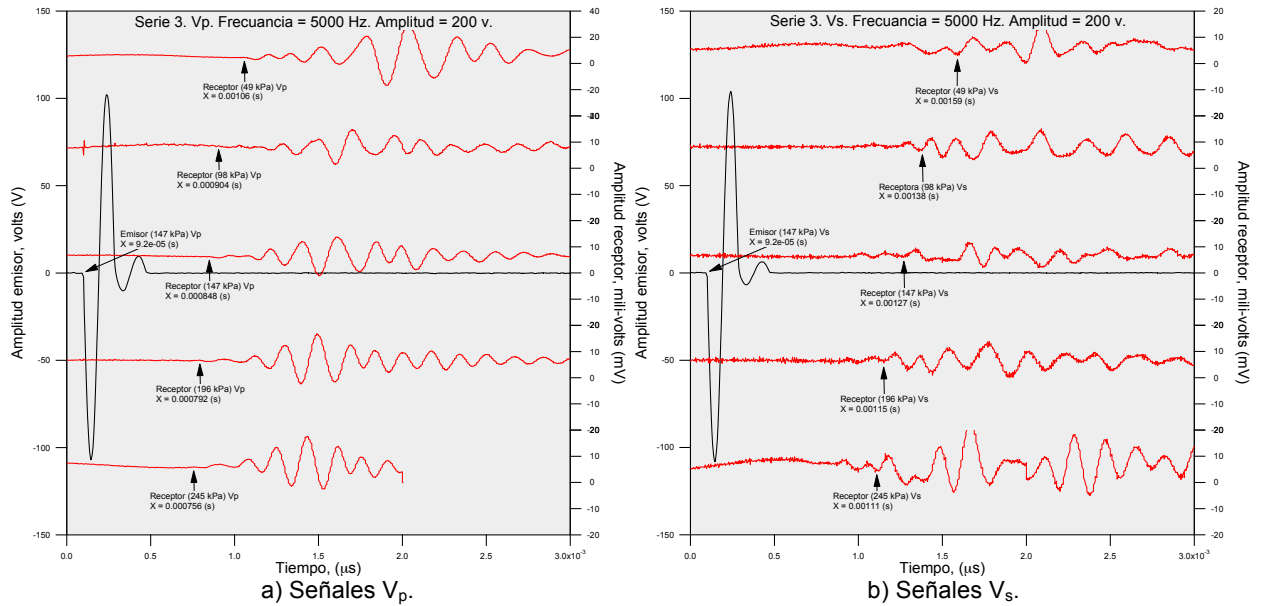
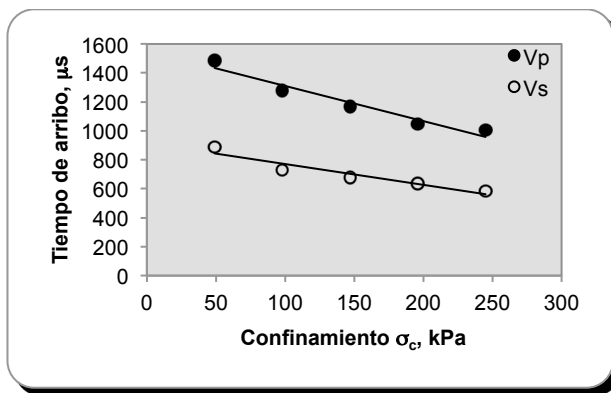


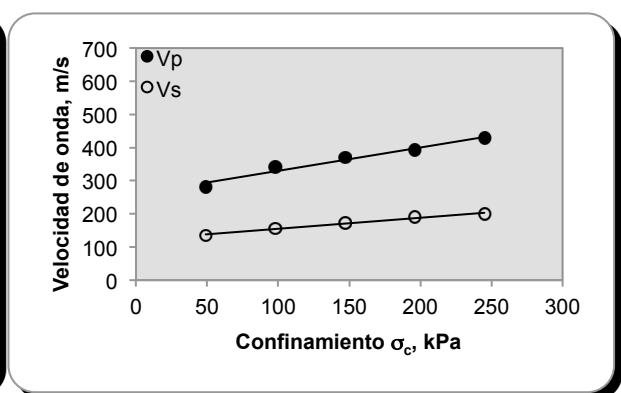
Figura A.174 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.



A.175 Análisis de arribo de señales  $V_p$  y  $V_s$  (serie 3)

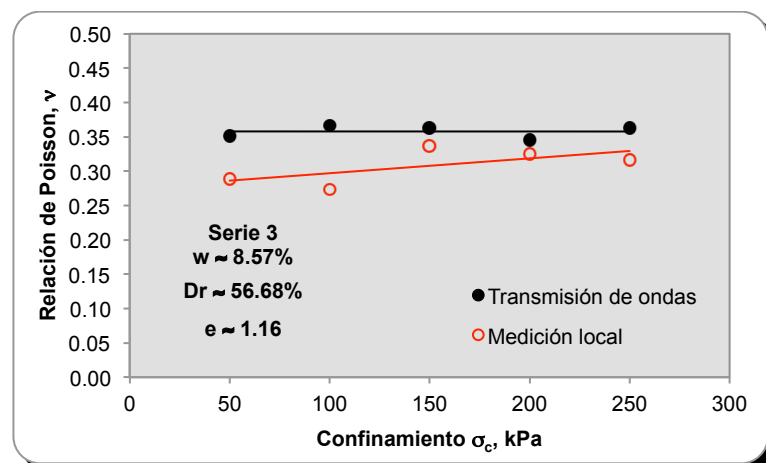


a) Tiempo de arribo.



b) Velocidades de ondas P y S

A.176 Comportamiento del tiempo de arribo y velocidad de onda con respecto al esfuerzo de confinamiento.



A.177 Comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento.

Serie 4.  $\omega \approx 12.60$ ;  $Wp = 6kg$  ( $Dr \approx 40.8$ ;  $e \approx 1.31$ )

Tabla A-7 Resultados del contenido de agua obtenidos para la serie 4

Confinamiento kPa	$W_{pison}$ kg	Contenido de agua				
		N° cápsula	Tara g	$W_{mh+t}$ g	$W_{ms+t}$ g	w %
50	0.50	51	118.10	224.42	212.50	12.63
100	0.50	51	118.10	254.90	239.50	12.69
150	0.50	78	123.80	220.50	209.70	12.57
200	0.50	51	118.60	225.80	213.90	12.49
250	0.50	59	119.86	237.40	224.20	12.65

Tabla A-8 Resultados calculados (serie 4).

Etapa kPa	Radio mm	Volumen cm <sup>3</sup>	e	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	Dr(%)
molde	50.70	2018.86	1.517	1.045	10.3
50	48.29	1831.47	1.283	1.152	39.3
100	48.20	1825.00	1.277	1.155	40.1
150	48.11	1817.91	1.275	1.156	40.4
200	48.04	1812.92	1.263	1.162	41.8
250	47.95	1806.09	1.258	1.165	42.5

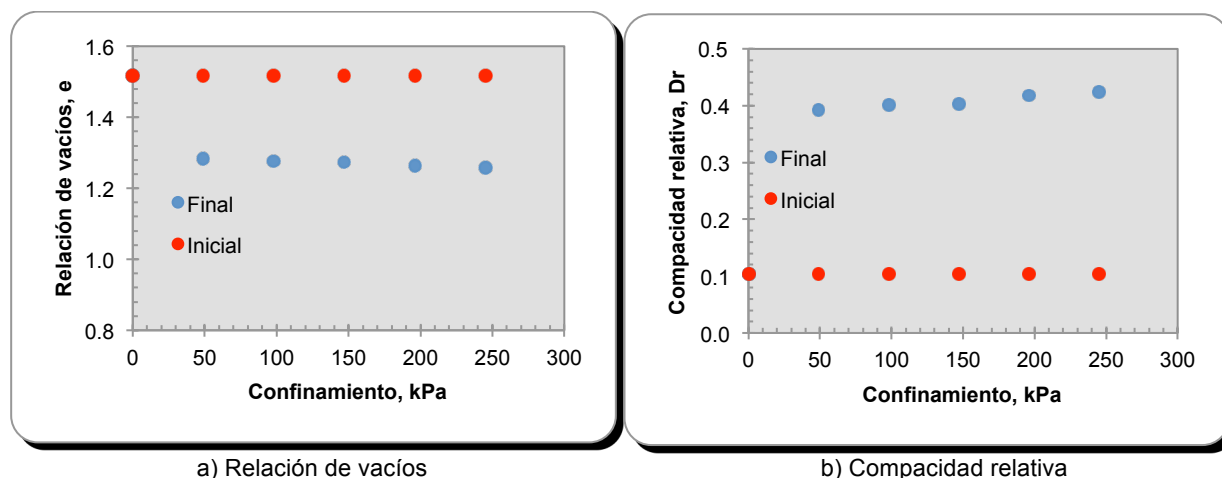


Figura A.178 Variación de la relación de vacíos y compacidad relativa, respecto al esfuerzo de confinamiento (serie 4).

• Serie 4 (0.5kPa)

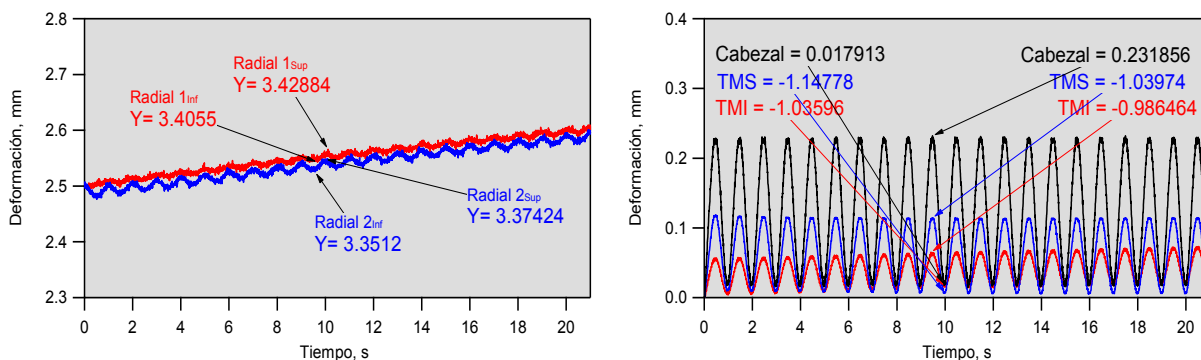


Figura A.179 Amplitud de 0.20 mm.

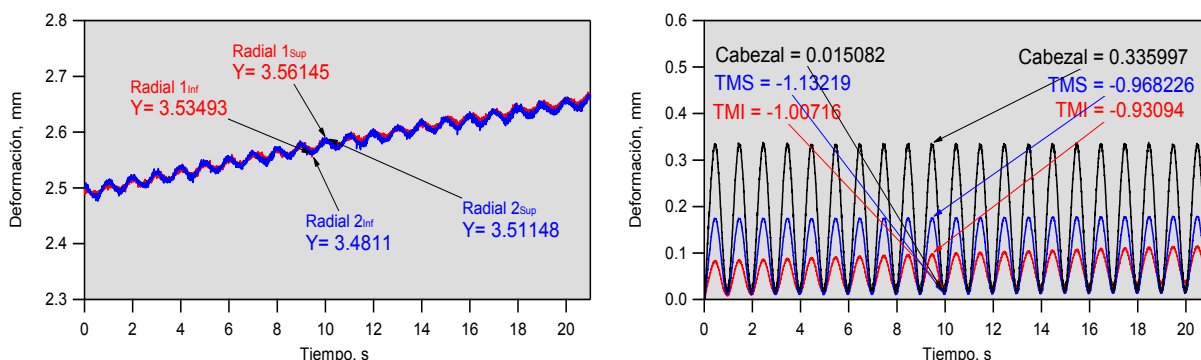


Figura A.180 Amplitud de 0.30 mm.

