



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE DOS SUELOS DE ORIGEN VOLCÁNICO

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MENCIÓN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

CHRISTIAN ALEXIS GONZÁLEZ PULGAR

**PROFESOR GUIA:
RAMÓN VERDUGO ALVARADO**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
CLAUDIO FONCEA NAVARRO
PEDRO ACEVEDO MOYANO
RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS**

**SANTIAGO DE CHILE
ENERO DE 2012**

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA, MENCIÓN INGENIERÍA GEOTÉCNICA
Y AL TÍTULO DE INGENIEROCIVIL
POR: CHRISTIAN GONZÁLEZ P.
FECHA: 19/01/2012
PROF. GUÍA: SR. RAMÓN VERDUGO A.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE DOS SUELOS DE ORIGEN VOLCÁNICO

En el presente trabajo se realizó el estudio de dos suelos chilenos de origen volcánico de comportamiento geomecánico complejo, el primero corresponde a un material derivado de cenizas volcánicas denominado trumao (Clasificación USCS MH), ubicado en las cercanías de Chillán, VIII Región. El segundo suelo está asociado a depósitos de pómez plinianas expulsadas por el volcán Mocho-Choshuenco (Clasificación USCS GM a MH), ubicado en zonas cordilleranas de la Región de los Ríos.

Para el desarrollo de este estudio se realizaron ensayos de consolidación edométrica hasta presiones de 32 kg/cm^2 , triaxiales CIU y CID para un rango de presiones de confinamiento (σ_0') de $0,3$ a 6 kg/cm^2 , triaxiales cíclicos para σ_0' de $0,5$ a 4 kg/cm^2 , compresiones no confinadas, ensayos de permeabilidad, clasificación completa, ensayos químicos y microscópicos.

Los resultados confirman la existencia de una presión de preconsolidación ($P_p'_{\text{trumao}}=1,8 \text{ kg/cm}^2$ y $P_p'_{\text{pomez}}=0,6 \text{ kg/cm}^2$), la que en ambos suelos no estaría asociada al fenómeno de precarga, sino a una estructura de origen físico-químico. Además se observó el desarrollo de gran compresibilidad para presiones mayores a P_p' . En condición drenada el trumao presentan elevados ángulos de fricción interna ($\Phi_{\text{trumao}}\approx 37^\circ\text{-}39^\circ$) y cohesiones bajas o nulas, no así las pómez plinianas ($\Phi_{\text{pomez}}\approx 25^\circ$). En condición no drenada para presiones mayores a P_p' la resistencia última es de $S_{u\text{-trumao}}\approx 0,27\sigma_0'$ y $S_{u\text{-pomez}}\approx 0,13\sigma_0'$. Se comprobó que estos suelos presentan una importante sensibilidad, la cual genera variación en su comportamiento a medida que se altera su estructura natural.

La resistencia cíclica del trumao en probetas inalteradas para presiones de confinamiento mayores a P_p' , es comparable a la desarrollada por arenas naturales, bajo dicha presión la resistencia cíclica aumenta considerablemente. Probetas remoldeadas de trumao ensayadas a presiones de confinamiento mayores a P_p' , mostraron valores de resistencia cíclica comparables con las obtenidas en probetas inalteradas.

En probetas inalteradas de pómez plinianas se observaron elevadas permeabilidades, mayores o iguales a 10^{-3} cm/s . Producto de ésta permeabilidad, es posible que controle la resistencia drenada por sobre la no drenada en este suelo.

Es importante destacar que los resultados de los ensayos en pómez plinianas, fueron facilitados por la empresa Ingendesa S.A. para la elaboración de esta tesis.

A Dios, a mis padres, hermano y abuelita
“Pero por la gracia de Dios soy lo que soy”

1 Cor.15.10

AGRADECIMIENTOS

Parte importante de este estudio no hubiera sido posible sin la ayuda de la empresa Ingendesa S.A., quien permitió el uso de los resultados de los ensayos realizados en pómez plinianas, por lo que se agradece su colaboración.

Mi más grande agradecimiento es para Dios, del cual he sentido su gran ayuda a lo largo de mi vida y por entregarme todas las herramientas para enfrentar cada desafío que me he propuesto.

Agradezco enormemente a mis padres, ya que ellos con su inagotable fuente de amor y su gran sabiduría supieron dirigir mi vida y reconozco que sin ellos no hubiera sido posible haber llegado hasta este momento. A mi hermano Freddy y su maravillosa familia por su incondicional apoyo y por animarme a seguir cuando me daba por vencido. A mi viejita hermosa, que nunca dejó de preocuparse y derrochar su cariño en mi, solo Dios sabe cuánto he anhelado que hubiera estado presente en este momento compartiendo éste logro que también le pertenece.

Agradezco a mi profesor guía, por su tiempo, consejos y paciencia. A los profesores miembros de la comisión por sus valiosos comentarios y correcciones.

Agradezco a Omar González, por su singular forma de enseñar a usar los equipos del laboratorio, por sus importantes y acertados consejos, y por esa alegría con la que contagia a todos los que pasan por su laboratorio.

Agradezco a Mario Carrillo y a Claudio Godoy, por acompañarme a sacar las muestras en ese día de lluvia.

Agradezco a mis compañeros de IDIEM Roberto y Marcelo, quienes me ayudaron con sus comentarios y correcciones.

Y por último a todos mis amigos y compañeros de magister e ingeniería a quienes prefiero no nombrar para evitar que se me quede alguien afuera, los cuales me han ayudado con sus ideas, comentarios y también a hacer más entretenida esta carrera.

INDICE DE CONTENIDOS

GLOSARIO	XI
1. INTRODUCCION.....	1
1.1. MOTIVACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES DE ESTE TRABAJO	3
1.3. METODOLOGÍA.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. DEPÓSITOS DE MATERIALES PIROCLÁSTICOS	5
2.2. CLASIFICACIÓN QUÍMICA DE LOS DEPÓSITOS DE MATERIALES PIROCLÁSTICOS	9
2.3. VIDRIO VOLCÁNICO: COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MORFOLOGÍA	11
2.4. ALTERACIÓN DE UN DEPÓSITO DE MATERIAL PIROCLÁSTICO	14
2.4.1. Resultado de la Alteración del Vidrio Volcánico	15
2.4.2. Características Morfológicas del Alofán e Imogolita	17
2.5. SUELO DE ORIGEN VOLCÁNICO.....	20
2.5.1. Distribución de Suelos de Origen Volcánico en el Mundo	20
2.5.2. Suelos de Origen Volcánico en Chile	25
2.6. TRUMAO DE CHILLÁN.....	31
2.6.1. Definición y Distribución del Trumao	31
2.6.2. Propiedades Singulares	32
2.6.3. Resultados de Estudios Anteriores en Suelos Alofánicos Chilenos (Paredes 2005)	34
2.7. DEPÓSITOS DE PÓMEZ PLINIANAS DEL SECTOR NELTUME, REGIÓN DE LOS RÍOS	39
2.7.1. El Grupo Volcánico Mocho-Choshuenco “GVMCH”	41
2.7.2. Definición, Distribución y Litología del Depósito de Pómez Plinianas del Volcán Mocho-Choshuenco	43
3. SUELOS ESTUDIADOS, MUESTREO Y DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA, PROGRAMAS DE ENSAYOS - PROCEDIMIENTOS	46
3.1. SUELOS ENSAYADOS.....	46
3.1.1. Trumao de Chillán.....	46
3.1.2. Pómez Plinianas del sector Neltume, Región de los Ríos.....	46
3.2. MUESTREO Y DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA	47
3.2.1. Trumao de Chillán.....	47
• Toma de Muestras en Terreno.....	47
• Descripción Estratigráfica del Talud Muestreado.....	49
3.2.2. Pómez Plinianas Sector de Neltume, Región de Los Ríos.....	50
• Toma de Muestras en Terreno.....	50
• Descripción Estratigráfica de los Pozos de Exploración.....	54
3.3. SERIES DE ENSAYOS Y PROCEDIMIENTOS.....	57
3.3.1. Serie de Ensayos 1: Trumao de Chillán.....	57
3.3.2. Serie de Ensayos 2: Trumao de Chillán.....	62
3.3.3. Serie de Ensayos 3: Pómez Plinianas	69
4. RESULTADOS SERIE DE ENSAYOS 1: TRUMAO DE CHILLÁN	75
4.1. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS Gs	75
4.2. ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN ODOMÉTRICA.....	75
4.2.1. Probeta Inalterada	75
4.2.2. Probeta Remoldeada	77
4.2.3. Resumen Probetas Inalteradas y Remoldeadas	78
4.3. TRIAXIALES CONSOLIDADOS NO DRENADOS (CIU)	79
4.3.1. Probetas Inalteradas	80
4.3.2. Probetas Remoldeadas.....	88

4.4. TRIAXIALES CONSOLIDADOS NO DRENADOS (CIU) CON PROBETAS PRECONSOLIDADAS	95
4.4.1. Probetas Inalteradas	95
4.4.2. Probetas Remoldeadas.....	101
5. RESULTADOS SERIE DE ENSAYOS 2: TRUMAO DE CHILLÁN	103
5.1. ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN.....	103
5.1.1. Análisis Granulométrico	103
5.1.2. Límites de Atterberg.....	105
5.1.3. Gravedad Específica de los Sólidos Gs.....	106
5.1.4. Peso Unitario	107
5.2. ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN ODOMÉTRICA.....	107
5.2.1. Probeta Inalterada	107
5.2.2. Probeta Remoldeada	109
5.3. ENSAYOS DE COMPRESIÓN NO CONFINADA	112
5.4. TRIAXIALES CONSOLIDADOS NO DRENADOS (CIU)	113
5.5. TRIAXIALES CÍCLICOS NO DRENADOS CONSOLIDADOS ISOTRÓPICAMENTE	115
5.5.1. Probetas Inalteradas.....	116
5.5.2. Probetas Remoldeadas.....	119
5.5.3. Resumen Probetas Inalteradas y Remoldeadas	123
5.6. TRIAXIALES CÍCLICOS NO DRENADOS PRE-CONSOLIDADOS ISOTRÓPICAMENTE	124
5.6.1. Probetas Inalteradas.....	125
5.6.2. Probetas Remoldeadas.....	127
5.6.3. Resumen Probetas Inalteradas y Remoldeadas	129
5.7. RESUMEN TRIAXIALES CÍCLICOS NO DRENADOS CON MEDICIÓN DE PRESIÓN DE POROS	130
6. RESULTADOS SERIE DE ENSAYOS: POMEZ PLINIANAS	133
6.1. CLASIFICACIONES Y CURVAS GRANULOMÉTRICAS.....	133
6.2. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD.	134
6.3. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD IN SITU.	135
6.4. ENSAYO TRIAXIAL CIU.....	135
6.5. ENSAYO TRIAXIAL CID.....	138
6.6. CONSOLIDACIÓN ODOMÉTRICA	141
6.7. PERMEABILIDAD	143
6.8. DISOLUCIÓN SELECTIVA (CONTENIDO DE ALOFÁN)	144
6.9. FOTOGRAFÍA MICROSCOPIO DE BARRIDO DE ELECTRONES.....	145
7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	146
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	156
9. BIBLIOGRAFÍA.....	161
10. ANEXOS.....	164