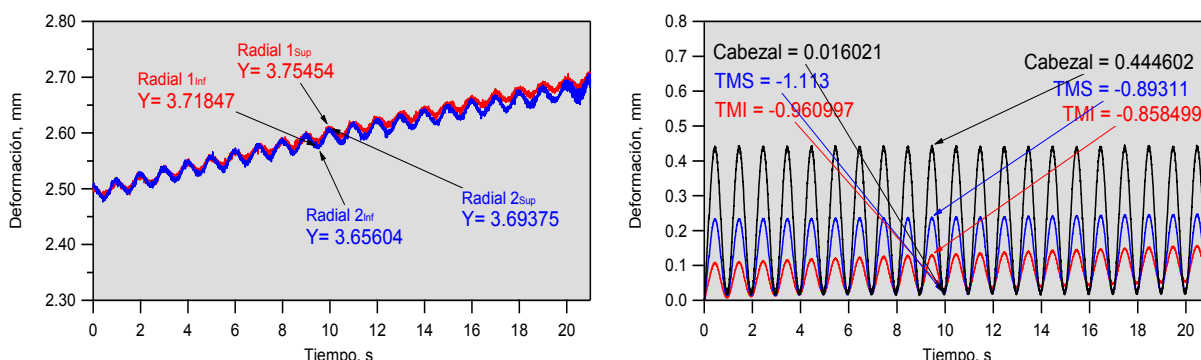


Figura A.181 Amplitud de 0.40 mm.

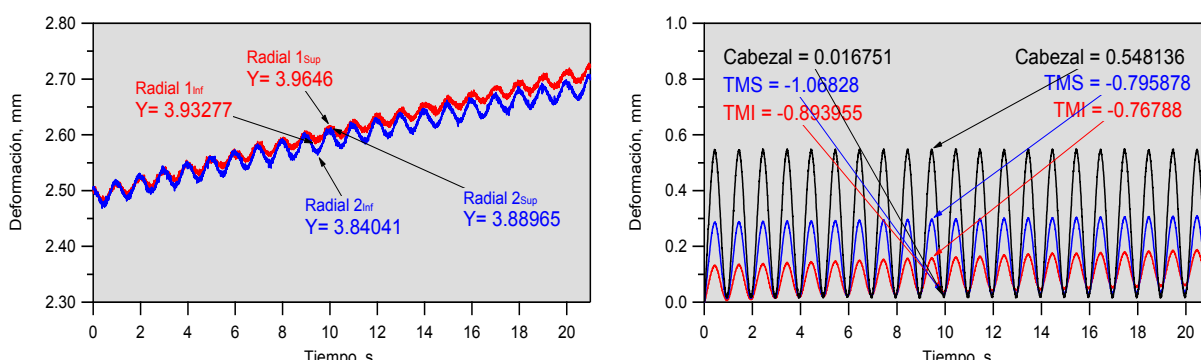


Figura A.182 Amplitud de 0.50 mm.



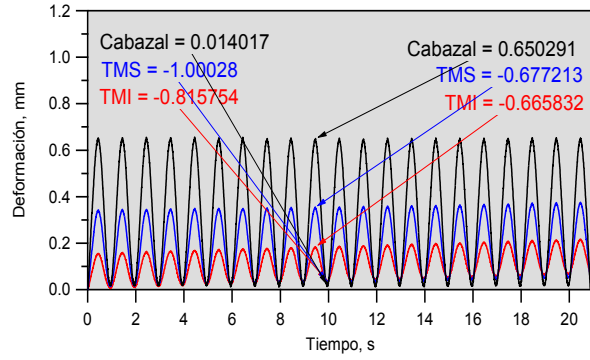
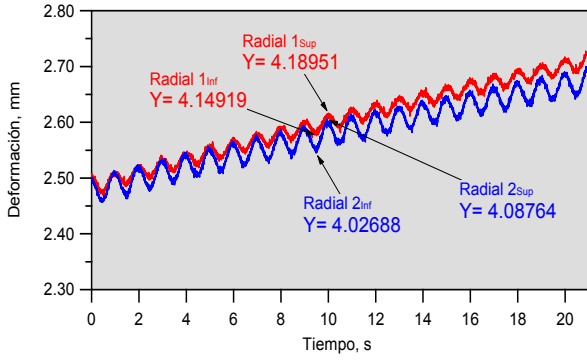


Figura A.183 Amplitud de 0.60 mm.

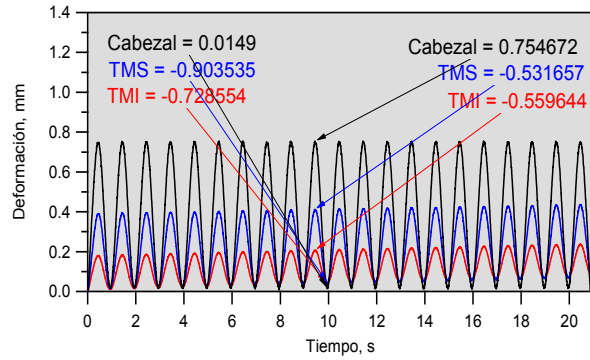
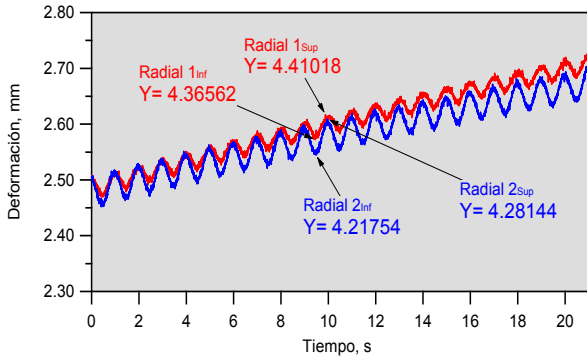


Figura A.184 Amplitud de 0.70 mm.

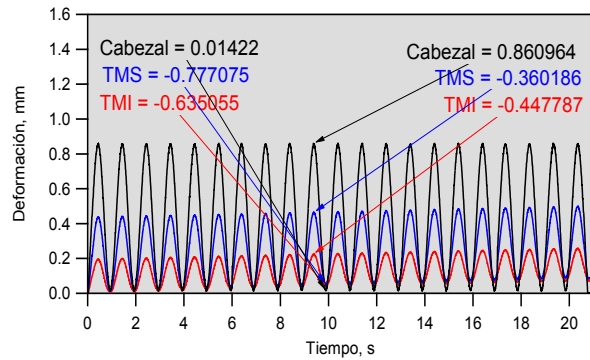
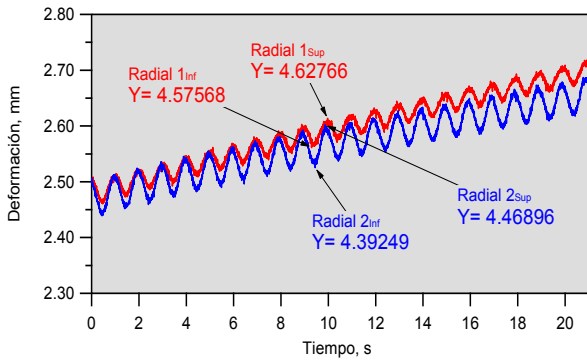


Figura A.185 Amplitud de 0.80 mm.

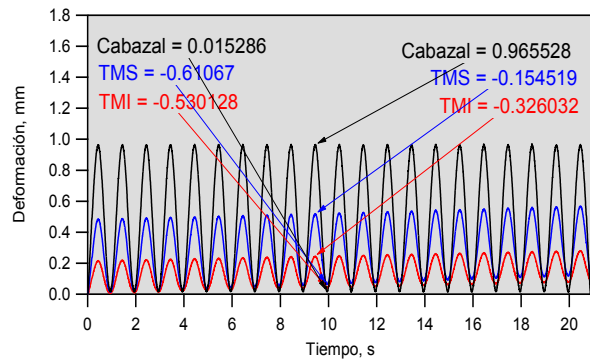
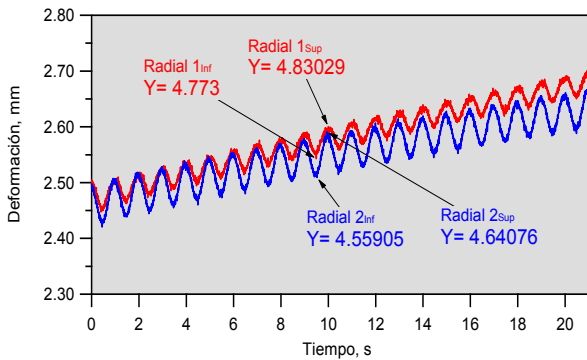


Figura A.186 Amplitud de 0.90 mm.

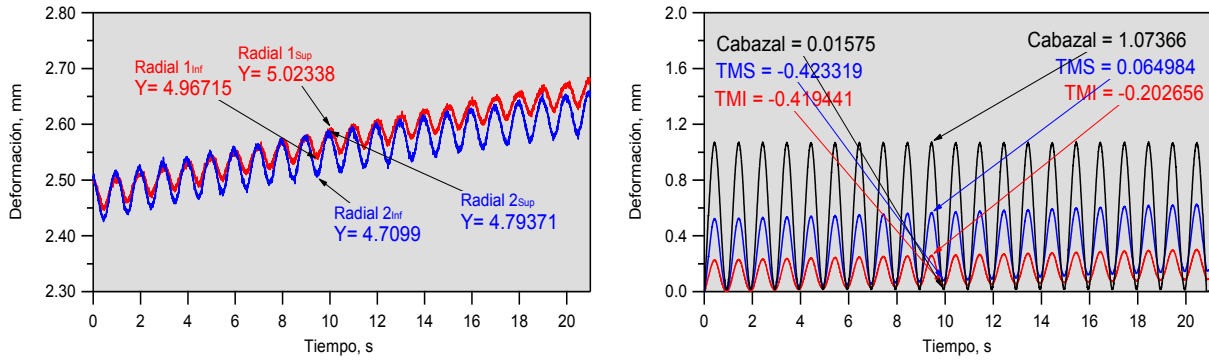


Figura A.187 Amplitud de 1.00 mm.

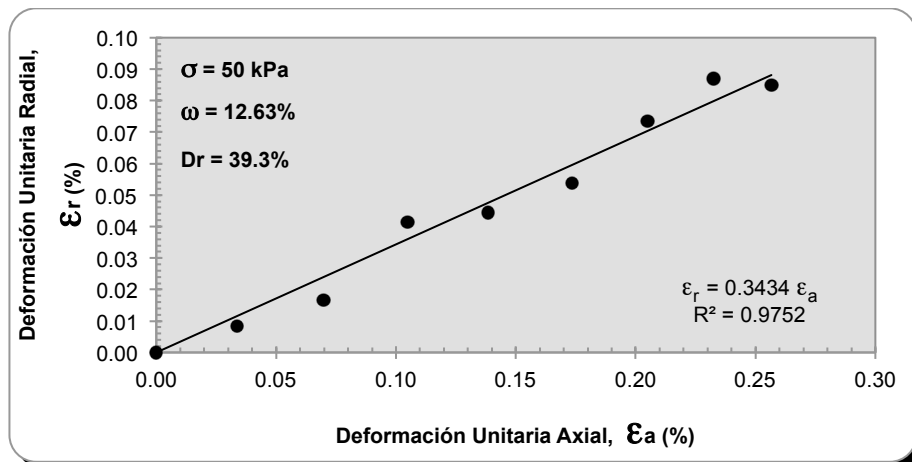


Figura A.188 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

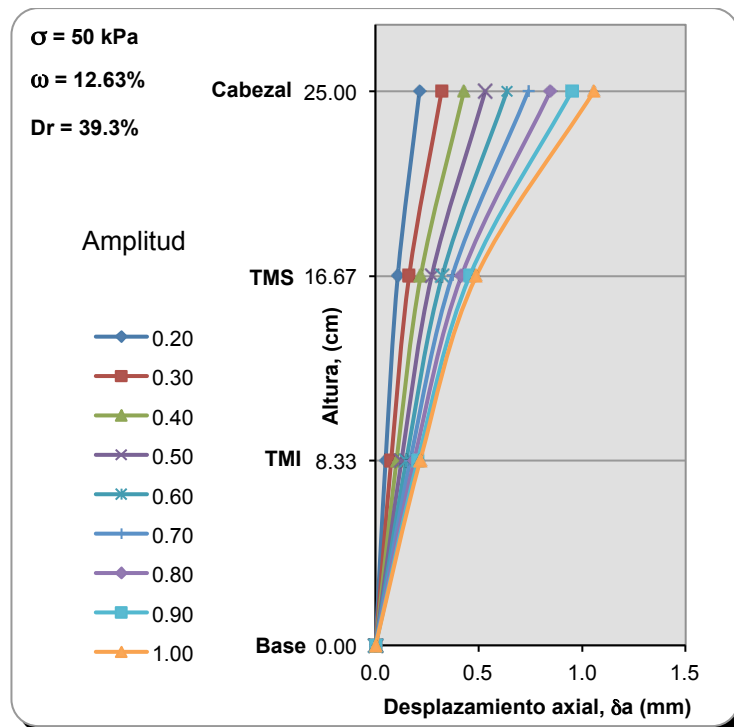


Figura A.189 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 4 (100 kPa)

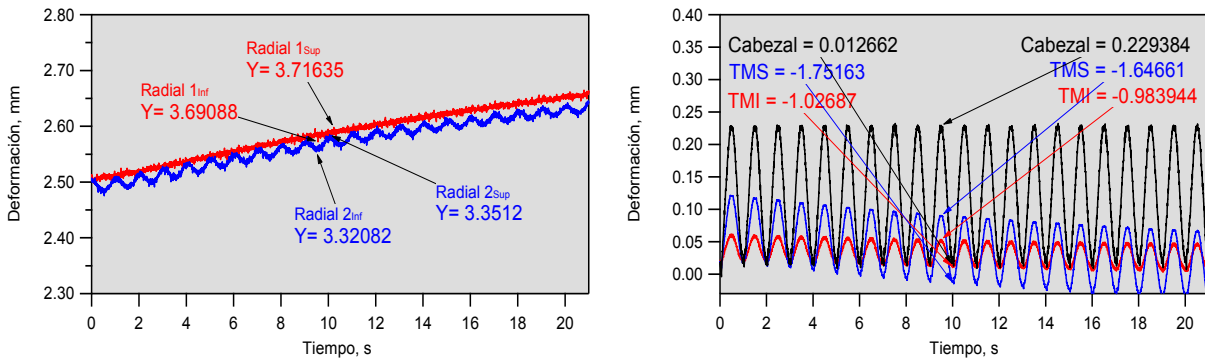


Figura A.190 Amplitud de 0.20 mm.

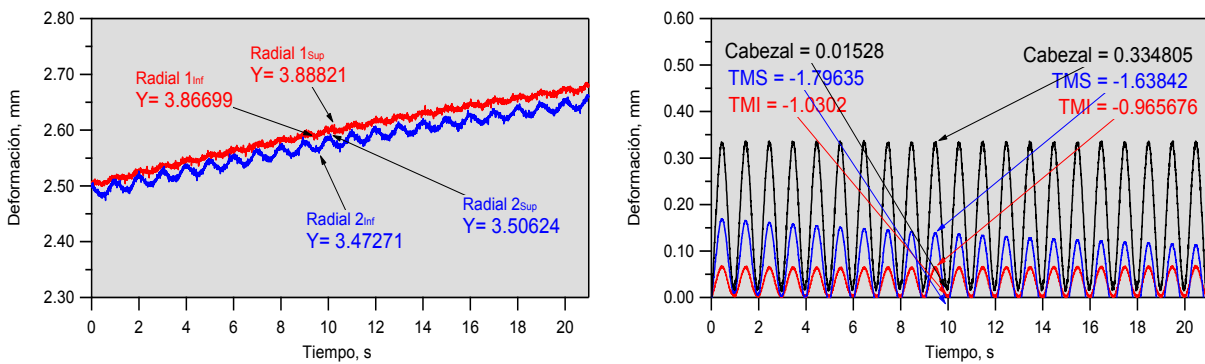


Figura A.191 Amplitud de 0.30 mm.

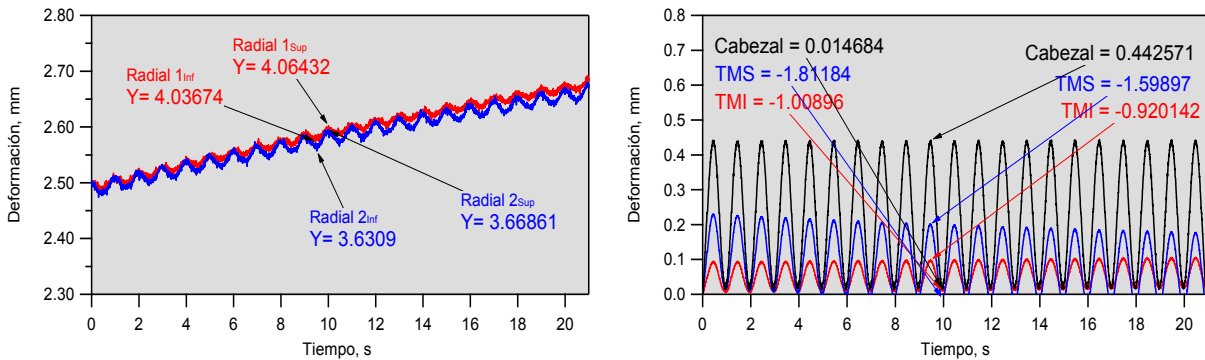


Figura A.192 Amplitud de 0.40 mm.

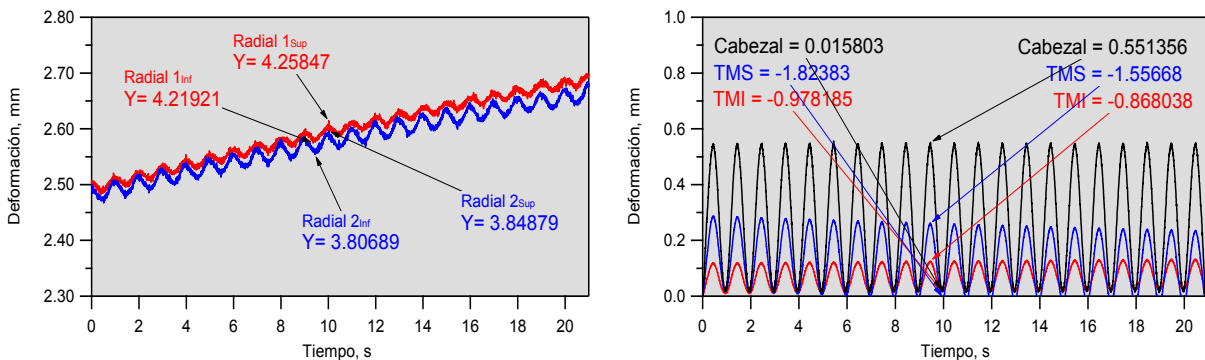


Figura A.193 Amplitud de 0.50 mm.

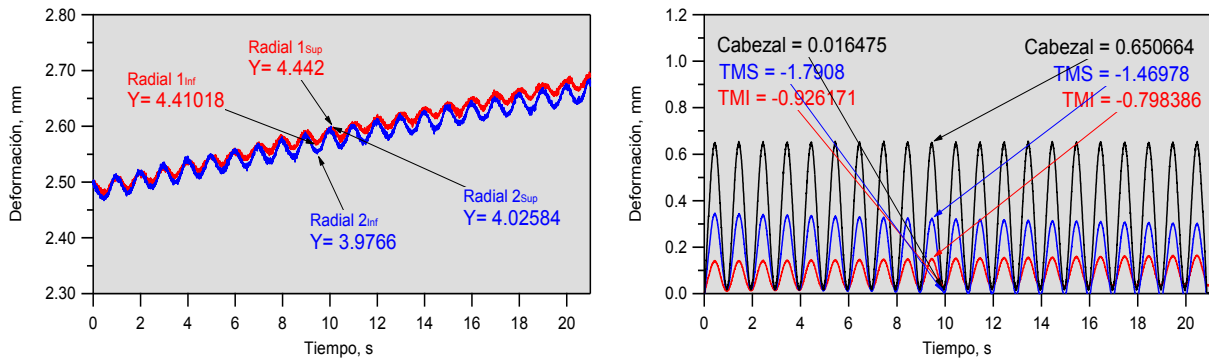


Figura A.194 Amplitud de 0.60 mm.

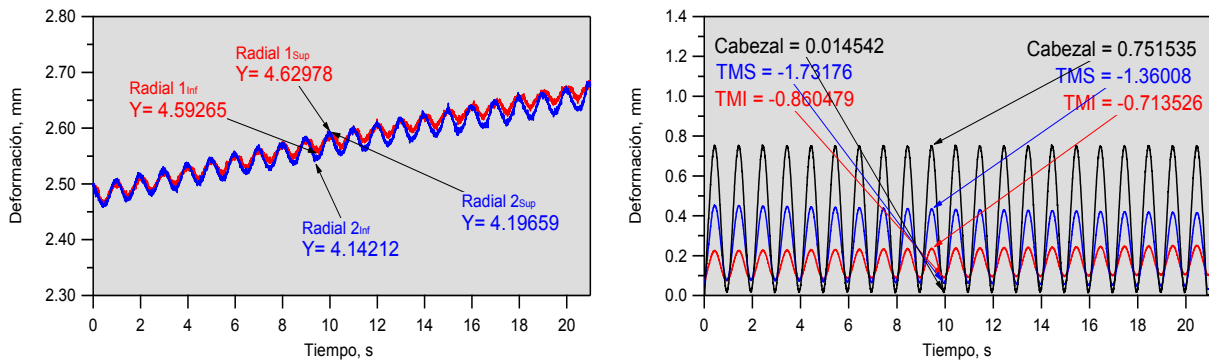


Figura A.195 Amplitud de 0.70 mm.

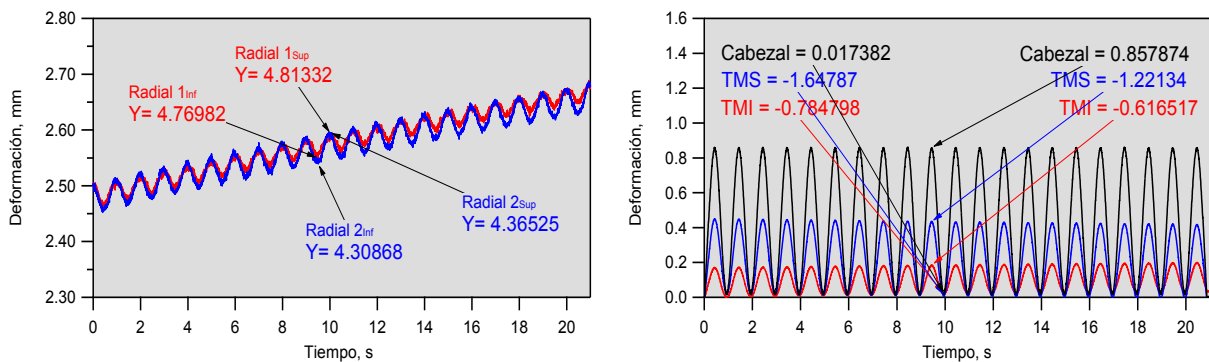


Figura A.196 Amplitud de 0.80 mm.