INDICE DE FIGURAS

Figura Nº 1: Erupción volcán Chaiten Mayo 2008 (www.tiempopatagonico.com).	1
Figura Nº 2: (A) tres principales mecanismos de transporte de piroclastos: a.1 eólico-caída, a.2 oleada piroclástica, a.3 flujo piroclástico. (B) diferencia entre oleada y flujo piroclástico (Apuntes del curso GL54E Universidad de Chile 2008).....	7
Figura Nº 3: Erupción volcán Mayón Filipinas, se observan flujos piroclásticos en los flancos del volcán, las cenizas finas suben por la nube convectiva, la cual se deforma en la dirección del viento (Foto CG Newhall 23/9/1984).	7
Figura Nº 4: Depósitos de materiales piroclásticos generados por caída, oleada y flujo respectivamente (Apuntes del curso GL54E Universidad de Chile 2008)	8
Figura Nº 5: Relación entre mineralogía y tipo de roca (Shoji, S. 1983).....	10
Figura Nº 6: Tipos de partículas de vidrio volcánico de acuerdo a su morfología: a. tipo esponja, b. tipo plato, c. fibrosa (fiamez), d. tipo grano. (Shoji, Nazyo, Dahlgren, 1993)	13
Figura Nº 7: Morfologías partícula de alofán (http://web.agr.ehime-u.ac.jp)	17
Figura Nº 8: Esquema de un fibra de imogolita compuestas por varias microfibras (Besoin, E. 1985).....	18
Figura Nº 9: (A) Fotografía obtenida mediante microscopio, muestra la presencia de alofán e imogolita. (B) Vista de partículas de alofán e imogolita. (C) Detalle de B, mostrando fibras de imogolita. (D) Detalle de B, mostrando características de las esferas de alofán. (A.G. Jongmans, L. Denaix, F. van Oort and A. Nieuwenhuys, 1998).	19
Figura Nº 10: Suelos de Origen Volcánico en el Mundo (Besoin, E. 1969, 1983. En Suelos Volcánicos de Chile, 1985).	25
Figura Nº 11: Distribución general de suelos de derivados de materiales volcánicos (Valdés, 1969).	27
Figura Nº 12: Distribución de suelos derivados de materiales volcánicos zona centro-sur de Chile sobre la base del mapa original de C.S. Wright 1965 (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).....	30
Figura Nº 13: Influencia del remoldeo en una muestra de suelo alofánico obtenida de la localidad de Curaco, Chile. (A) muestra inalterada, (B) muestra remoldeada.....	33
Figura Nº 14: Ubicación de los Suelos Muestreados y Ensayados por Paredes (2005).....	34
Figura Nº 15: Límites de Atterberg Suelos Alofánicos y No Alofánicos (Paredes 2005).....	36
Figura Nº 16: (A) Talud natural constituido por pómez plinianas del sector de Neltume. (B) Partículas constituyentes del material (gentileza Ingendesa S.A).	41
Figura Nº 17: Mapa ubicación Grupo Volcánico Mocho-Choshuenco "GVMCH" (ref. Turiscom).....	42
Figura Nº 18: Grupo volcánico Mocho-Choshuenco, vista oeste. A la izquierda volcán Choshuenco, a la derecha volcán Mocho (Google Earth).	42
Figura Nº 19: Distribución de depósitos de pómez plinianas del Volcán Mocho Choshuenco (Echegaray J. 2004).	44
Figura Nº 20: Ubicación de la zona de extracción de muestras (Ref. Google Earth).	47
Figura Nº 21: Lugar muestreo realizado en Marzo de 2007	48
Figura Nº 22: Toma de muestras realizada en Marzo de 2008	48
Figura Nº 23: Toma de muestras realizada en Noviembre de 2009.....	49
Figura Nº 24: Estratificaciones de Cenizas Alteradas en Talud de Muestreo	50
Figura Nº 25: Esquema de ubicación pozos de exploración (imagen base ref. Google Earth).....	51
Figura Nº 26: Secuencia de Extracción de muestras inalteradas (gentileza Ingendesa S.A).	52
Figura Nº 27: Ensayo de consolidación muestra de trumao inalterada, diagrama e-logσv.	76
Figura Nº 28: Ensayo de consolidación muestra de trumao inalterada, diagrama e-σv, primeras cargas.	76
Figura Nº 29: Ensayo de consolidación muestra de trumao remoldeada, diagrama e-logσv.....	77
Figura Nº 30: Ensayo de consolidación muestra de trumao remoldeada, diagrama e-σv.	78
Figura Nº 31: Ensayos de consolidación muestras de trumao inalterada y remoldeada, diagrama e - logσv.....	79
Figura Nº 32: Triaxial CIU esfuerzo desviador "q" versus presión media "p", muestreo 2007.	80
Figura Nº 33: Triaxial CIU esfuerzo desviador "Δσ" versus deformación unitaria "ε", muestreo 2007.	81

Figura Nº 34: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestreo 2007.	81
Figura Nº 35: Triaxial CIU resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ_0' , muestreo 2007.	82
Figura Nº 36: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, muestreo 2008.	83
Figura Nº 37: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestreo 2008.	84
Figura Nº 38: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestreo 2008.	84
Figura Nº 39: Triaxial CIU resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ_0' , muestreo 2008.	85
Figura Nº 40: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, resumen muestreos 2007 y 2008.	86
Figura Nº 41: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, resumen muestreos 2007 y 2008.	86
Figura Nº 42: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria “ ϵ ”, resumen muestreos 2007 y 2008.	87
Figura Nº 43: Triaxial CIU resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ_0' , muestreos 2007 y 2008.	87
Figura Nº 44: Triaxial CIU probetas remoldeadas esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, muestreos 2007 y 2008.	88
Figura Nº 45: Triaxial CIU probetas remoldeadas esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestreos 2007 y 2008.	89
Figura Nº 46: Triaxial CIU probetas remoldeadas variación presión de poros “ Δu ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestreos 2007 y 2008.	89
Figura Nº 47: Triaxial CIU probetas remoldeadas resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ_0' , muestreos 2007 y 2008.	90
Figura Nº 48: Triaxial CIU ángulo de fricción movilizado “ Φ movilizado” versus deformación unitaria “ ϵ ”, resumen muestreos 2007 y 2008.	91
Figura Nº 49: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestras remoldeadas e inalteradas para diferentes presiones de confinamiento.	93
Figura Nº 50: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestras remoldeadas e inalteradas para diferentes presiones de confinamiento.	94
Figura Nº 51: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”.	96
Figura Nº 52: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”.	96
Figura Nº 53: Triaxial CIU variación presión de poros “ Δu ” versus deformación unitaria “ ϵ ”.	97
Figura Nº 54: Triaxial CIU variación de la resistencia última no drenada en función de la razón de preconsolidación, probetas inalteradas muestreo 2007.	98
Figura Nº 55: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”.	99
Figura Nº 56: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”.	100
Figura Nº 57: Triaxial CIU variación presión de poros “ Δu ” versus deformación unitaria “ ϵ ”.	100
Figura Nº 58: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”.	101
Figura Nº 59: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus deformación unitaria “ ϵ ”.	102
Figura Nº 60: Triaxial CIU variación presión de poros “ Δu ” versus deformación unitaria “ ϵ ”.	102
Figura Nº 61: Granulometría sobre tamiz ASTM N°200 muestra de trumao en estudio.	103
Figura Nº 62: Granulometría bajo tamiz ASTM N°200 muestra de trumao en estudio.	104
Figura Nº 63: Granulometría sobre y bajo tamiz ASTM N°200 muestra de trumao en estudio.	105
Figura Nº 64: Superposición de los resultados obtenidos para el suelo en estudio con los resultados obtenidos por Paredes (2005).	106
Figura Nº 65: Ensaye de consolidación muestra de trumao inalterada, diagrama e-log σ_v .	108
Figura Nº 66: Ensaye de consolidación muestra de trumao inalterada, diagrama e- σ_v , primeras cargas.	108
Figura Nº 67: Ensaye de consolidación muestra de trumao remoldeada, diagrama e-log σ_v .	110
Figura Nº 68: Ensaye de consolidación muestra de trumao remoldeada, diagrama e- σ_v .	110
Figura Nº 69: Compresión no Confinada, muestras de trumao inalterada y remoldeada.	112
Figura Nº 70: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, muestreo 2009.	113

Figura Nº 71: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus deformación unitaria “ε”, muestreo 2009.	114
Figura Nº 72: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria “ε”, muestreo 2009.	114
Figura Nº 73: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.	116
Figura Nº 74: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas, criterio de falla: $\epsilon_{da}=5\%$.	117
Figura Nº 75: Variación de presión de poros en el tiempo y deformación unitaria en el tiempo, ensayo con presión isotrópica 0.5 kg/cm ² en probeta inalterada.	118
Figura Nº 76: Comparación del factor de corrección $K\sigma$ obtenido para trumao con arenas naturales.	119
Figura Nº 77: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.	120
Figura Nº 78: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas, criterio de falla: $\epsilon_{da}=5\%$.	120
Figura Nº 79: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas, criterio de falla: $\epsilon_{da}=10\%$.	121
Figura Nº 80: Comparación del factor de corrección $K\sigma$ obtenido para probetas de trumao remoldeadas con arenas naturales.	122
Figura Nº 81: Rc-número de ciclos probetas de trumao inalteradas y remoldeadas.	123
Figura Nº 82: Resistencia cíclica – presión de confinamientos para 20 ciclos probetas de trumao, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.	124
Figura Nº 83: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas con diferente OCR, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.	125
Figura Nº 84: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas con diferente OCR, criterio de falla: $\epsilon_{da}=5\%$.	126
Figura Nº 85: Resistencia cíclica - OCR para 20 ciclos probetas de trumao inalteradas, criterio de falla: 100% presión de poros.	127
Figura Nº 86: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas con diferente OCR, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.	128
Figura Nº 87: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas con diferente OCR, criterio de falla: $\epsilon_{da}=5\%$.	128
Figura Nº 88: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas con diferente OCR, criterio de falla: $\epsilon_{da}=10\%$.	129
Figura Nº 89: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas y remoldeadas con diferente OCR, criterio de falla: 100% presión de poros.	130
Figura Nº 90: Resistencia cíclica - número de ciclos resumen probetas de trumao, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.	131
Figura Nº 91: Curvas granulométricas muestras de pómez plinianas analizadas.	133
Figura Nº 92: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, probetas inalteradas pómez.	136
Figura Nº 93: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus deformación unitaria “ε”, probetas inalteradas pómez.	136
Figura Nº 94: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria “ε”, probetas inalteradas pómez.	137
Figura Nº 95: Triaxial CIU resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ_0' , pómez pliniana.	138
Figura Nº 96: Triaxial CID esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, probetas inalteradas pómez.	139
Figura Nº 97: Triaxial CID esfuerzo desviador “q” versus deformación unitaria “ε”, probetas inalteradas pómez.	140
Figura Nº 98: Triaxial CID variación volumétrica ΔV versus deformación unitaria “ε”, probetas inalteradas pómez.	140
Figura Nº 99: Ensaye de consolidación muestra de pómez inalterada, diagrama e-log σ_v .	142

Figura Nº 100: Ensaye de consolidación muestra de pómez inalterada, diagrama e- σ_v , primeras cargas.....	142
Figura Nº 101: Fotografías pómez plinianas mediante microscópico de barrido de electrones.	145

INDICE DE TABLAS

Tabla Nº 1: Tipos de piroclastos de acuerdo a su tamaño (www.geovirtual.cl)	5
Tabla Nº 2: Clasificación de depósitos volcánicos, rocas y vidrio de acuerdo al contenido total de Sílice (SiO ₂) (Yamada and Shoji 1983).	10
Tabla Nº 3: Composición química de rocas volcánicas del centro sur de Chile (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).....	12
Tabla Nº 4: Características de los factores que influyen en la formación de arcilla alofánica.	16
Tabla Nº 5: Distribución de Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en el Mundo (Besoain, E. 1969, 1983. En Suelos Volcánicos de Chile 1985)	22
Tabla Nº 6: Edad y tipo de arcilla presente en los suelos derivados de cenizas volcánicas (Besoain, E. 1985).....	31
Tabla Nº 7: Ubicación pozos de exploración (Coordenadas WGS84 H19).	51
Tabla Nº 8: Listado de Muestras Pómez Plinianas.....	53
Tabla Nº 9: Descripción Estratigráfica Pozo CPM-1.....	54
Tabla Nº 10: Descripción Estratigráfica Pozo CPM-3	54
Tabla Nº 11: Descripción Estratigráfica Pozo CMLR-3B	55
Tabla Nº 12: Descripción Estratigráfica Pozo CIF-15.....	56
Tabla Nº 13: Descripción Estratigráfica Pozo CCE-5B	56
Tabla Nº 14: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU	59
Tabla Nº 15: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU preconsolidadas isotrópicamente.....	60
Tabla Nº 16: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU preconsolidadas isotrópicamente y con aplicación de razón de corte previo.	61
Tabla Nº 17: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU	65
Tabla Nº 18: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales cíclicos.....	67
Tabla Nº 19: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales cíclicos preconsolidados isotrópicamente.....	69
Tabla Nº 20: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU	71
Tabla Nº 21: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CID	72
Tabla Nº 22: Listado de muestras ensayadas consolidación odométrica	72
Tabla Nº 23: Listado de muestras ensayadas para determinación de permeabilidad	73
Tabla Nº 24: Listado de Muestras Ensayadas para Análisis Químico	74
Tabla Nº 25: Gravedad específica de los sólidos Gs.	75
Tabla Nº 26: Listado de Atterberg Trumao de Chillán.....	105
Tabla Nº 27: Gravedad Específica de los Sólidos Gs.	106
Tabla Nº 28: Peso unitario muestras extraídas 2009	107
Tabla Nº 29: Resultados ensayos de Clasificación Pómez Plinianas.....	133
Tabla Nº 30: Humedad Natural.....	134
Tabla Nº 31: Densidades In-situ húmeda y seca.	135
Tabla Nº 32: Resultados ensayos de Permeabilidad Pómez Plinianas.....	144
Tabla Nº 33: Disolución Selectiva, determinación del contenido de alofán.	144

GLOSARIO

Aglomerado Volcánico: Rocas piroclásticas constituidas principalmente por fragmentos mayores de 2cm de diámetro.