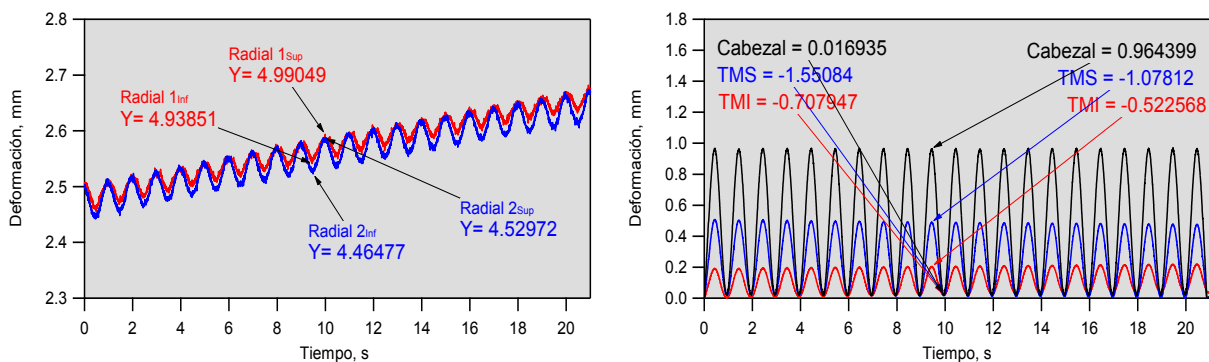


Figura A.197 Amplitud de 0.90 mm.

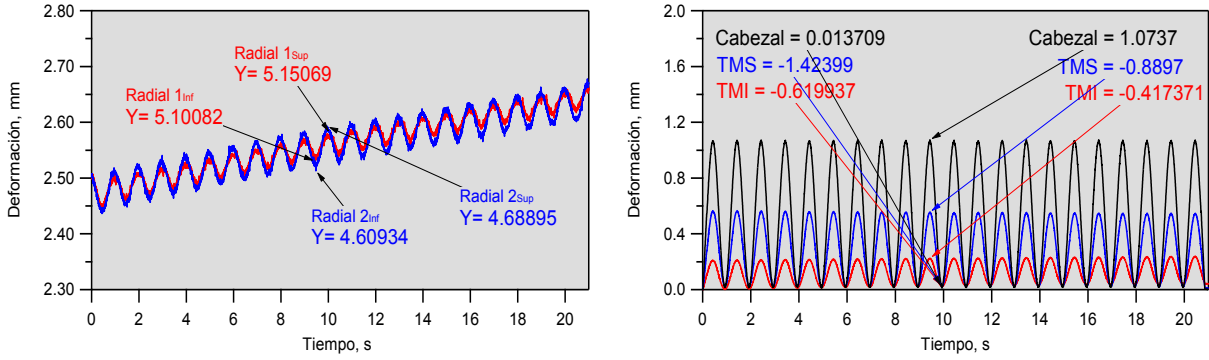


Figura A.198 Amplitud de 1.00 mm.

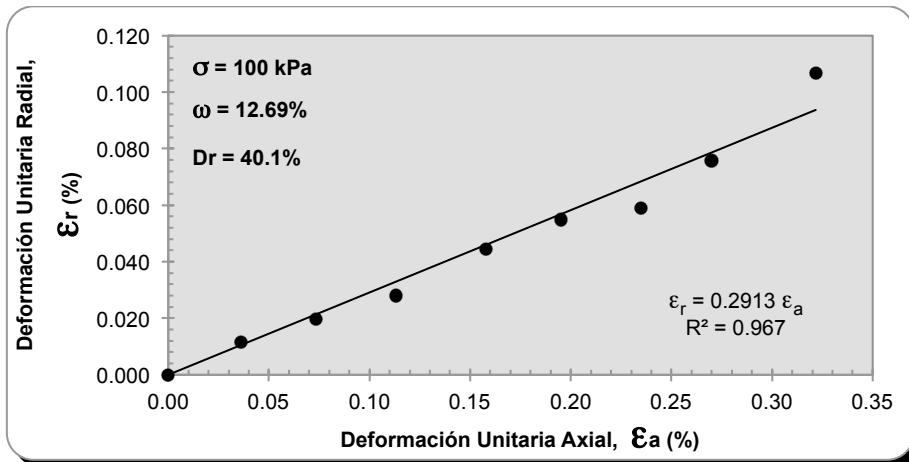


Figura A.199 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

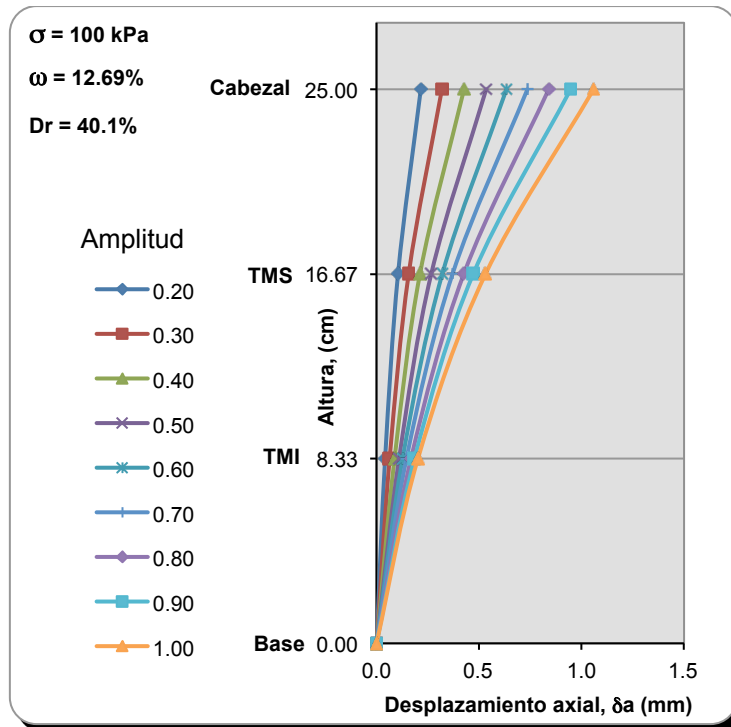


Figura A.200 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 4 (150 kPa)

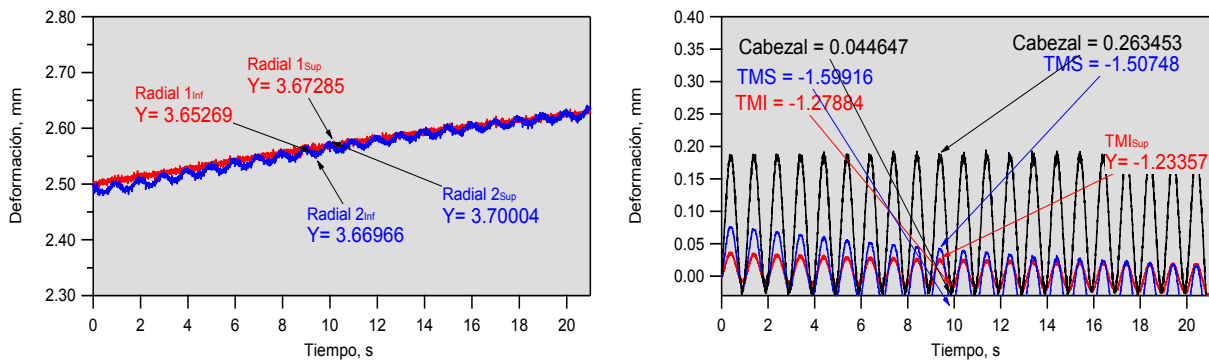


Figura A.201 Amplitud de 0.20 mm.

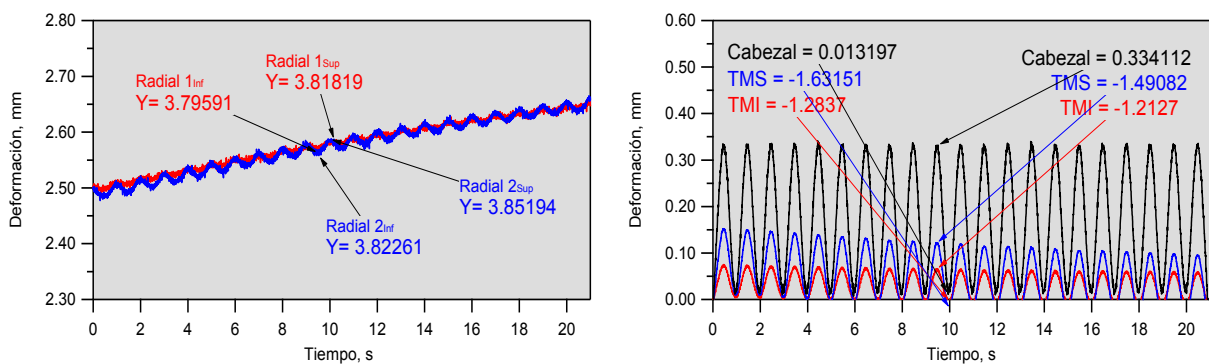


Figura A.202 Amplitud de 0.30 mm.

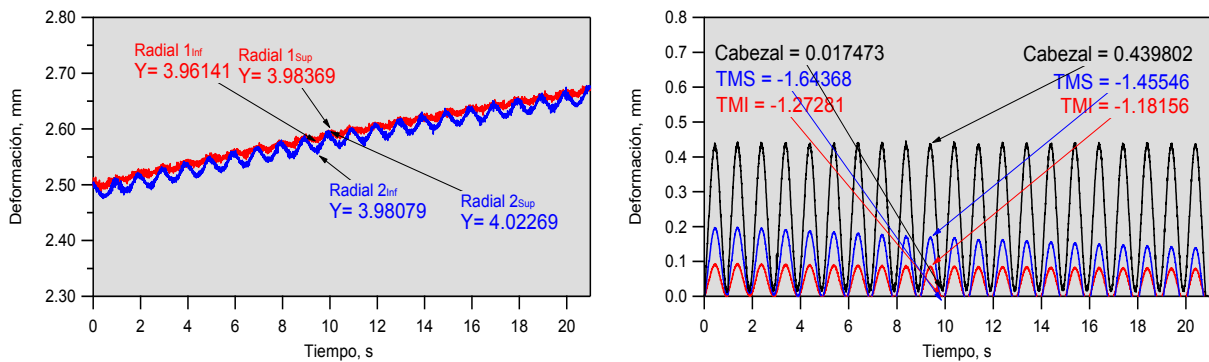


Figura A.203 Amplitud de 0.40 mm.

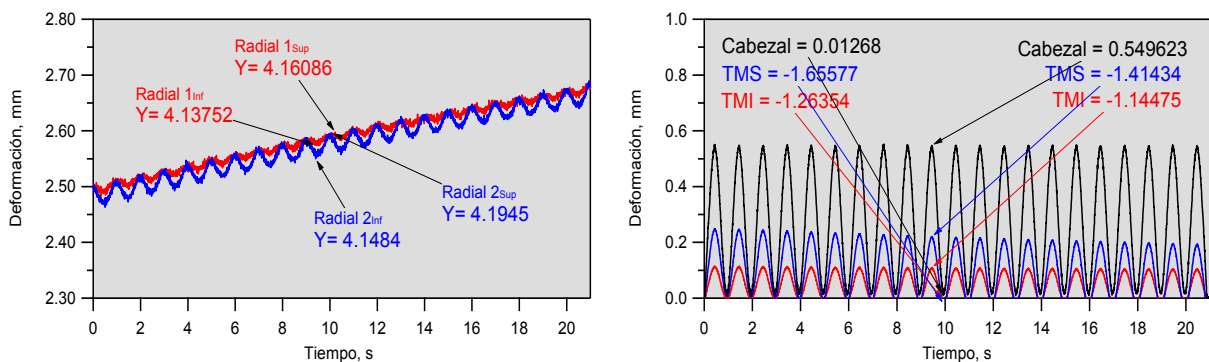


Figura A.204 Amplitud de 0.50 mm.

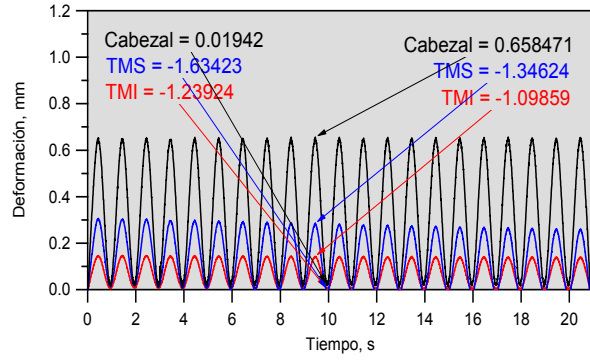
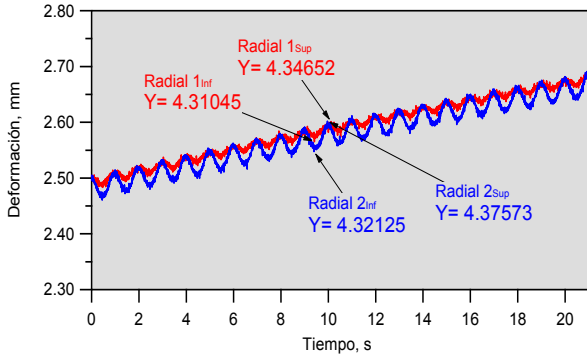


Figura A.205 Amplitud de 0.60 mm.

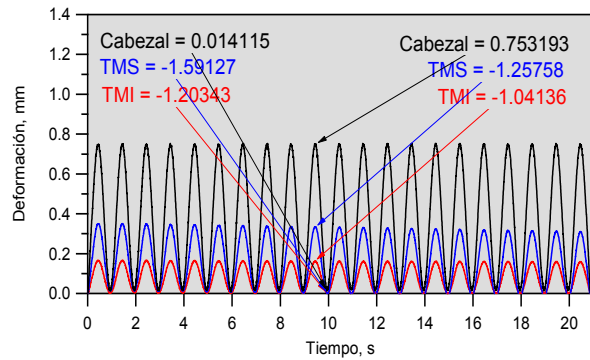
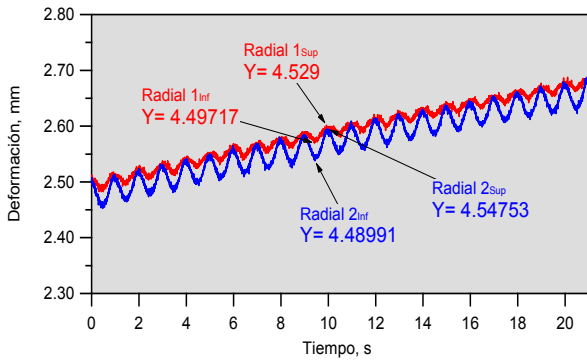


Figura A.206 Amplitud de 0.70 mm.

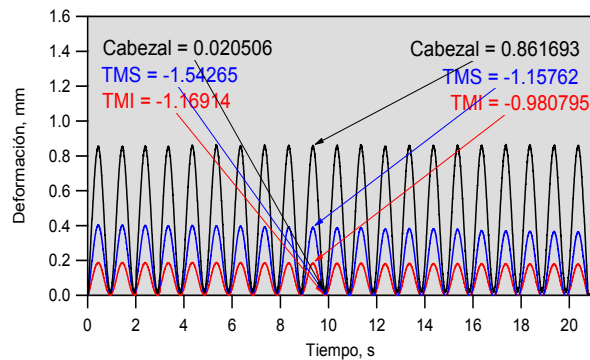
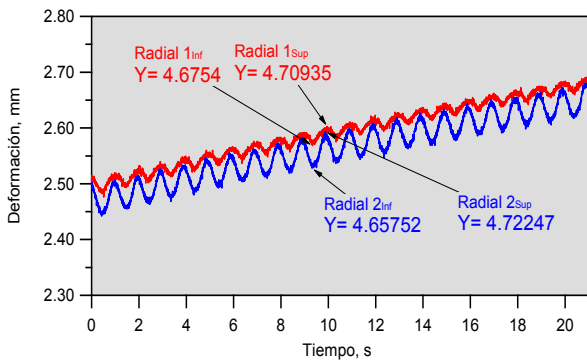


Figura A.207 Amplitud de 0.80 mm.

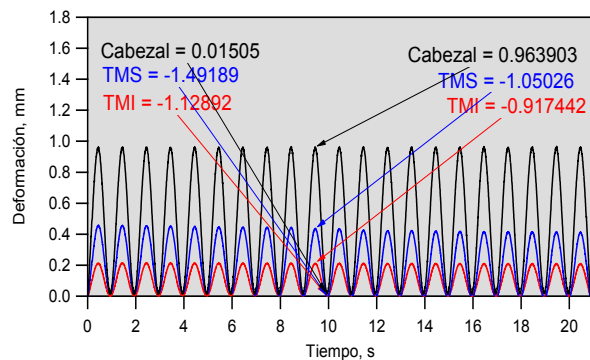
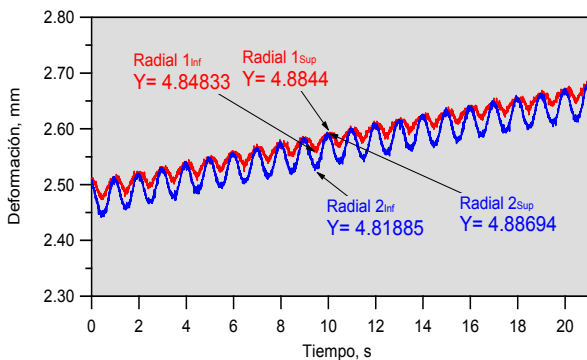


Figura A.208 Amplitud de 0.90 mm.

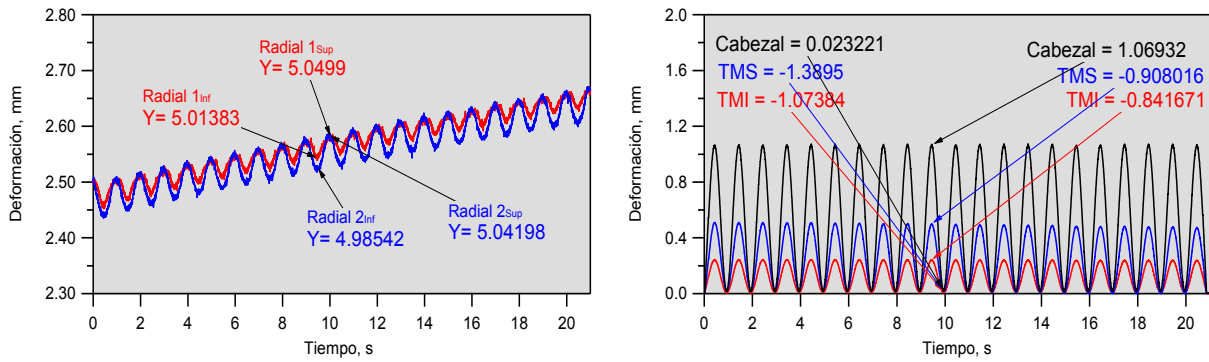


Figura A.209 Amplitud de 1.00 mm.

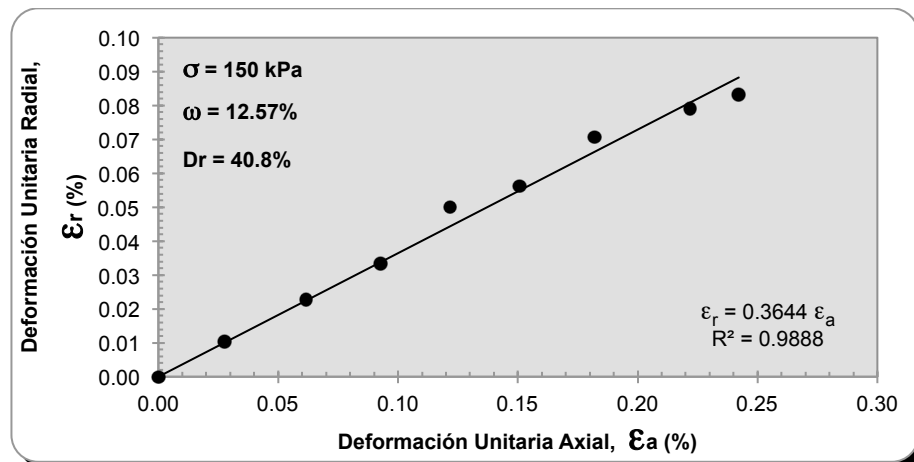


Figura A.210 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

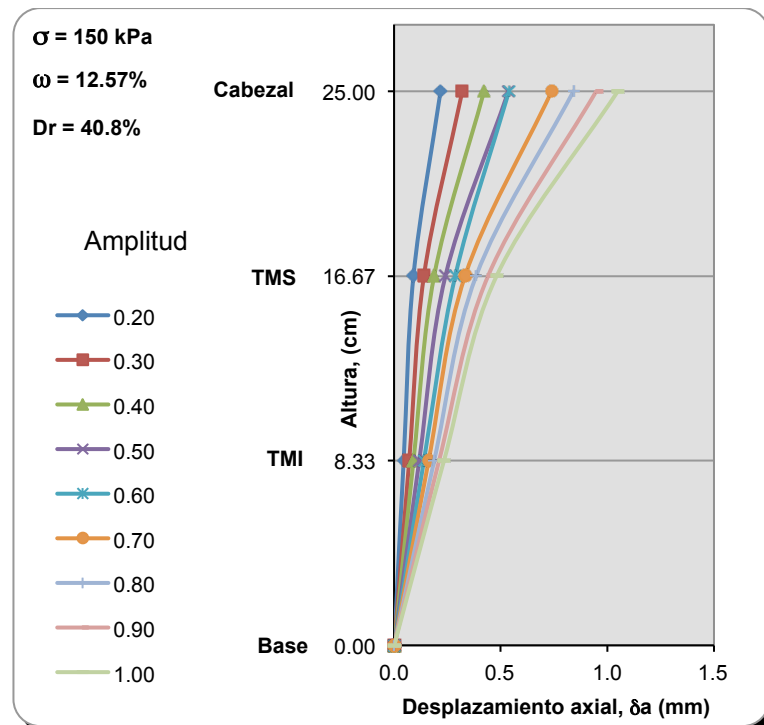


Figura A.211 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.



• Serie 4 (200 kPa)

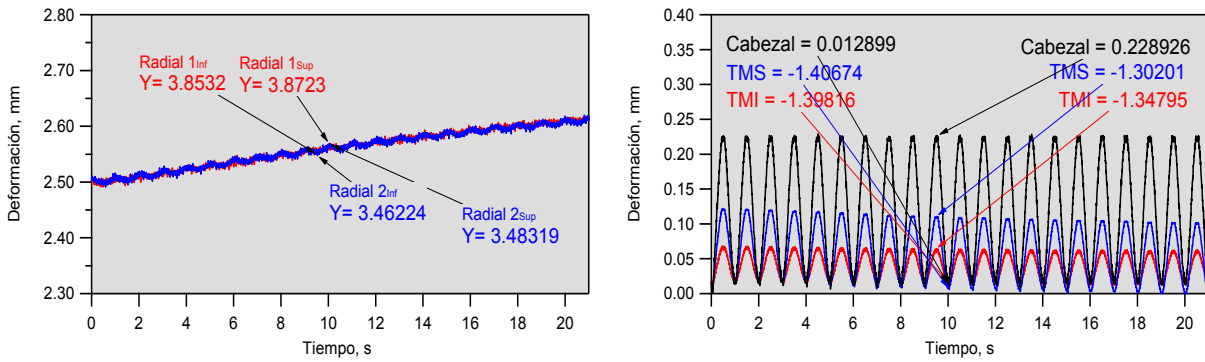


Figura A.212 Amplitud de 0.20 mm.

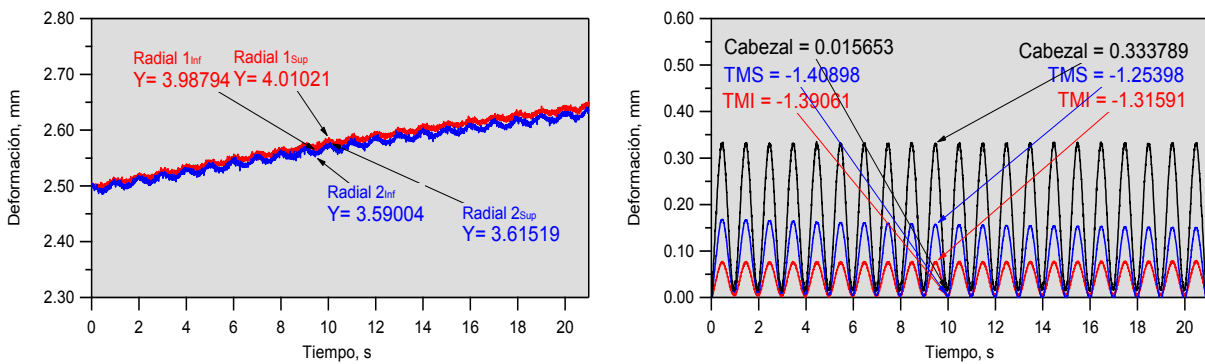


Figura A.213 Amplitud de 0.30 mm.