Alofán: Partícula coloidal amorfa resultante de la alteración del vidrio volcánico en condiciones específicas.

Andesita: Roca ígnea volcánica intermedia de grano fino, caracterizada por la presencia de oligoclasa o andesina.

Andosol: Uno de los 30 grupos de suelos en el sistema de clasificación de suelos FAO. Los andosoles son suelos altamente porosos, de colores oscuros y provienen de materiales volcánicos, tales como cenizas, tobas y pómez, entre otros.

Bombas Volcánicas: Masas discretas de lava fundida compacta expulsadas, al exterior por un volcán.

C¹⁴ (Radiocarbono): Método para la determinación de la edad que depende del decaimiento del nitrógeno del radiocarbono.

Ceniza: Material de grano fino <2mm, no consolidado, que se forma como resultado de explosiones volcánicas.

Dacítica: Roca ígnea volcánica con alto contenido de hierro. Su composición se encuentra entre las composiciones de la andesita y la de la riolita.

Depósitos Aluviales: Depósitos transportados por el agua en movimiento y depositados cuando la velocidad del agua ha disminuido; estos materiales pueden ser de origen fluvial o lacustre y pueden contener partículas finas, gruesas o ambas.

Escoria: Fragmento vesicular, de grano grueso (tamaño lapilli o mayor) de composición basáltica o andesítico-basáltica. Las paredes de las vesículas son usualmente más gruesas que en los piroclastos de pómez.

Freatomagmática: Erupción volcánica explosiva, causada por interacción del magma con agua meteórica.

Haloisita: Arcilla cristalina producida por la alteración del alofán bajo condiciones específicas.

Holoceno: División de la escala temporal geológica, es la última y actual época geológica del período Cuaternario. Comprende los últimos 11.784 años, desde el fin de la última glaciación. Pertenece al periodo Cuaternario.

Ignimbrita: Corresponde a grandes (> 1 km³) depósitos (o roca) ricos en pómez y cenizas que generalmente contienen material piroclástico juvenil. Se forma de la consolidación de la parte densamente particulada de un flujo piroclástico. Las tobas corresponden a rocas depositadas por flujos piroclásticos.

Imogolita: Partícula coloidal paracristalina resultante de la alteración del vidrio volcánico en condiciones específicas.

Lahar: Flujo de detritos o de barro de material piroclástico relacionado a una erupción volcánica.

Magma: Fluido fundido, formado dentro de la corteza o manto superior de la Tierra, que puede consolidarse y formar una roca ígnea.

Meteorización: Proceso mediante el cual las rocas se descomponen y rompen por la acción de agentes externos, tales como el viento, la lluvia, los cambios de temperatura, materia orgánica y bacterias.

Piroclasto: Material sólido arrojado por una chimenea o conducto volcánico.

Pleistoceno: División de la escala temporal geológica, es una época geológica que comienza hace 2,59 millones de años y finaliza aproximadamente 12.000 años AP (antes del presente). Pertenece al Cuaternario y antecede al Holoceno.

Pliniana: Erupción volcánica explosiva asociada a una descarga continua de gas a presión que emite volúmenes de productos fragmentarios (pómez, cenizas y líticos arrastrados al nivel del conducto) del orden de 1 a 10 km³.

Pómez: Partícula ígnea volcánica vítrea, con baja densidad (flota en el agua) y muy porosa, de color blanco o gris. En su formación, la lava proyectada al aire sufre una gran descompresión. Como consecuencia de la misma se produce una desgasificación quedando espacios vacíos separados por delgadas paredes de vidrio volcánico.

Riolita: Roca ígnea volcánica de color gris a rojizo con una textura de granos finos o a veces también vidrio y una composición química muy parecida a la del granito.

Tefra: Todo material emitido violentamente de un volcán y que, preferentemente, forma parte de una columna eruptiva. Se acumula en la superficie de la tierra por caída balística o por lluvia de piroclastos.

Toba: Roca piroclástica consolidada formado por fragmentos de cenizas y/o lapilli.

Vidrio Volcánico: Partícula volcánica que no presentan estructura cristalina.

1. INTRODUCCION

1.1. Motivación

Chile, como país parte del cinturón de fuego del Pacífico, posee una gran cantidad de volcanes, más de 2000, de los cuales alrededor de 500 son considerados geológicamente activos y de ellos, 60 con registro de actividad histórica dentro de los últimos 450 años. Producto de esta actividad, es que en el país más del 60% de la superficie de suelo existente está constituido por materiales de origen volcánico (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

Los suelos volcánicos tienen un origen común, provienen de materiales expulsados por erupciones volcánicas, los cuales posterior a su depositación inicial, son alterados y en algunos casos retransportados. Es importante entender que un suelo de origen volcánico no solo es aquel que proviene de cenizas volcánicas, si no también puede poseer su origen en otros materiales volcánicos, tales como: pómez, escorias básicas vesiculares, algunas tobas y aglomerados volcánicos, entre otros.

En la figura 1 se aprecia el material siendo expulsado de una erupción volcánica y que posteriormente se va depositando en extensas áreas.



Figura Nº 1: Erupción volcán Chaiten Mayo 2008 (www.tiempopatagonico.com).

Los suelos derivados de materiales volcánicos presentan una serie de particularidades que los diferencia profundamente de los suelos provenientes de otros materiales: poseen una distribución geográfica específica y exhiben propiedades características, apreciándose como las más importantes, las siguientes:

- Muy reducida densidad seca.
- Alta capacidad de retención de agua.
- Fuerte influencia de su microestructura en el comportamiento tensión deformación.
- En general alta compresibilidad.
- Al ser sometidos a distintos grados de secamiento, cambia por completo su estructura irreversiblemente, tratándose en cada grado de un suelo distinto.
- Alta sensibilidad al remoldeo.

El desconocimiento de estas propiedades puede generar graves problemas en obras de ingeniería, los cuales se encuentran relacionados con la elección de parámetros de caracterización del suelo inadecuados, asentamiento de fundaciones, problemas de capacidad de soporte, entre otros.

Existen variados tipos de suelos de origen volcánico, con características diferenciadas, las que se encuentran estrechamente relacionadas con el material parental y las condiciones e intensidad con las que actúan los factores de alteración en este material, dentro de los cuales se encuentran el clima, la topografía y el tiempo de depositación.

Chile se reconoce por poseer variedad de zonas con características climáticas y topográficas diferentes dependiendo de su ubicación, con regiones en donde no ha existido volcanismo reciente y otras donde hay volcanes activos. Es por esto, que los suelos de origen volcánico poseen características también determinadas según su ubicación geográfica a lo largo del país.

La gran superficie geográfica que cubren estos suelos, en conjunto con el creciente desarrollo de la actividad humana, generan la continua necesidad de ubicar proyectos habitacionales, industriales, mineros y energéticos en zonas en donde predominan los suelos derivados de materiales volcánicos. Esto justifica la necesidad e importancia del

estudio de estos suelos, principalmente en lo que concierne a sus propiedades singulares, las cuales no se presentan en los suelos que podríamos llamar tradicionales.

1.2. Objetivos y Alcances de este Trabajo

Este trabajo tiene como objetivo estudiar la respuesta geomecánica de dos suelos provenientes de materiales volcánicos. El primero de ellos corresponde a un suelo derivado de cenizas volcánicas que se ubica en las cercanías de Chillán, VIII Región, el cual es comúnmente conocido con el nombre de Trumao. Mientras que el segundo es un depósito de pómez plinianas ubicado en el sector de Neltume, XIV Región.

1.3. Metodología

La realización de este estudio ha sido desarrollada a través de las siguientes etapas:

Etapa 1: Revisión Bibliográfica

Esta etapa se enmarca en la revisión de información publicada de suelos derivados de materiales volcánicos, que va desde antecedentes generales referidos a su génesis, tipos y distribución, a dos estudios en particular, el primero de ellos correspondiente al suelo derivado de cenizas volcánicas denominado Trumao de Chillán y el segundo al depósito de pómez plinianas ubicados en el sector de Neltume, Región de los Ríos. Para este último, se utilizó la información existente de perfiles estratigráficos de terreno y ensayos de laboratorio.

Etapa 2: Exploración Geotécnica y Muestreo

Esta etapa estuvo enfocada en la obtención de los perfiles estratigráficos del terreno y extracción de muestras para posterior realización de ensayos de laboratorio.

Etapa 3: Ensayos de Laboratorio

Las muestras de suelo extraídas en la etapa de exploración geotécnica fueron sometidas a ensayos de laboratorio, los cuales fueron realizados en el Laboratorio de Sólidos y

Medios Particulados (Universidad de Chile), y en el Laboratorio de Geotecnia de IDIEM. Adicionalmente, algunos ensayos se realizaron en laboratorios de la Universidad de la Frontera.

Etapa 4: Procesamiento de Información Obtenida y Conclusiones

Esta última etapa consiste en el estudio de la información obtenida de la revisión de antecedentes y de los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para esta tesis, de tal forma de responder a los objetivos y alcances señalados anteriormente.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Depósitos de Materiales Piroclásticos

Se designa con el nombre de piroclastos a las partículas arrojadas por un volcán a través de una erupción. De acuerdo a su tamaño pueden ser clasificados en tres grupos, como se resume en la tabla 1.

Tabla N° 1: Tipos de piroclastos de acuerdo a su tamaño (www.geovirtual.cl)

Designación	Tamaño
Ceniza	>2 mm
Lapilli o Pómez	Entre 2 mm y 64 mm
Bombas	>64 mm

Dentro de los depósitos de materiales piroclásticos o depositaciones volcánicas, es posible encontrar tres tipos de componentes que dependen del grado de cristalización del magma volcánico y de la mineralogía de las paredes que constituyen el edificio volcánico que los expulsó:

- Fragmentos compuestos por partículas de vidrio volcánico. El vidrio volcánico es un material amorfo generado por un enfriamiento violento del magma volcánico, en el cual las moléculas y partículas de sílice no alcanzan a generar una estructura cristalina.
- Cristales: son aquellos minerales, en los cuales, las partículas y moléculas de Sílice presentes en el magma lograron generar una estructura ordenada (cristalina). Debido a la gran cantidad de tiempo necesario para que se generen estos minerales, su ocurrencia es escasa debido al rápido enfriamiento del magma al entrar en contacto con la atmosfera.
- Fragmentos Líticos: son aquellos generados por la pulverización de las paredes del conducto volcánico.

En general, las características de los depósitos volcánicos dependen de los diversos mecanismos de transporte del material expulsado desde el cráter, hasta su ubicación final.