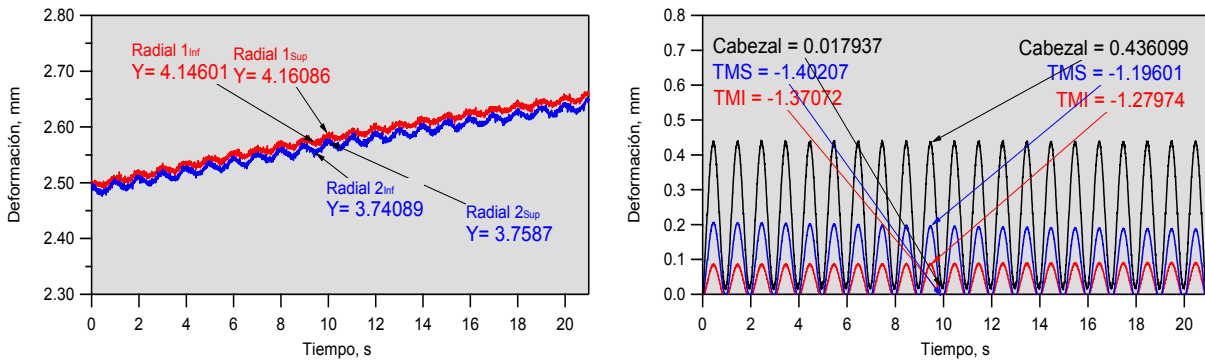


Figura A.214 Amplitud de 0.40 mm.

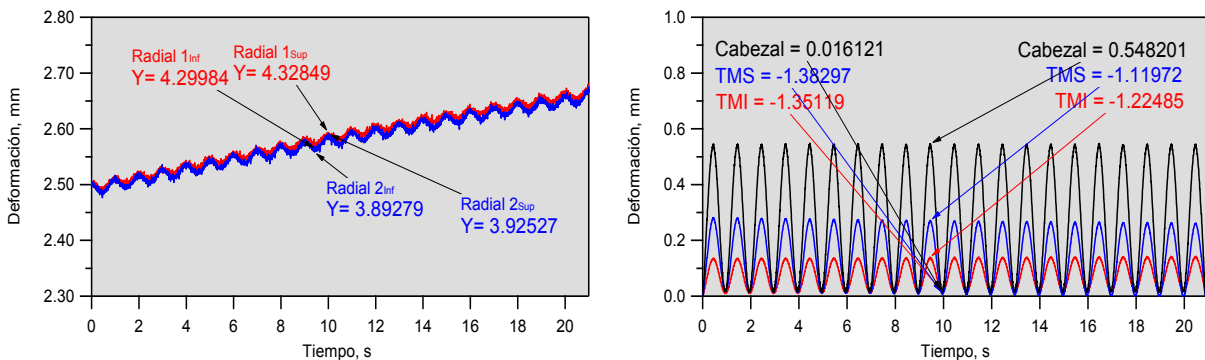


Figura A.215 Amplitud de 0.50 mm.

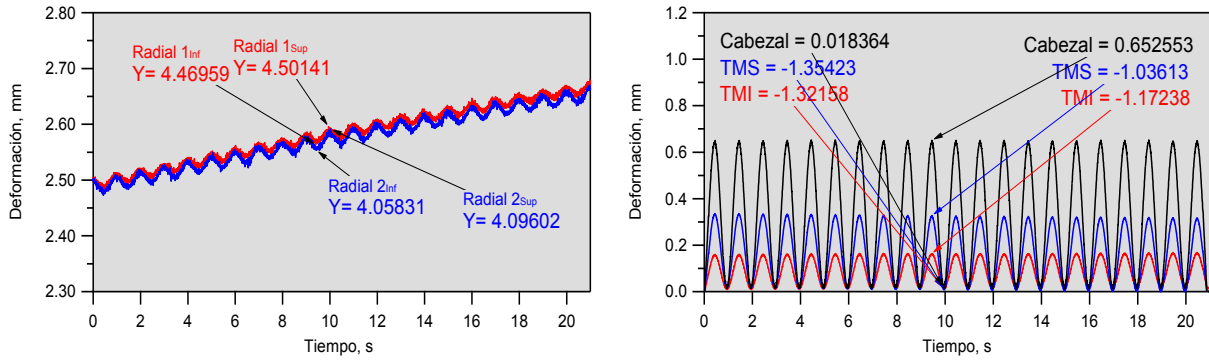


Figura A.216 Amplitud de 0.60 mm.

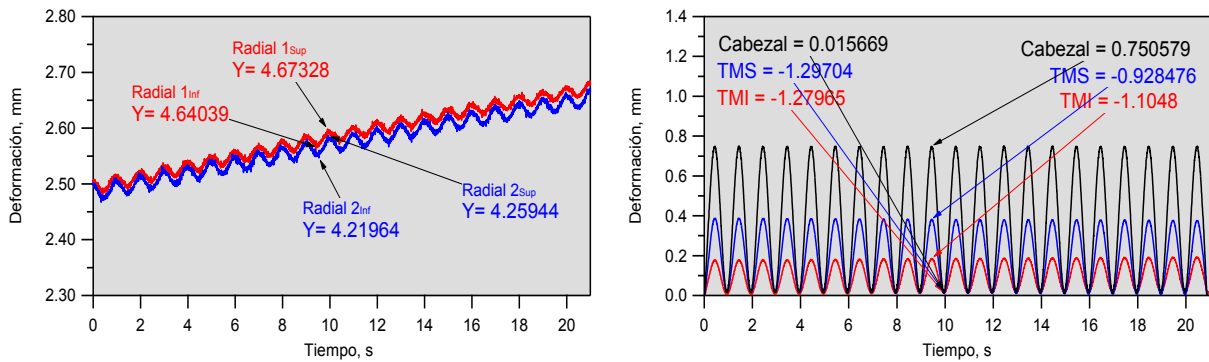


Figura A.217 Amplitud de 0.70 mm.

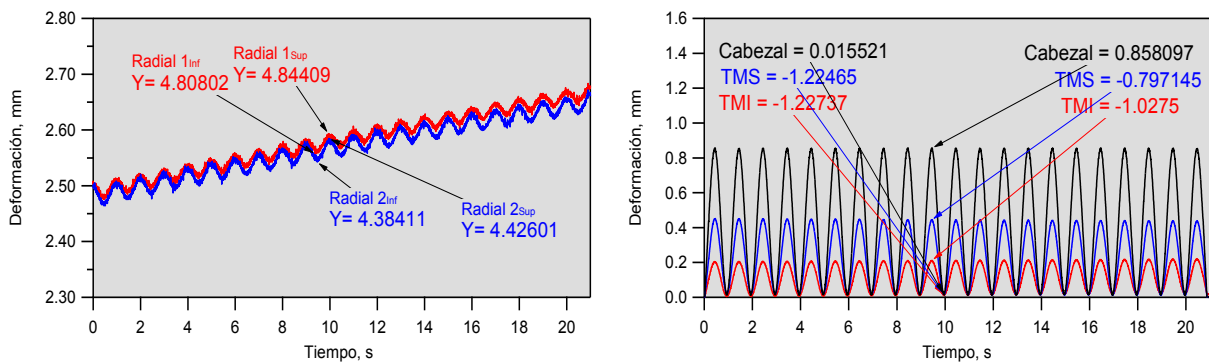


Figura A.218 Amplitud de 0.80 mm.

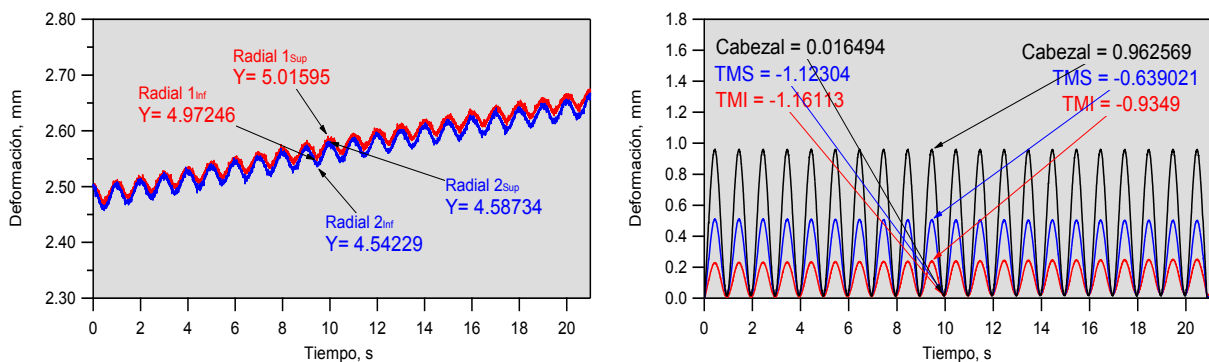


Figura A.219 Amplitud de 0.90 mm.

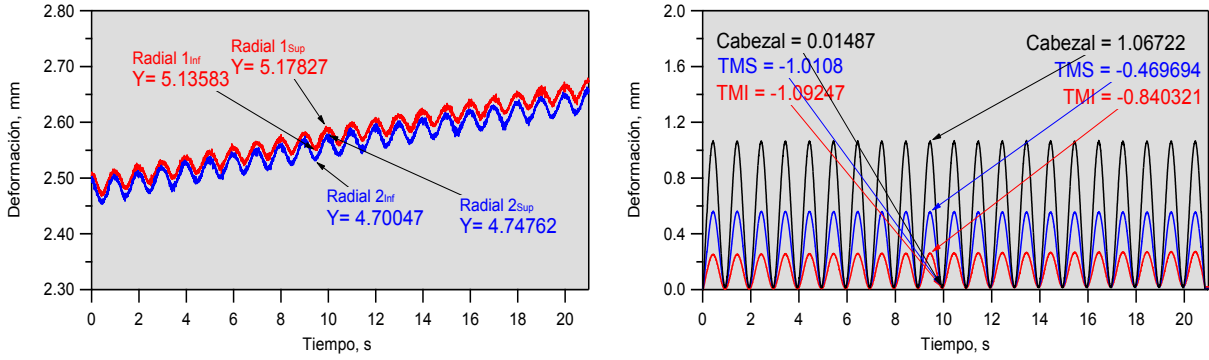


Figura A.220 Amplitud de 1.00 mm.

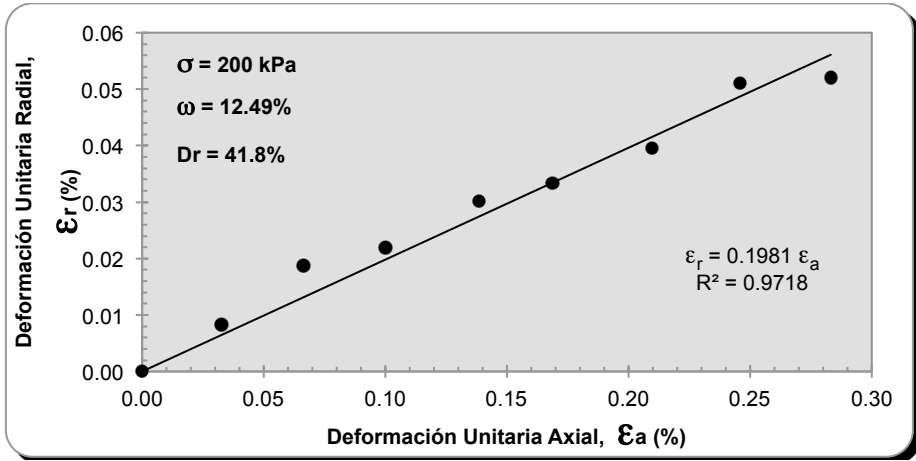


Figura A.221 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

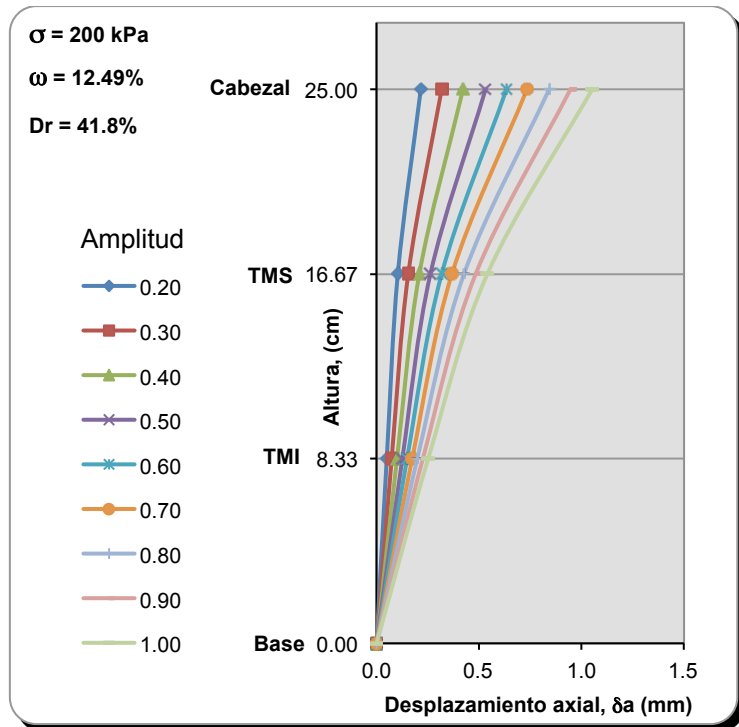


Figura A.222 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.

• Serie 4 (250 kPa)

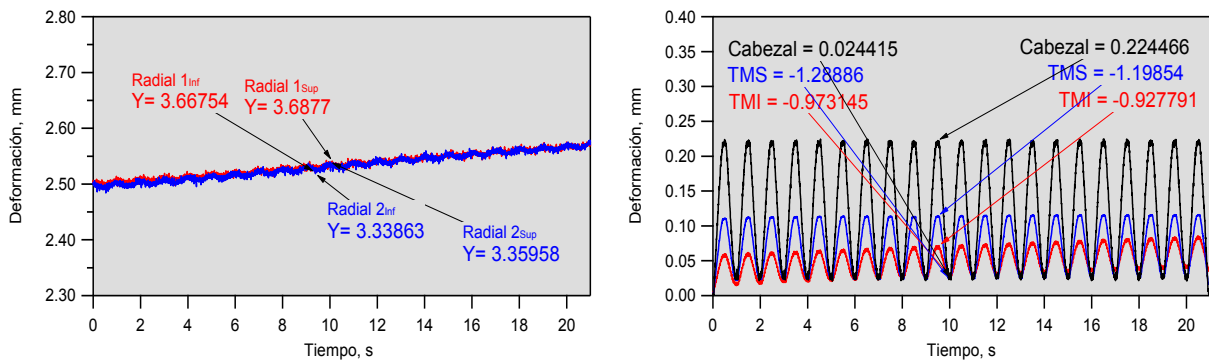


Figura A.223 Amplitud de 0.20 mm.

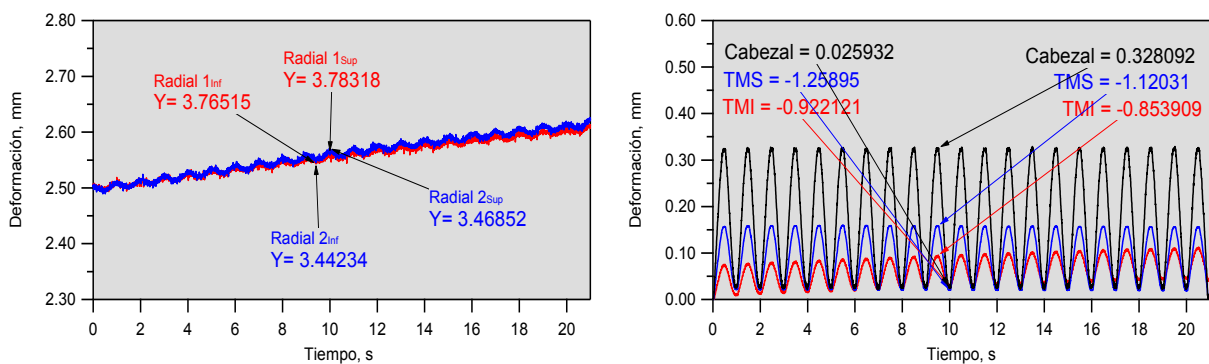


Figura A.224 Amplitud de 0.30 mm.

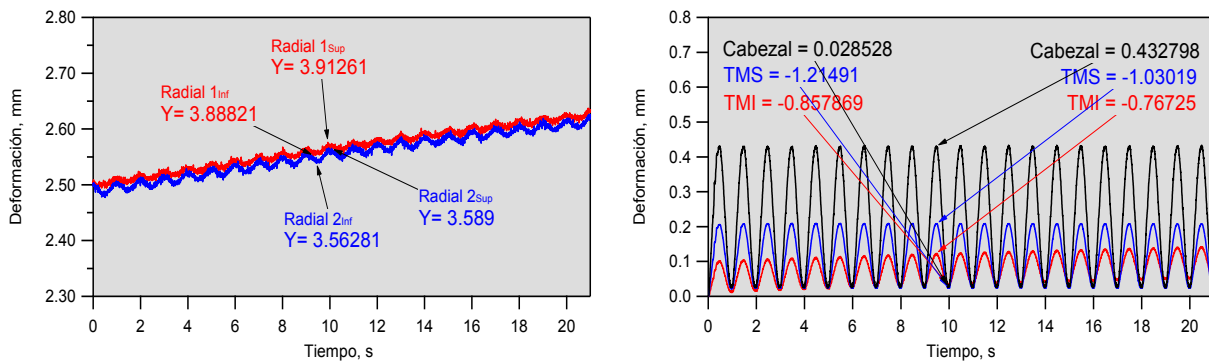


Figura A.225 Amplitud de 0.40 mm.

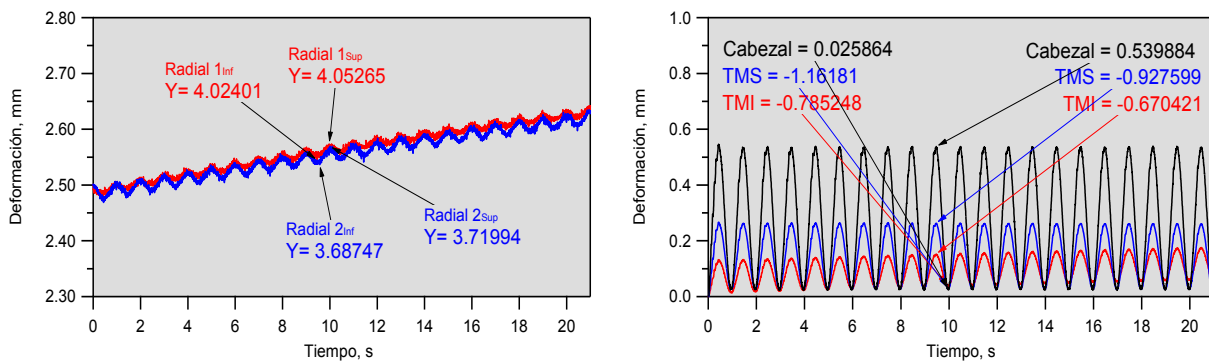


Figura A.226 Amplitud de 0.50 mm.

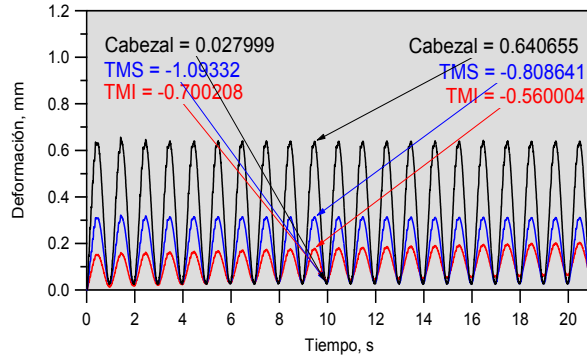
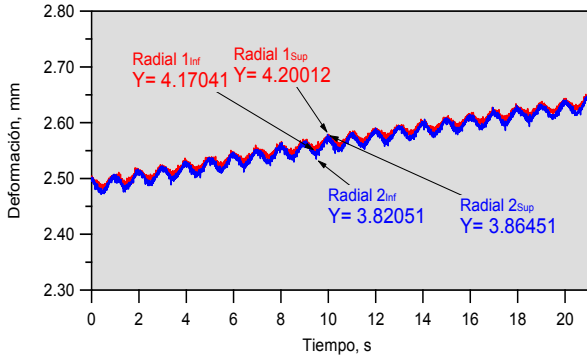


Figura A.227 Amplitud de 0.60 mm.

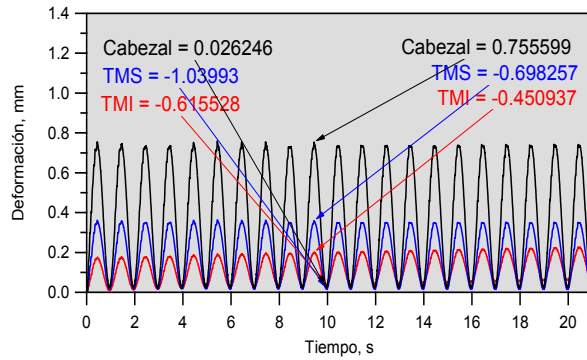
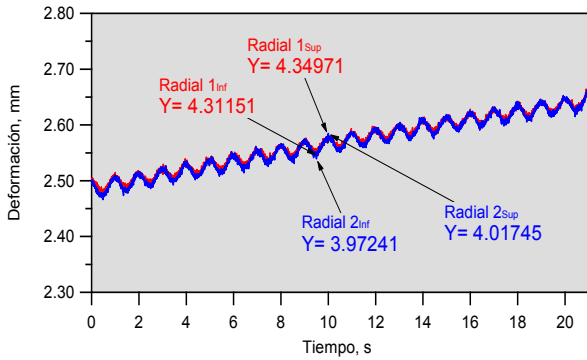


Figura A.228 Amplitud de 0.70 mm.

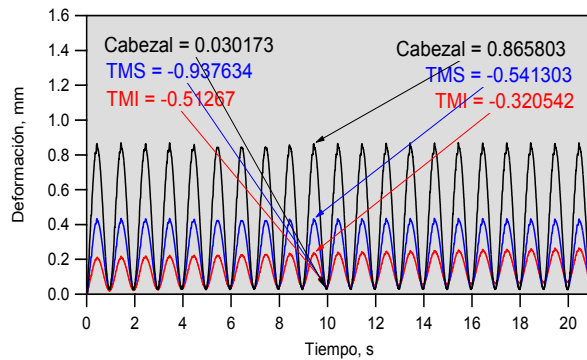
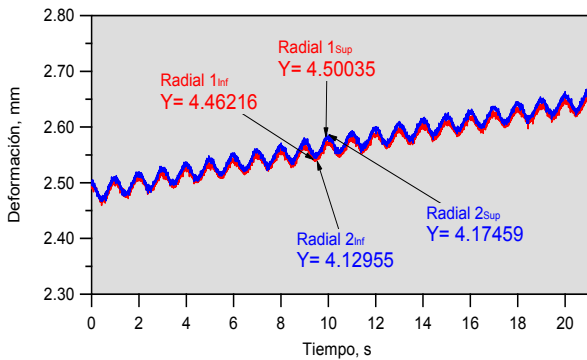


Figura A.229 Amplitud de 0.80 mm.