En la literatura es posible encontrar referencias de diversos tipos de mecanismos de transporte de material volcánico (ejemplos Wright 1965, Langohr 1971,1974), a continuación se señalan los tres principales:

- Eólico o de caída: este mecanismo está controlado principalmente por la velocidad y dirección de los vientos, y por la magnitud de la erupción volcánica. En general, se reconoce que partículas de mayor tamaño y peso, son arrojadas a poca distancia desde el centro eruptivo, mientras que partículas de menor tamaño (cenizas) pueden viajar decenas de kilómetros desde su origen.
- Flujo piroclástico: mezcla de ceniza incandescente con clastos y gas que fluye por la pendiente del volcán, formado por desplome parcial de la columna eruptiva. El flujo es controlado por la topografía, canalizándose principalmente por valles y depresiones. Generalmente se identifican por poseer grandes clastos que tienden a ser de bordes subredondeados producto de la erosión causada por el flujo.
- Oleada piroclástica: nacen del flujo piroclástico, existiendo dos tipos: nube de cenizas y oleada de base. La nube de cenizas se genera por la turbulencia producida en los márgenes externos del flujo piroclástico principal. La oleada de base, se forma directamente del flujo piroclástico principal.

En la figura 2 se presenta un esquema de los sistemas de transporte antes mencionados, y en la figura 3 se señala un ejemplo de ellos.

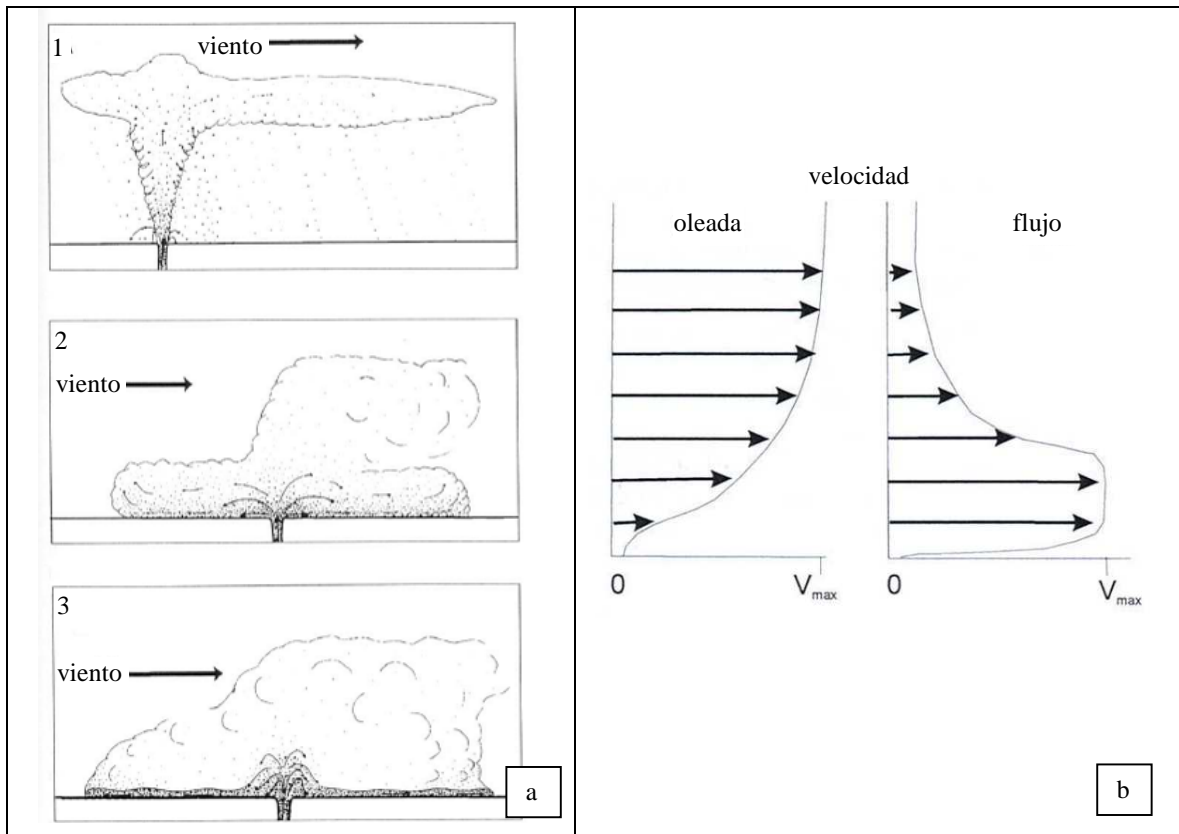


Figura Nº 2: (A) tres principales mecanismos de trasporte de piroclastos: a.1 eólico-caída, a.2 oleada piroclástica, a.3 flujo piroclástico. (B) diferencia entre oleada y flujo piroclástico (Apuntes del curso GL54E Universidad de Chile 2008).



Figura Nº 3: Erupción volcán Mayón Filipinas, se observan flujos piroclásticos en los flancos del volcán, las cenizas finas suben por la nube convectiva, la cual se deforma en la dirección del viento (Foto CG Newhall 23/9/1984).

En cuanto a la geomorfología que poseen los depósitos generados por los mecanismos antes señalados, se espera que los depósitos de caída se encuentren formando estratos de suelo homogéneos que siguen la topografía del terreno. Mientras que el flujo piroclástico forma depositaciones que cubren principalmente depresiones o sectores de topografía bajas. Por último, la oleada genera depositaciones más desordenadas, abarcando tanto zonas altas como bajas de topografía, concentrándose en mayor medida en éstas últimas. La figura 4 presenta un esquema de los tres tipos de depositaciones antes descritos.

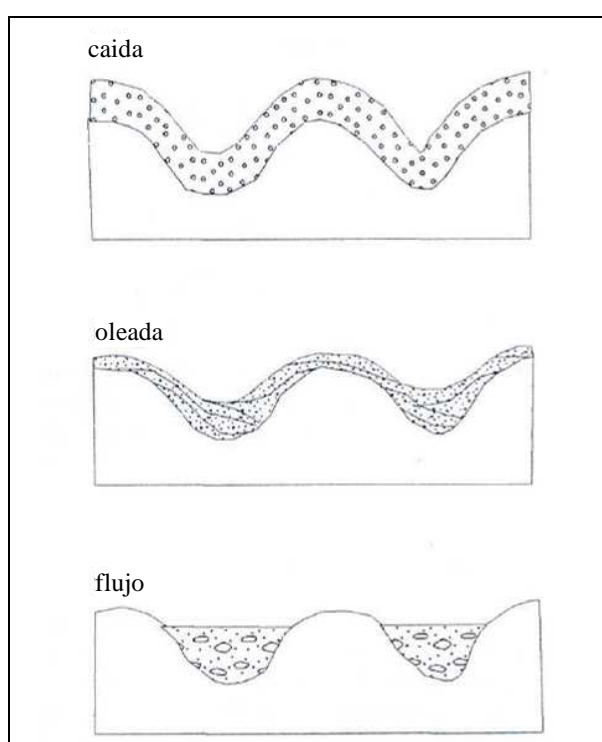


Figura Nº 4: Depósitos de materiales piroclásticos generados por caída, oleada y flujo respectivamente (Apuntes del curso GL54E Universidad de Chile 2008)

Por otra parte, es posible agregar tres mecánicas de transporte adicionales, como son: depositación aluvial, depositación mediante corrientes de barro o lahárica, y retransporte. Wright (1965) describe estos mecanismos tal como se menciona a continuación:

- Depositación Aluvial (alluvium volcánico): se genera luego de que grandes cantidades de cenizas son depositadas en los ríos y cursos de agua, luego de grandes erupciones volcánicas; el volumen de los sedimentos puede ser tal que,

taponea los ríos, y éstos al derramarse, forman abanicos aluviales o conos de deyección.

- Deposición Lahárica (corrientes de barro): los lahares son flujos de barro que movilizan gran parte de material desde las laderas de los volcanes, que llevan desde cenizas a rocas de gran tamaño. Los lahares se pueden originar debido a: derretimiento de los glaciares en las partes altas de un volcán durante actividad volcánica, periodos de lluvias intensos, vaciado de un lago hospedado en la cumbre de un volcán, o desplome de ladera debido a la prolongada alteración hidrotermal o sismo (ref. Apuntes curso GL54C U. Chile).
- Transporte por Hilo Glacial: material volcánico que se depositó sobre los glaciares, o que se encontraba bajo éstos, fue transportado de acuerdo al movimiento de dichos glaciares.
- Retransporte: participación de más de un mecanismo de transporte.

2.2. Clasificación Química de los Depósitos de Materiales Piroclásticos

Existen dos métodos para catalogar la composición química de un depósito de material piroclástico y posibilitar su posterior clasificación. Dichos métodos se señalan a continuación.

De acuerdo al contenido de sílice total (SiO_2) presente en el vidrio volcánico, es posible clasificar los depósitos, el tipo de roca volcánica presente y el vidrio propiamente tal, en cinco grandes grupos, tal como se señala en la tabla 2:

Tabla N° 2: Clasificación de depósitos volcánicos, rocas y vidrio de acuerdo al contenido total de Sílice (SiO₂) (Yamada and Shoji 1983).

Total SiO ₂ (%)	Tipo de roca volcánica	Tipo de deposito	Tipo de vidrio
100-70	Ácida	Riolítico	No-coloreado
70-62	Ácida	Dacítico	No-coloreado
62-58	Intermedia	Andesítico	No-coloreado
58-53.5	Básica	Basalto Andesítico	Coloreado
53.5-45	Básica	Basáltico	Coloreado

Adicionalmente, existe un método indirecto a través de la mineralogía o cristales presentes en el depósito de material piroclástico. La mineralogía está estrictamente relacionada a la composición del magma, es por ello que es posible correlacionarla con la composición química del depósito volcánico, tal como se señala en la figura 5.

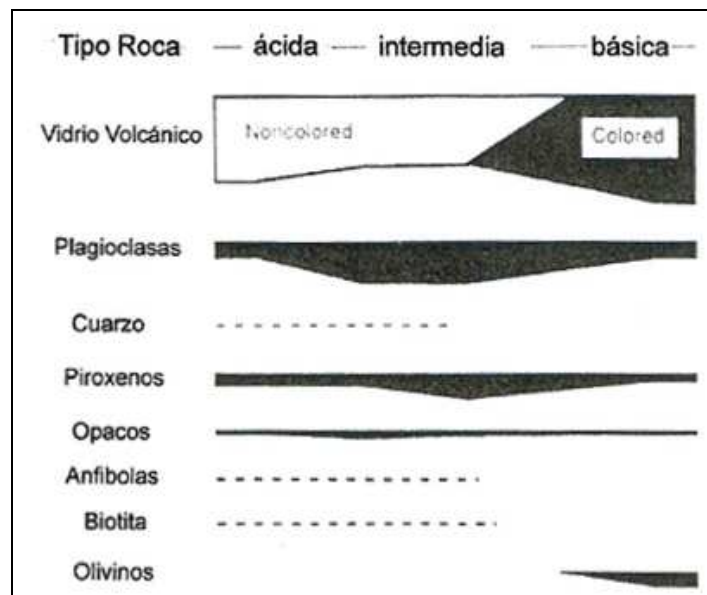


Figura N° 5: Relación entre mineralogía y tipo de roca (Shoji, S. 1983)

Debido a la coloración que adopta el vidrio volcánico, y a la relación con su composición química (ver tabla 2), es posible identificar un depósito de material piroclástico por la tonalidad del vidrio presente en él. Los vidrios no-colorados se identifican por poseer colores blancos a grises y los coloreados presentan colores oscuros. Es por ello que los depósitos de piroclastos más claros se asocian a rocas más ácidas, con contenidos de sílice mayores y los más oscuros se asocian a rocas más básicas.

Ahora bien, en depósitos alterados resulta más útil la clasificación mineralógica (ver figura 5) que a través del contenido de sílice total, debido a que es posible encontrar el vidrio volcánico totalmente alterado, haciéndose difícil la clasificación mediante este último método. Sin embargo, los cristales presentes en el depósito tienen mayor capacidad de soportar la meteorización, por lo que hacen más factible la clasificación mediante mineralogía (Paredes, 2005).

El tiempo de meteorización de los minerales presentes en un depósito de material piroclástico y su secuencia de alteración asociada, ha sido estudiada Shoji, Nanzyo y Dahlgren (1993), obteniendo la siguiente línea de tiempo esquemática:

Vidrio coloreado < vidrio no coloreado = olivino < plagioclasa < anfíbola < cuarzo

2.3. Vidrio Volcánico: Composición Química y Morfología

De acuerdo a lo indicado, el vidrio volcánico es un material con una estructura atómica desordenada (amorfo), que al ser expulsado por la explosión volcánica es enfriado rápidamente, impidiéndose el ordenamiento necesario de los átomos de sílice, no pudiendo formar un material cristalino. Es por ello que el vidrio volcánico es inestable y fácilmente alterable bajo condiciones de humedad y buen drenaje.

La composición química del vidrio volcánico es heredada del magma volcánico, y tal como fue expuesto en el capítulo anterior, pueden ser separados en vidrios no-coloreados y coloreados.

En el capítulo anterior se clasificaron los diferentes depósitos de materiales piroclásticos de acuerdo al contenido total de sílice presente en el vidrio volcánico, esto debido a que la sílice es el principal elemento químico que lo compone. No obstante, existen otros elementos constituyentes del vidrio, que a pesar de poseer una menor concentración, tendrán gran importancia en la generación de elementos secundarios producto de su alteración.

La composición química típica encontrada en rocas ígneas del centro sur de Chile se presenta en la tabla 3.

Tabla Nº 3: Composición química de rocas volcánicas del centro sur de Chile (Suelos Volcánicos de Chile, 1985)

Molécula	Porcentaje de acuerdo al tipo de roca		
	Basáltica	Andesítica	Riolítica
SiO ₂	51.50	58.33	73.02
Al ₂ O ₃	20.48	17.77	13.99
Fe ₂ O ₃	3.54	2.70	1.20
FeO	5.57	3.16	0.26
MgO	3.68	3.19	0.40
CaO	10.62	5.18	1.00
Na ₂ O	2.69	3.74	3.81
K ₂ O	0.41	2.07	4.92
TiO ₂	0.60	0.80	0.21
MnO	0.14	0.28	0.04
P ₂ O ₅	0.13	0.09	0.09
H ₂ O	0.68	2.56	1.04

De la tabla anterior se desprende que las composiciones más básicas, relacionada a los vidrios coloreados, poseen mayor cantidad de Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, CaO que las composiciones más ácidas. Por lo general, mayores concentraciones de Fe generan depositaciones de colores más oscuros, y es posible asociarlas a composiciones más básicas. Mientras que las depositaciones más ácidas tienden a poseer colores más claros.

En cuanto a la morfología del vidrio volcánico, ésta queda definida por la viscosidad magma, la cual está relacionada con la composición química y por la cantidad de gases que posea. El magma de composición ácida posee una viscosidad y contenido de gases mayor, por lo que genera partículas de vidrio con poros (vesículas) de gran tamaño. Mientras que magma de menor acidez, posee menor viscosidad y contenido de gases, por lo que las partículas de vidrio tendrán poros más pequeños. Yamada y Shoji (1993)

clasificaron las partículas de vidrio en cuatro categorías dependientes de su morfología, tal como se ilustra en la figura 6.

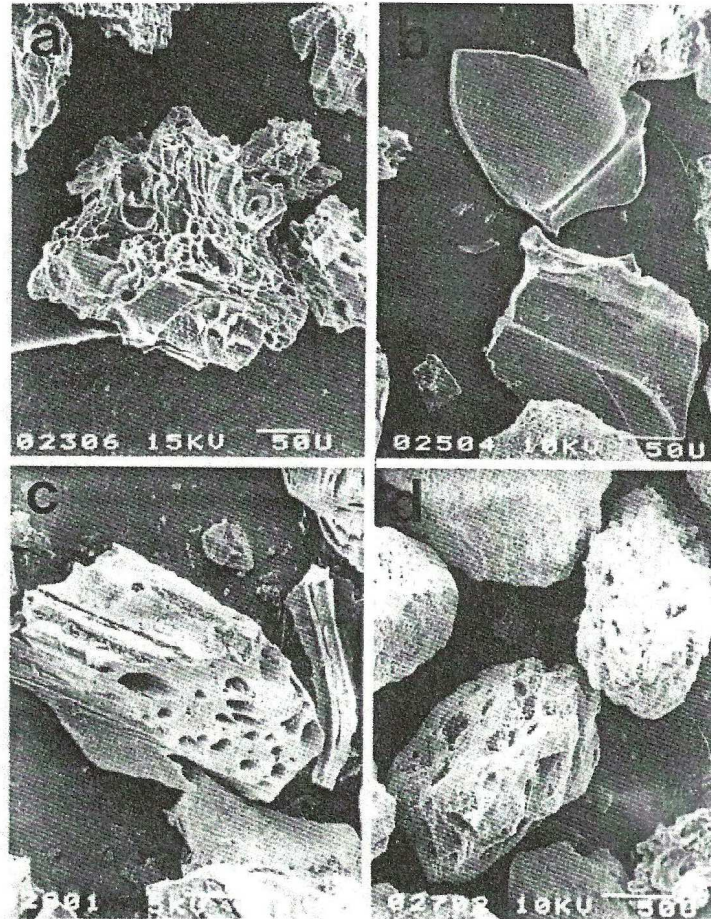


Figura Nº 6: Tipos de partículas de vidrio volcánico de acuerdo a su morfología: a. tipo esponja, b. tipo plato, c. fibrosa (fiamez), d. tipo grano. (Shoji, Nazyo, Dahlgren, 1993)

Las partículas más ácidas tendrán una morfología similar los tipos a y c, mientras que las de composición intermedia a básica serán de semejantes al tipo d. Las partículas tipo b se generan a partir de las partículas tipo a luego de una gran explosión que la desintegre.

Es posible encontrar partículas de vidrio de diferentes tamaños, porosos o sólidos. Los vidrios porosos son llamados pómez y los sólidos shards. Siendo estas últimas producidas por el rompimiento de las partículas porosas de mayor tamaño.

En algunos depósitos volcánicos es posible encontrar un gran contenido de pómez en su interior, los cuales son llamados depósitos de pómez. Mientras que el polvo volcánico o ceniza fina, está constituida principalmente por partículas solidas tipo shard.

2.4. Alteración de un Depósito de Material Piroclástico

Las características o propiedades de un suelo derivado de materiales volcánicos están fuertemente ligadas con el grado de alteración del depósito del cual se originó. Dicha alteración se relaciona en gran medida con la facilidad que posee el vidrio volcánico a sufrir meteorización. La facilidad con que el vidrio volcánico pueda ser meteorizado depende de su composición química, particularmente de la densidad de la sílice contenida, y de la morfología de sus partículas.

En general, los vidrios con mayor contenido de sílice poseen mayor densidad, a su vez, menores contenidos de sílice definen vidrios con menor densidad. La densidad influye en la dificultad de extraer o no la sílice del vidrio volcánico por lixiviación. Debido a que a mayor densidad las moléculas de sílice SiO_2 se encuentran más cercanas unas de otras, existiendo mayor atracción entre ellas, con lo cual es más difícil romper sus enlaces. Al contrario, a menor densidad la alteración del vidrio volcánico se realiza con menor dificultad (Paredes, 2005).

Por otra parte, las partículas de vidrio más porosas (ver figura 6), poseen una superficie específica mayor que las menos porosas. Mientras mayor es la superficie específica, mayor es el área en donde pueden actuar los factores de alteración, facilitando el proceso de meteorización del vidrio volcánico.

Ahora bien, como fue señalado en la tabla 3, es de esperar que los vidrios volcánicos basálticos o andesíticos posean mayor facilidad de alteración que los riolíticos o dacíticos, esto debido a que poseen menor porcentaje de sílice en su composición. Lo anterior fue estudiado por Kirkman y McHardy (1980), demostrando que la alteración de cenizas de composición basáltica y andesíticas es más rápida que en las otras composiciones mencionadas.

En cuanto a la vida media de las partículas de vidrio volcánico, Ruxton (1988) descubrió que el vidrio contenido en cenizas volcánicas poseía una vida media entre 1.650 y 5.000 años, para diferentes composiciones y climas.

2.4.1. Resultado de la Alteración del Vidrio Volcánico

El principal elemento que propicia la alteración del vidrio volcánico es la humedad, ésta hidrata la superficie del vidrio generando lixiviación. En una primera etapa, como resultado de la alteración bajo condiciones particulares para cada una de ellas, se pueden generar partículas pertenecientes a la fracción arcilla, tales como: alofán e imogolita, ferrihidrita, complejos Al/Fe, sílice opalina (gel de sílice) y óxidos de Fe. El proceso de formación de las partículas anteriores es distinto para cada una de ellas. Por ejemplo, bajo condiciones de pH favorables se puede generar alofán e imogolita, en caso contrario se propicia la generación de mayores cantidad de Al y Fe unidos con materiales orgánicos (Shoji, Nanzyo y Dahlgren, 1993).

Es importante mencionar que las partículas de alofán e imogolita no poseen una estructura completamente cristalina, teniendo el alofán una estructura amorfa. Mientras que la imogolita es paracristalina, la cual es intermedia entre amorfa y cristalina.

Siguiendo en el proceso evolutivo o de alteración del vidrio volcánico, a partir de las partículas de alofán e imogolita, que en su conjunto se les llama simplemente arcilla alofánica, se generan arcillas cristalinas del tipo haloisitas.

A continuación se presenta un esquema simplificado de alteración, partiendo desde el vidrio volcánico y llegando a la haloisita, en condiciones favorables para la formación de arcilla alofánica.

Vidrio volcánico >> Geles Si y Al >> Arcilla Alofánica >> Arcilla Haloisita.

Por otra parte, los principales factores que propician la formación de alofán e imogolita (arcilla alofánica), en conjunto con las características que deben poseer para estos efectos, se resumen en la tabla 4.

Tabla Nº 4: Características de los factores que influyen en la formación de arcilla alofánica.

Factor de Alteración	Características para la Formación de Arcilla Alofánica.
Nivel de Precipitaciones Anual	Mayor a 800 mm/año (Besoain, E. 1985)
Topografía	Topografías que permiten el fácil escurrimiento del agua en el suelo, aumentando las condiciones de drenaje, favorecen a la lixiviación del vidrio volcánico y arrastran sílice disuelta aumentando la posibilidad de formar arcilla alofánica (Shoji, Nanzyo y Dahlgren, 1993).
Temperatura	A mayor temperatura se acelera el proceso de meteorización (Farmer et al. 1979), favoreciendo a la formación de arcilla alofánica.
Composición del vidrio volcánico	Como primera característica, los vidrios coloreados por su morfología y composición se alteran con mayor facilidad, esto sumado a que liberan mayor cantidad de Mg y Ca, manteniendo el agua con un pH sobre 4.9, favoreciendo la formación de arcilla alofánica. Vidrios no coloreados generan una reacción que acidifica el suelo inhibiendo la formación de arcilla alofánica (Paredes 2005).
pH	Entre 4.9-7 (Parfitt y Kimble 1989), bajo 4.9 la formación de alofán es inhibida.
Materia Orgánica	Al descomponerse la materia orgánica que se encuentre en contacto con vidrio volcánico, acidifica el suelo, desfavoreciendo a la formación de arcilla alofánica.
Tiempo	Su importancia radica en que las partículas de alofán e imogolita poseen una vida media aproximada de 25.000 años, luego pasan a ser, en el caso particular de Chile, arcillas del tipo haloisitas (Besoain 1985).

2.4.2. Características Morfológicas del Alofán e Imogolita

Las partículas de alofán e imogolita poseen propiedades físico-químicas y morfológicas muy particulares, no encontradas en arcillas cristalinas y que aun en una pequeña cantidad en el suelo imponen propiedades macrofísicas muy singulares, algunas de ellas serán abordadas en este estudio (Paredes, 2005).

a.- Partícula de Alofán: Las partículas de alofán pueden presentar dos morfologías diferentes, una forma esférica y otra anular, tal como se ilustra en la figura 7.