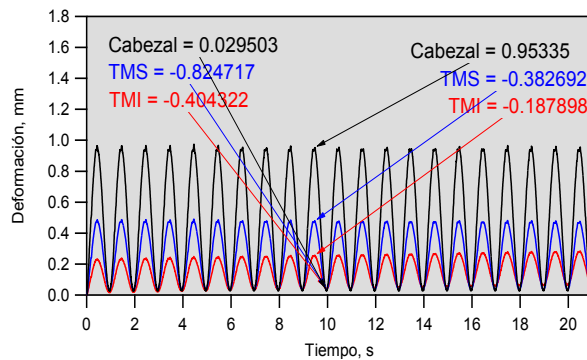
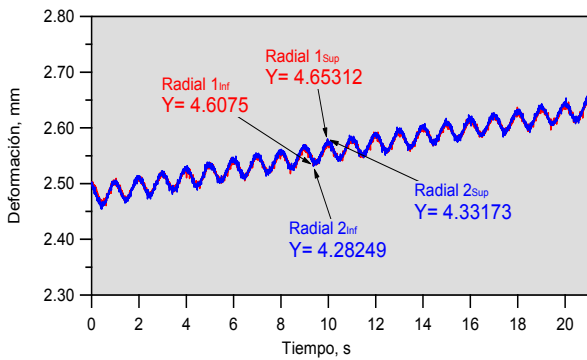


Figura A.230 Amplitud de 0.90 mm.

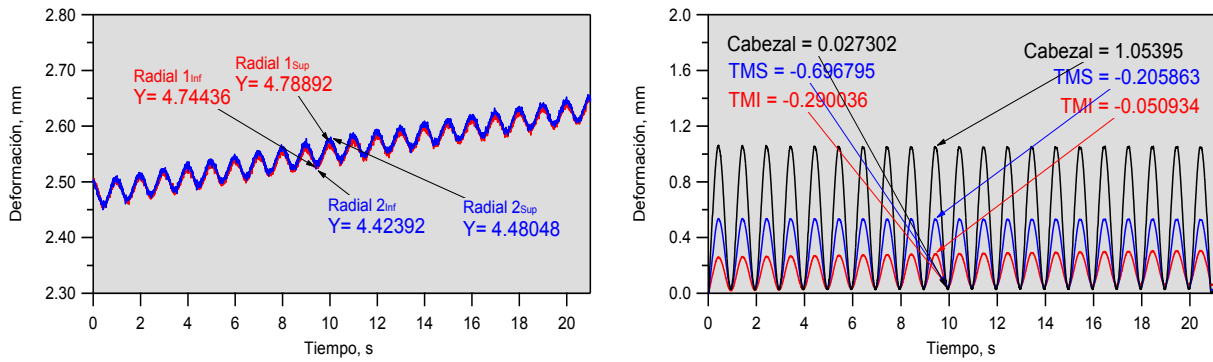


Figura A.231 Amplitud de 1.00 mm.

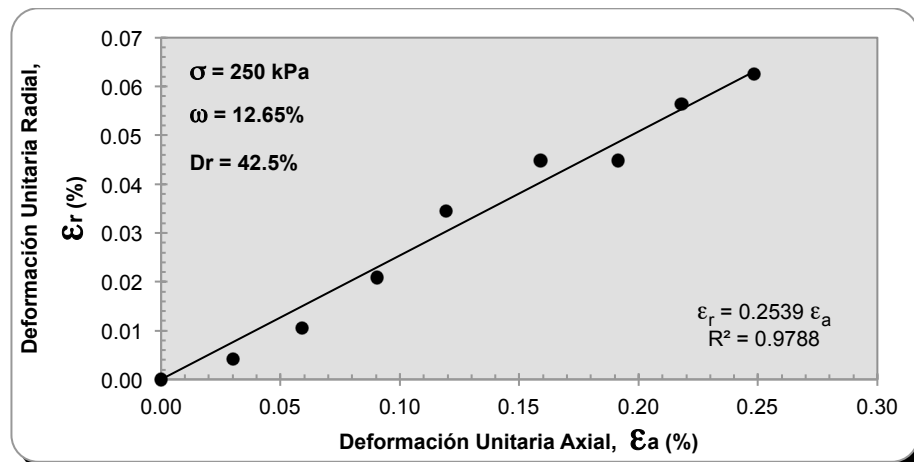


Figura A.232 Determinación de la relación de Poisson dinámica.

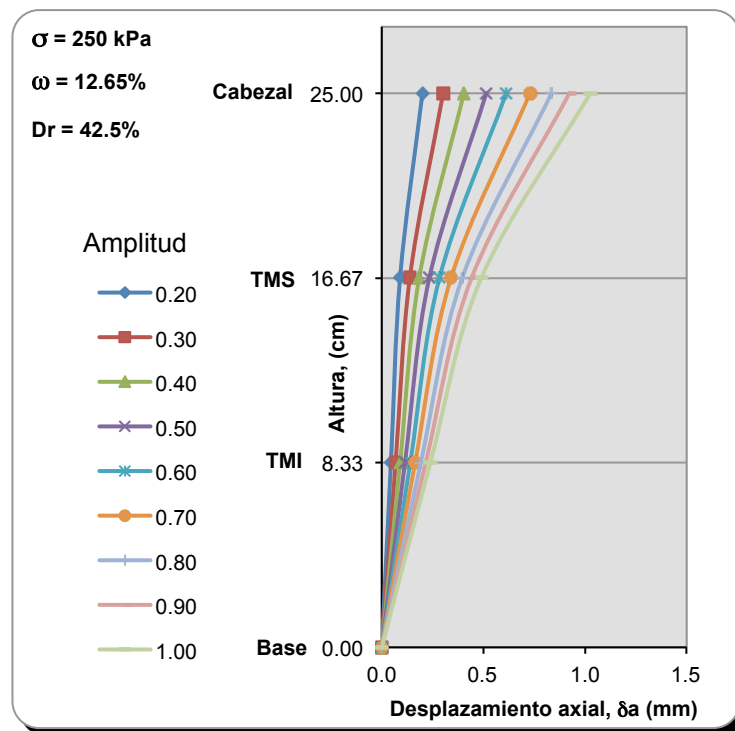
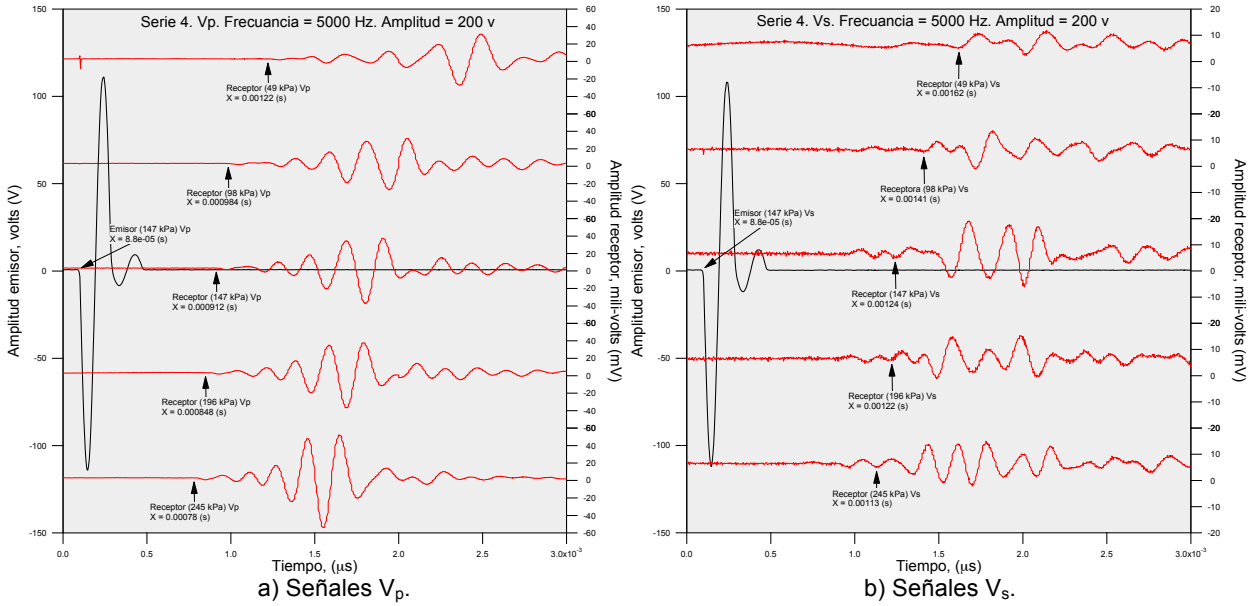
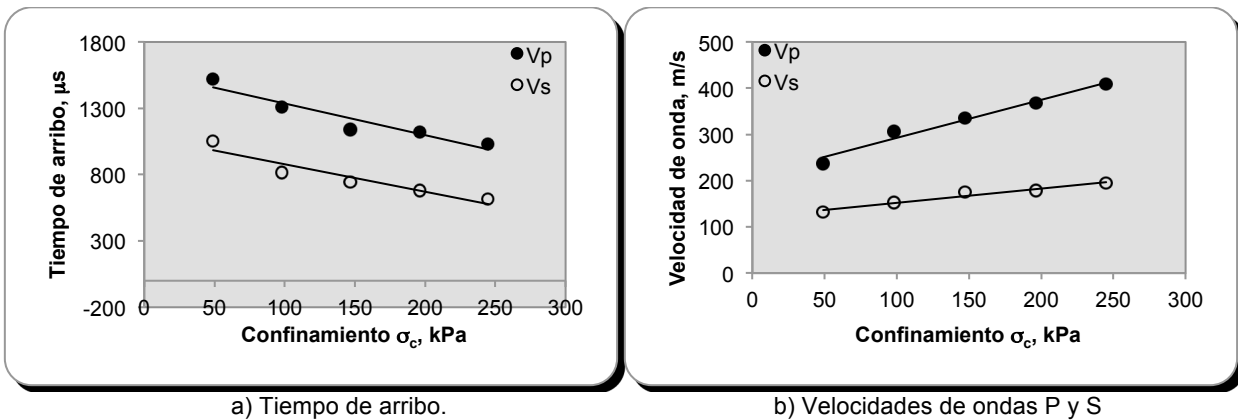


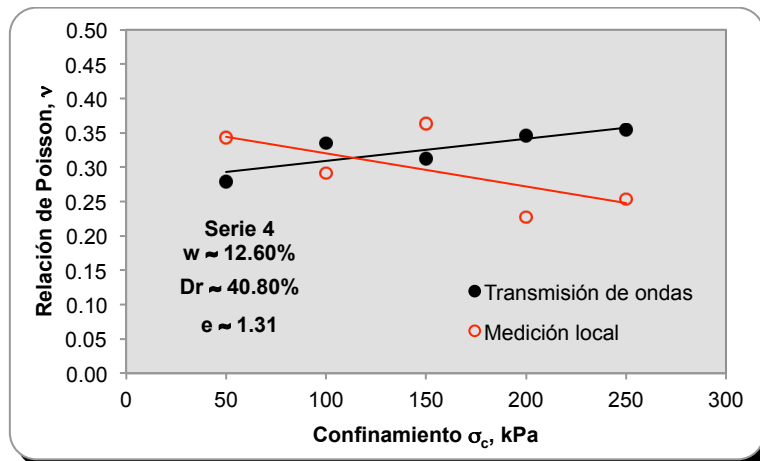
Figura A.233 Desplazamiento axial a lo largo de la probeta, para diferentes amplitudes.



A.234 Análisis de arribo de señales  $V_p$  y  $V_s$  (serie 4)



A.235 Comportamiento del tiempo de arribo y velocidad de onda con respecto al esfuerzo de confinamiento.



A.236 Comportamiento de la relación de Poisson con respecto al esfuerzo de confinamiento.