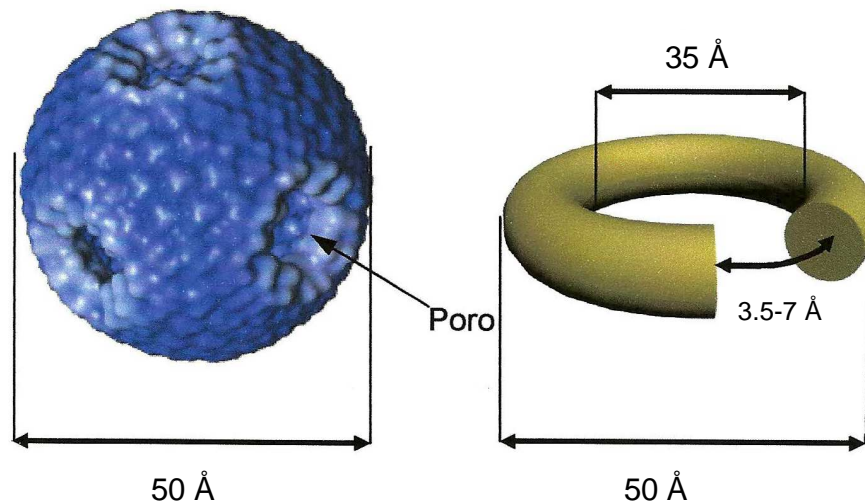


Figura N° 7: Morfologías partícula de alofán (<http://web.agr.ehime-u.ac.jp>)

De acuerdo a lo anterior, la partícula de alofán puede poseer la forma de una esfera hueca de diámetro aproximado 50 Å, con poros en su superficie. O una forma anular hueca discontinua. Los poros o aberturas que poseen ambas morfologías son del orden de 3.5 Å a 7 Å de diámetro; mientras que el espesor de pared se estima en 10 Å.

Debido a su morfología, la partícula de alofán posee la capacidad de retener grandes cantidades de agua, tanto en su interior, como en su exterior en forma de monocapa adherida a la superficie. En cuanto a los poros que posee la partícula, permiten la entrada y salida de agua hacia y desde su interior.

b.- Partícula de Imogolita:

Las partículas de imogolita presentan forma de fibras entrelazadas entre sí, con diámetros entre 100 Å a 300 Å, y longitudes de unos cuantos micrones. Dichas fibras están constituidas por microfibras o fibras unitarias, paralelas entre sí. Cada fibra unitaria posee forma cilíndrica hueca con un diámetro interno de unos 10 Å y externo de 20 Å. En la figura 8 se presenta un esquema de una fibra de imogolita conformada por microfibras.

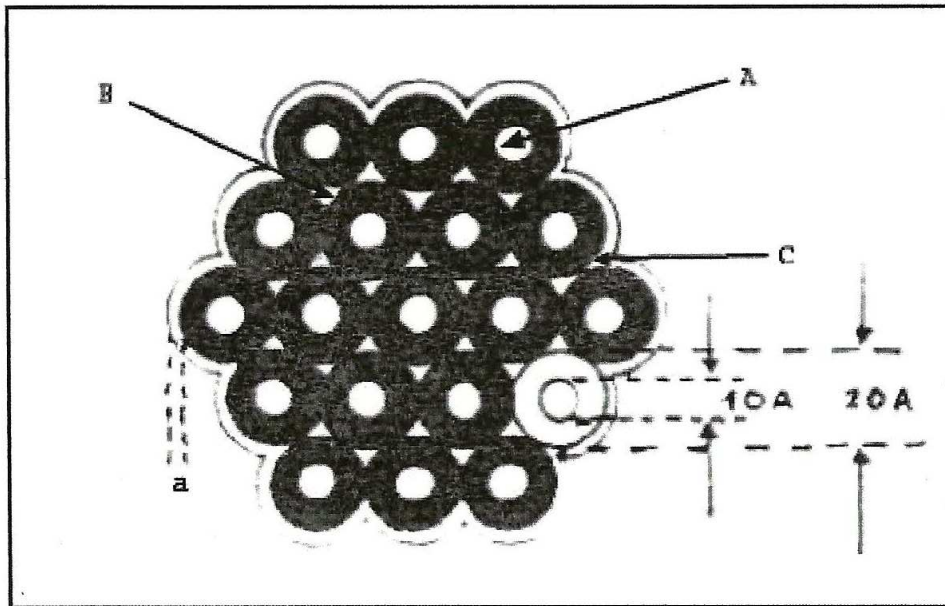


Figura N° 8: Esquema de un fibra de imogolita compuestas por varias microfibras (Besoain, E. 1985).

La forma de estas partículas, al igual que en el alofán, permiten que retengan gran cantidad de agua al interior de las microfibras, entre microfibras y adherida a la superficie en una monocapa de agua.

En la figura 9 se observa una fotografía obtenida a través de un microscopio de transmisión de electrones (TEM), a partículas de alofán e imogolita presentes en un suelo de origen volcánico en Costa Rica. En ella es posible observar la estructura que conforman en conjunto las fibras de imogolita y las partículas de alofán.

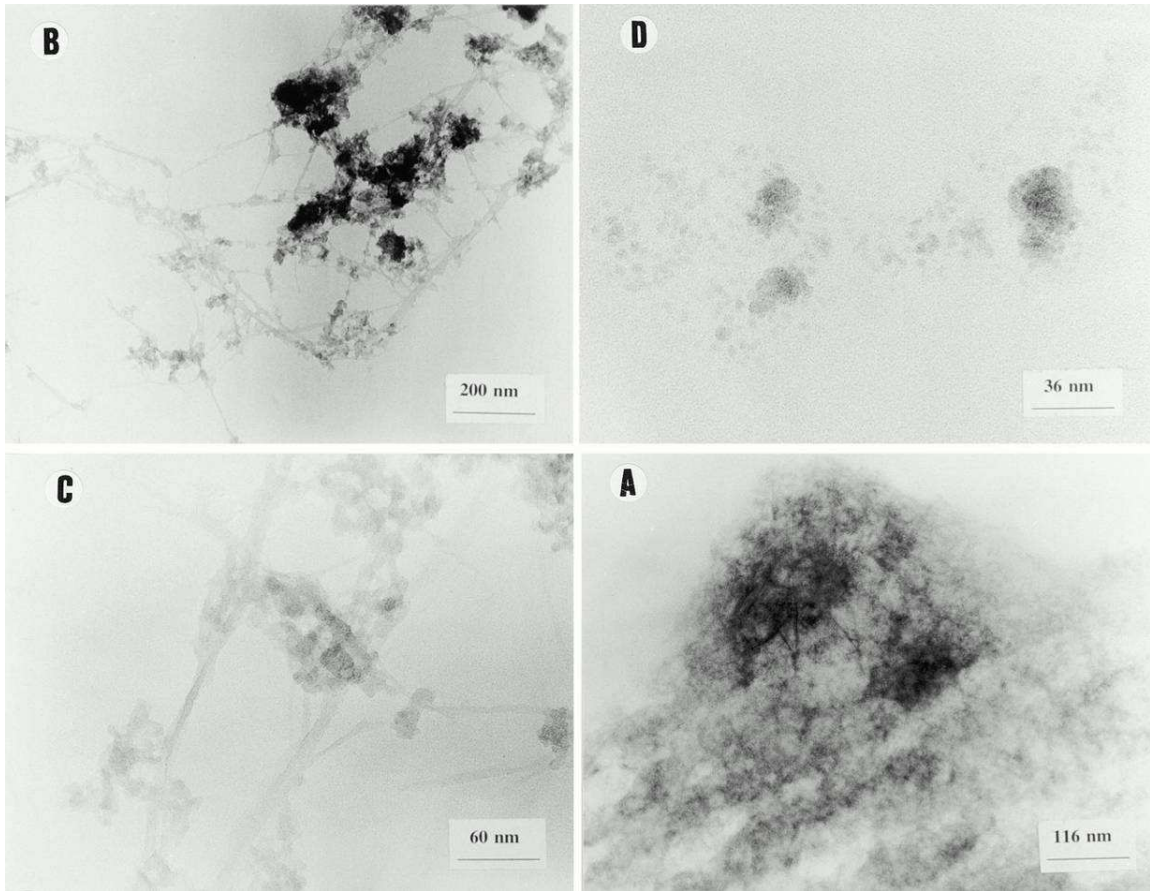


Figura Nº 9: (A) Fotografía obtenida mediante microscopio, muestra la presencia de alofán e imogolita. (B) Vista de partículas de alofán e imogolita. (C) Detalle de B, mostrando fibras de imogolita. (D) Detalle de B, mostrando características de las esferas de alofán. (A.G. Jongmans, L. Denaix, F. van Oort and A. Nieuwenhuys, 1998).

2.5. Suelo de Origen Volcánico

Los suelos de origen volcánico son aquellos que provienen de la transformación in situ o en su posterior transporte, de material piroclástico arrojado por erupciones volcánicas. Estos suelos ofrecen una serie de particularidades que los diferencia profundamente de los suelos provenientes de otros materiales: tienen una distribución geográfica específica, poseen un origen en común y exhiben propiedades características.

El material piroclástico puede dar origen a grupos de suelos muy diversos, según las condiciones e intensidad con que actúen los factores de transformación (clima, vegetación, topografía, organismos vivos y tiempo). Sin embargo, existe un grupo de suelos que tienen una derivación genética común, cuya formación está subordinada a la existencia de vidrio volcánico y a una elevada superficie de contacto del material parental, además de una condición de drenaje libre, un nivel mínimo de precipitación anual que en Chile se sitúa sobre los 800mm, y un periodo de tiempo que usualmente no excede los 25.000 años. Este grupo de suelos es denominado comúnmente como Andosoles (FAO, 1968-1975) o en un concepto más amplio, Andepts (USDA, 1975). Los Andosoles representan la unidad más característica de los suelos de origen volcánico (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

En Chile los Andosoles están representados por los suelos denominados Trumaos, Ñadis y Pardo Arcillosos, todos ellos derivados de cenizas holocénicas. Adicionalmente, se pueden encontrar otros tipos de suelos de origen volcánico, con algunas coincidencias genéticas con los Andosoles, derivados de piroclasitas pleistocénicas, tales como: los suelos Rojos Arcillosos, las Pómez Rioltica de la cuenca de Santiago y de la VI Región; así también los suelos provenientes de arenas y pómez volcánicas recientes, eólicas y aluviales.

2.5.1. Distribución de Suelos de Origen Volcánico en el Mundo

La ubicación de estos suelos coincide con la existencia de volcanes, lo cual a su vez, se asocia con las zonas tectónicas del planeta. Como las regiones volcánicas más importantes del mundo se pueden mencionar las siguientes (Suelos Volcánicos de Chile, 1985):

- Región volcánica y tectónica circunpácífica, que incluye las costas de Asia y América, así como el Océano Pacífico y sus islas.
- El territorio volcánico Mediterráneo.
- El sector volcánico Atlántico a lo largo de la costa oeste.
- El territorio volcánico de África Oriental y Oriente Medio.

En la tabla 5 se resumen algunos de los lugares en los cuales se han descrito suelos derivados de cenizas volcánicas, agrupándolos según regiones climáticas e incluyendo: el tipo de suelo, la mineralogía de las arcillas, la edad, el clima, la vegetación y la clase de material parental. En dicha tabla es posible observar que los Andosoles siempre están ligados a centros de actividad volcánica, no estando distribuidos en zonas amplias, como ocurre con otros suelos. Además, se puede ver que los Andosoles se desarrollan en una amplia variedad de climas, desde subpolares a tropicales, siempre que tengan humedad suficiente, con exclusión casi completa de climas áridos o semiáridos.

Tabla Nº 5: Distribución de Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en el Mundo (Besoain, E. 1969, 1983. En Suelos Volcánicos de Chile 1985)

Lugar	altura	Tipo de Suelo	Material Parental	arcilla	Edad	Clima	Vegetación	Referencias
ZONA TROPICAL Y SUBTROPICAL								
	Sector oeste cordillera andina	Andosol	Ceniza andesítica	Alofán	Reciente	Tropical/subtropical	Bosque mixto siempre verde	Wright y Bennema (1965)
Ecuador (1)	Cordilleras oriental y occidental y valles andinos	Andosol	Cenizas andesíticas	Alofán, imogolita, haloisita	Reciente	Variabile: tropical a clima de altura	Bosque tropical siempre verde a páramo	Colmet-Daage <i>et al.</i> , 1967
Panamá (2)	500 - 4.500 m Parte norte de Panamá	Andosoles con duripán silíceo	Pómez riolítica	Alofán, haloisita	Reciente	Tropical lluvioso	Selva tropical	Brown and Wolfschoon (1960)
Colombia (3)	700 m Estado de Caldas y Valle	Andosoles	Ceniza volcánica	Alofán, haloisita	Reciente	Subtropical/montano superhúmedo	Foresta húmeda	Mejía <i>et al.</i> , (1969)
Costa Rica (4)	500 - 4.000 m Entre Cervantes y Paraiso	Typic Dystrandept	Ceniza volcánica reciente	Alofán, gibbsita	Reciente	Tropical húmedo	Pradera	Andriésse y Müller (1973), Besoain (1972)
El Salvador (5)	1.500 m Valle de Zapotitán	Andosoles	Cenizas volcánicas	Alofán, gibbsita, haloisita	Reciente (?)	Tropical húmedo	Cultivos	Hawando y Carlisle (1973)
Nicaragua (6)	Costa Pacífico 500 - 1.800 m	Andosol	Cenizas basáltico-andesítica-dacítica	Alofán, haloisita	Reciente	Tropical húmedo	Cultivos	Colmet-Daage <i>et al.</i> , (1970)
Antillas Francesas (7)	Guadeloupe et Martinique 700 m	Andosoles	Cenizas y arenas andesíticas-labradoríticas	Alofán, haloisita-7A, bayerita, gibbsita	Reciente	Tropical húmedo	Cultivos	Colmet-Daage y Lagache (1965)
Islas Canarias (8)	Tenerife, isla Hierro, Gomera 600 - 2.000 m	Dystrandepts, Vitrandepts, Andosol/Tierra Parda oligotrófica	Cenizas basálticas, fonolíticas y traquíticas	Alofán, haloisita, imogolita, gibbsita	Cuaternario/reciente	Subtropical-oceánico insular	Laurisilva, fayal-brezal	Fernández Caldas y Tejedor (1975)
Isla San Vicente (9)	Antillas 300 - 700 m	Andosol (Yellow brown loam)	Ceniza y toba andesítica-basáltica	Haloisita, Alofán	4.000 años	Tropical lluvioso	Bosque de montaña siempre verde	Hay (1960)
Grenada (10)	Antillas 0 - 700 m	Andosol	Ceniza y escoria andesítica-basáltica	Alofán	Holoceno a reciente	Tropical lluvioso	Selva tropical degradada	Wright (1961)
Isla San Miguel (11)	Archipiélago Azores 100 - 1.000 m	Andosoles saturados, insaturados ferruginosos	Piroclásticos traquíticos y basálticos	Alofán, haloisita, montmorillonita	Reciente	Templado, lluvioso, oceánico (1.500 - 3.000 mm)	Cultivos semitropicales; praderas	Pinto, Madeira <i>et al.</i> , (1977)
México (12)	Sierra Madre occidental, oriental y sur	Durandepts, Molandepts y Vitrandepts	Cenizas basálticas, andesíticas, riocácicas, dacíticas	Alofán, caolinita, mica, montmorillonita, vermiculita	Cuaternario	Tropical, subtropical, templado, frío	Opuntia, Agave, Pinus, Abies, Quercus	Aguilera (1969)

Africa (13)	Cameroun y Moungo 900 - 4.000 m	Andosol tropicaux	Piroclásticas basálticas	Alofán, haloisita, gibbsita, montmorillonita	Cuaternario a reciente	Ecuatorial muy húmedo a moderado	Bosque denso húmedo; sabanas; vegetación subalpina de altitud	Sieffermann (1973)
Africa (14)	Congo 500 - 2.000 m	Andosol, Sol Brun tropicaux	Cenizas y escorias basálticas	Alofán, haloisita	Holoceno a reciente	Tropical lluvioso a clima de altura	Sabana, selva tropical y clima de altura	Pecrot <i>et al.</i> (1962)
Africa (15)	Sudán, sector oeste, Jabel Mairra	Transición Andosol a Suelos Pardos	Ceniza volcánica rica en feldspatos	Caolín	Holoceno a reciente	Tropical seco	Sabana	White (1967)
Africa (16)	Kenia: montañas de Sherangahi	Suelos volcánicos	Vulcanitas-alcálimas; cenizas	Componentes amorfos, clorita	Cuaternario	Tropical húmedo	Bosque de bambú	Theisen (1966)
Africa (17)	Guinea insular	Braunlehm terroso	Cenizas, lápilis y escoria basáltica	Haloisita, geothita	Pleistoceno	Tropical lluvioso con transición a clima de montaña	Selva tropical	Hoyos y Rodríguez (1956a)
Africa (18)	Fernando Poo	Braunlehm terroso	Ceniza y escoria basáltica	Haloisita, geothita	Pleistoceno	Tropical lluvioso	Selva tropical	Hoyos y Rodríguez (1956b)
Madagascar (19)	Sector volcánico de Itas y Ankaratra 1.000 - 2.600 m	Andosoles	Cenizas y escorias traquíticas, andesíticas, fonolíticas	Alofán, clorita, gibbsita, caolinita	Holoceno a reciente	Tropical húmedo (Ankaratra) o con una estación seca	Sabana y pradera	Zebrowski (1971)
Nuevas Hébridias (20)	Pacífico sudoccidental	Andosoles autróficos y oligotróficos; suelos poco evolucionados	Cenizas y lápilis basáltico	Amorfos silíceos; alofán, haloisita, imogolita, vermiculita	Reciente: muchos con menos de 1.000 años	Ecuatorial o tropical muy húmedo	Selva tropical densa a sabana	Quantin (1972, 1974)
Indonesia (21)	Java, Sumatra y gran parte del archipiélago Malayo 200 - 3.000 m	Andosoles y transición Andosol/ Latosol	Cenizas y toba basáltica	Alofán, haloisita	Pleistoceno a reciente	Tropical lluvioso a frío húmedo de montaña	Selva tropical, praderas	Tan (1964) Dudal y Soepraathoardo (1960)
Hawaii (22)	Hawaii, Maui, Oahu, etc.	Dystrandepts Hydrandept, Molandept, etc.	Cenizas y lavas andesíticas, freáticas y ultrabásicas	Alofán, caolín, gibbsita, vermiculita	Pleistoceno a reciente	Tropical/semi desértico (1.500 - 2.000 m)	Bosque/matorral a selva tropical	Sherman y Swindale (1964)
Ecuador (23)	Isla Santa Cruz: Galápagos	Hapludults, Dystrandept	Cenizas volcánicas y otros piroclásticos basálticos	Alofán, imogolita, haloisita, etc.	Reciente	Transición: tropical a tropical semi desértico	Transición xero y mesofítica a bosque de	Longanathan y Swindale (1969)
Filipinas (24)	Gran parte de las islas 300 m	Andosoles	Cenizas básicas	Alofán, imogolita, gibbsita	Pleistoceno a reciente	Tropical húmedo	Selva tropical	Mariano (1965) Kitagawa, Kyuma y Kawaguchi (1973)
ZONA TEMPLADA A TEMPLADA-FRÍA								
Japón (25)	Honshu, Kyushu y Hokkaido	Andepts	Piroclásticas basálticas, andesíticas y riolíticas	Alofán, imogolita, gibbsita, clorita, montmorillonita, etc.	Principalmente holoceno	Continental (Hokkaido/Honshu) a Permanente húmedo con verano cálido (Konshu/Hyushu)	Bosque de hojas anchas, matorrales y praderas: Castanea, conífera, Quercus, mimperata	Kanno (1961) Min. Agric. & Forestry (1964)

Lugar	Situación geográfica; altura	Tipo de Suelo	Material Parental	Minerales de arcilla	Edad	Clima	Vegetación	Referencias
ZONA Templada a Templada-Fría								
Italia (26)	Monte Amiata Monte Vulture 300 - 1.500 m	Tierra Parda Andepts	Piroclásticos traquíticos Tobas alcalinas	Haloisita, alofán, illita	Cuaternario	Mediterráneo	Bosque de hoja ancha y matorrales	Lulli y Bindi (1980) Besoain (1969)
Nueva Zelanda (27)	Isla Norte 0 - 1.500 m	Andosoles	Cenizas andesíticas, riolíticas, basálticas, etc.	Alofán, imogolita, gibbsita, minerales de 14A, etc.	Holoceno a reciente	Permanente húmedo/con verano seco	Bosque a matorral; praderas	Taylor (1964) Gibbs (1968) Fieldes (1966)
Chile (28)	Zona central Centro Sur 60 - 1.800 m	Andosoles	Cenizas andesíticas/ basálticas	Alofán, imogolita, gibbsita, etc.	Holoceno	Mediterráneo	Bosque mixto, parque, matorral	Wright (1965) Besoain (1969)
Argentina (29)	Región andina entre 34 - 44° l.s.	Andepts	Cenizas andesítico- basálticas	Alofán, imogolita, gibbsita, etc.	Holoceno	Mediterráneo con clima frío de montaña	Bosque mixto a parque	Etchevehere (1972)
Alemania (30)	Laacher-see Siebengebirge	Tierra Parda	Piroclásticos traquíticos, fonolíticos y basálticos clorita	Illita, haloisita, montmorillonita, clorita	Mioceno, Glacial, tardío, Holoceno	Suboceánico	Bosque mixto; matorral cultivos	Besoain (1969)
Rumania (31)	Cárpatos occidentales 900 - 1.450 m	Andosol; suelos pardos mesobásicos ácidos; pardo podzólico	Toba andesítica, conglomerado andesítico, andesita	Alofán, haloisita-7A, illita, vermiculita, etc.		Suboceánico	Bosque abierto con cubierta de pastos	Stoica, Atanasescu, Popescu y Edelstein (1974)
ZONA Polar y Subpolar; Zona Boreal permanentemente fría y clima frío de montaña								
Estados Unidos (32)	Alaska: Kodiak, Aleucianas y otras islas	Cryandepht (con permafrost)	Cenizas volcánicas básicas y riolíticas	Alofán	Reciente (erupción de 1912)	Subpolar, fuertemente oceánico	Bosque, estepa y matorrales (Calamagrostis, Populus, alnus, etc.)	Simonson y Rieger (1967) Flach (1964)
U.R.S.S. (33)	Kamchatka	Suelos volcánicos pardos; suelos Sod	Cenizas andesíticas- andesíticas/basálticas	Alofán, haloisita, vermiculita, gibbsita, etc.	Holoceno a reciente	Continental boreal	Bosque: Populus, Alnus, Salix; cubierta herbácea	Liberovskii (1971); Sokolov y Karayava (1965)
Noruega (34)	Isla Jan Mayen	Ranker andosol? Vitrandept?	Cenizas y tobas básicas	Alofán, feldespato	Reciente	Subpolar altamente oceánico	Bosque (Betulia) muy rico en líquenes y musgos	Lag y Bergseth (1982)
Islandia (35)	Gran parte de la isla	Andosoles	Cenizas basálticas, pómez, palagonita	Alofán, óxidos no-cristalinos	Holoceno a reciente	Subpolar altamente oceánico	Bosque subártico: Betula, Salix, Carex, etc.	Johannsson (1960)
Perú (36)	Vertiente occidental de Andes del Sur	Andepts	Cenizas y tobas riolíticas, dacíticas	Probablemente Alofán	Cuaternario	Clima de "páramo" semiárido y frío	Matorral xerofítico (gramíneas, Festucas, Cactus, etc.)	Zamora (1969) Zavaleta (1969)

La figura 10 muestra la distribución esquemática de los suelos derivados de materiales volcánicos, principalmente Andosoles, indicando con un número de referencia los lugares señalados en la tabla 5.

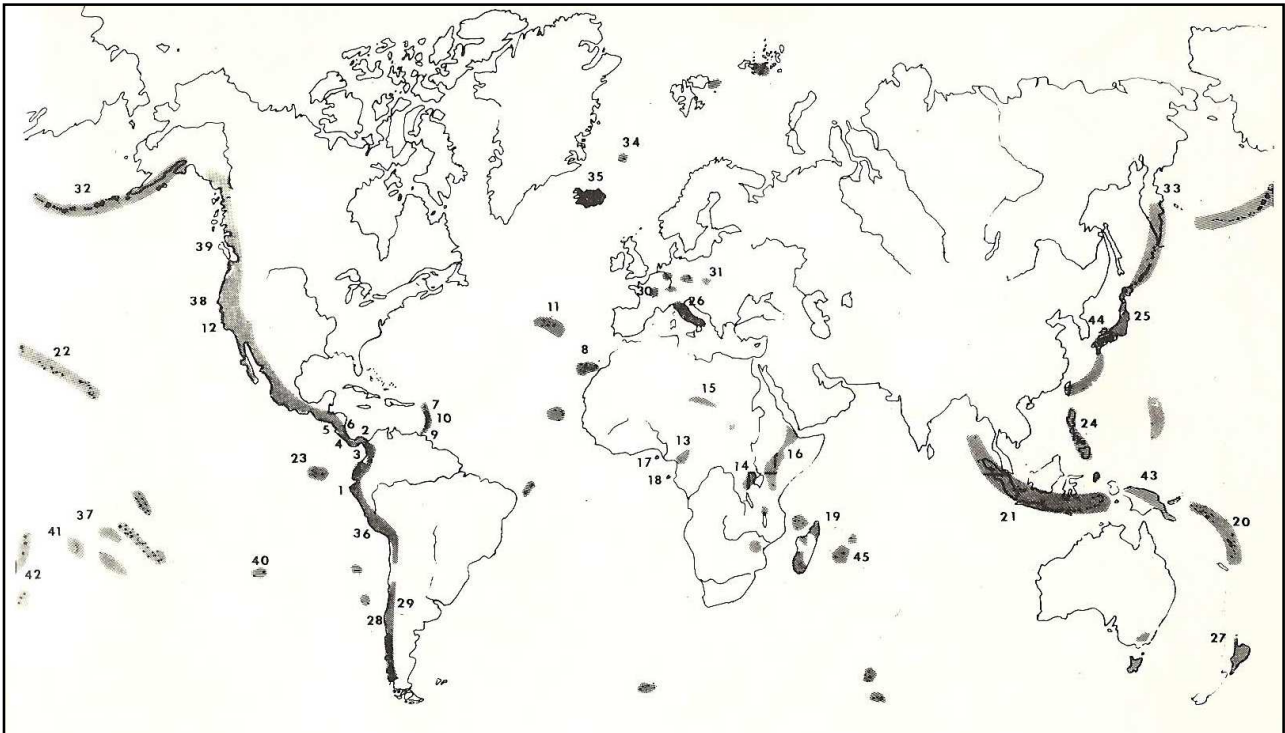


Figura Nº 10: Suelos de Origen Volcánico en el Mundo (Besoain, E. 1969, 1983. En Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

2.5.2. Suelos de Origen Volcánico en Chile

Chile se caracteriza por ser escenario de una intensa actividad volcánica, preferentemente Terciaria en el extremo norte y Terciaria-Cuaternaria en el sector sur, la cual ha determinado que grandes superficies del territorio estén cubiertas por depósitos volcánicos del tipo cenizas, pómez, y arenas volcánicas. Una excepción es la zona comprendida entre Atacama y Aconcagua ($27^{\circ}30'$ - $32^{\circ}20'$ lat. sur), en la cual no se ha generado volcanismo moderno.

Los suelos generados a lo largo del país son bastante heterogéneos entre sí y son dependientes de la zona geográfica o climática en que se encuentren. Dicha heterogeneidad se debe a la gran importancia que tienen las condiciones ambientales,

topográficas y tiempo en su formación. El clima actuando a través de las precipitaciones, la extensión y relieve, y el material parental, han tenido una importancia decisiva en la formación de los diversos suelos de origen volcánicos. Por ejemplo, un Trumao no podría generarse bajo las condiciones climáticas que prevalecen en el extremo norte de Chile.

En relación a lo anterior, a lo largo del territorio nacional es posible distinguir tres grandes zonas climáticas: zona árida, zona de transición semiárida y la zona húmeda.

La zona árida se extiende desde los 18° a los 28° d e lat. sur. En ella es posible encontrar depósitos volcánicos de cenizas, pómez, ignimbritas, lavas riolíticas, dacíticas y andesíticas sobre los 3000 m de altura, cercano a los grandes complejos volcánicos que existen en dicha zona. En este caso, el material parental a sufrido un bajo a nulo grado de alteración, debido principalmente, al bajo régimen de precipitación anual (inferior a 100 mm) y a las condiciones orgánicas débiles. Lo anterior se traduce en que el material parental ha estado sometido a una meteorización y lavaje mínimo, con la consecuente transformación lenta del vidrio volcánico (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

La zona semiárida o de transición, se ubica entre los 33° 30' y 34° 30' de lat. sur. Dentro de esta zona es común encontrar depósitos de pómez riolíticas, en las cuencas sedimentarias de la Región Metropolitana y VI Región, que han dado origen a los llamados suelos Pumicíticos (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

La tercera zona mencionada, comienza en los 34° 30' lat. sur, y se extiende hasta el extremo sur del país. En esta zona, con un nivel de precipitaciones anual que sobrepasa los 800 mm, las cenizas volcánicas han originado cuatro grupos principales de suelo: los Trumaos, los Ñadis, los suelos Rojos Arcillosos y los suelos Pardo Arcillosos. Adicionalmente, se deben incluir los suelos derivados de arenas volcánicas y suelos originados por arenas y pómez de depositación directa (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

La figura 11 presenta un esquema de la distribución de los suelos derivados de materiales volcánicos en Chile.

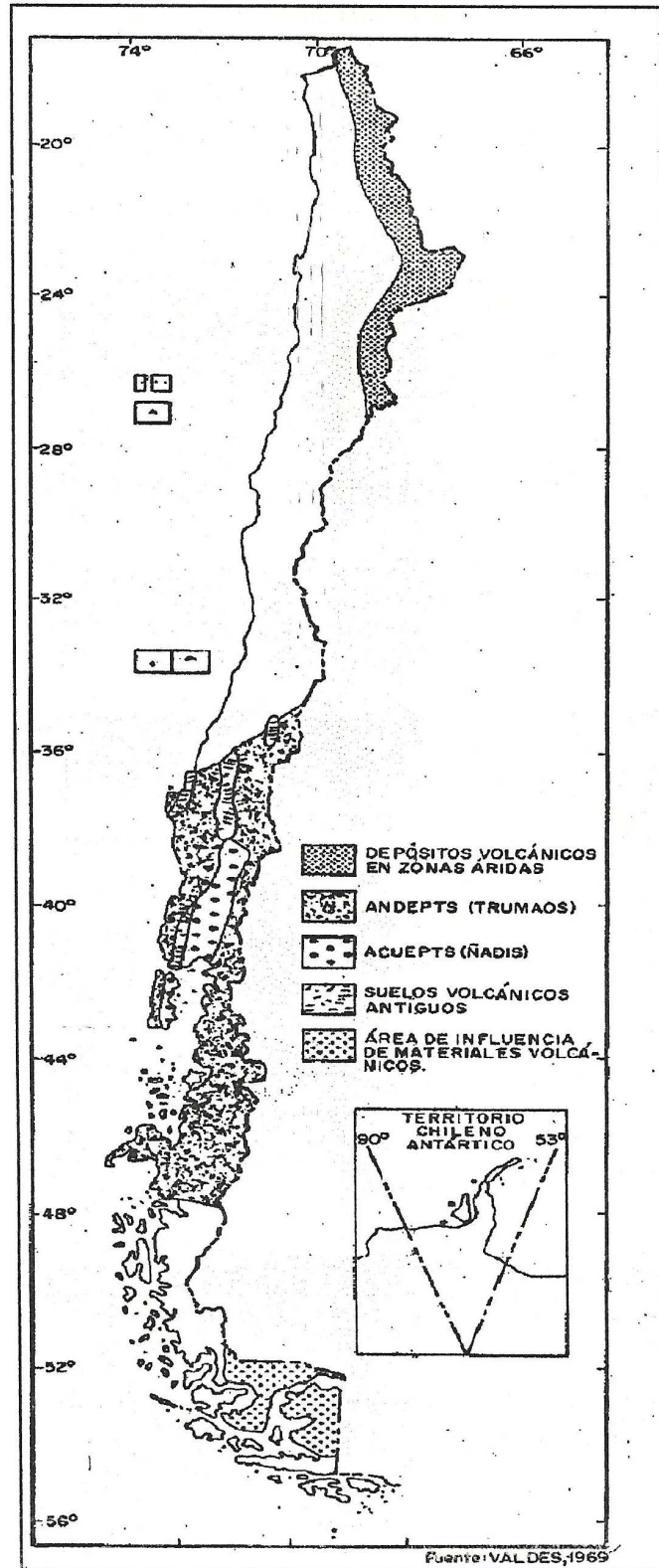


Figura Nº 11: Distribución general de suelos de derivados de materiales volcánicos (Valdés, 1969).

Los Trumaos y Ñadis provienen de cenizas de edad holocénica, mientras que los suelos Rojos Arcillosos poseen un material parental que presumiblemente se originó dentro del Pleistoceno hace unos 450.000 a 300.000 años, en éste último el vidrio volcánico se ha transformado casi completamente. El suelo Pardo Arcilloso tiene una transformación del vidrio volcánico intermedia, por lo que su edad se encontraría entre la de los Trumaos o Ñadis y la de los Rojos Arcillosos (Besoain, E. 1969, 1983. En Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

Los Trumaos poseen una distribución que se inicia en la VI región, ocupando algunas zonas de la depresión intermedia y precordillera andina. Hacia el sur, van creciendo en extensión y frecuencia, llegando a cubrir alrededor de los 36° 30' lat. sur, prácticamente toda la superficie entre la depresión intermedia y precordillera. Más al sur, los Trumaos de la depresión intermedia se extienden hacia la cordillera de la costa, de modo que a los 39° lat. sur, casi toda la superficie entre ambas cordilleras se encuentra cubierta con Trumaos. Los Ñadis, se ubicarían principalmente al sur de los 39° lat. sur, en terrazas planas de la depresión central (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

Se estima que la superficie cubierta por los Trumaos y Ñadis entre Santiago y Puerto Montt, alcanza a 3.334.000 ha y 423.000 ha respectivamente (Mella y Kühne 1983. En Suelos Volcánicos de Chile 1985).

Los suelos Rojos Arcillosos se inician en la precordillera de la VII región, frente a Talca, en donde se pueden encontrar en forma aislada, mientras que hacia el sur aumentan su extensión geográfica, alcanzando su mayor cobertura entre los 37° y 41° lat. sur. Adicionalmente, es posible encontrarlos en algunos puntos de la Isla Grande de Chiloé. Se estima que los suelos Rojos Arcillosos ocupan una superficie de 665.300 ha (Mella y Kühne 1983. En Suelos Volcánicos de Chile 1985).

Los suelos Pardo Arcillosos se localizan principalmente en la depresión central, en la IX Región, ocupando una superficie estimada de 32.800 ha (Mella y Kühne 1983. En Suelos Volcánicos de Chile 1985).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas aluviales tienen ubicación precisa, distribuyéndose en torno al cono aluvial del río Laja, entre los 37° y 37° 5' lat. sur. Son

suelos recientes y su superficie se ha estimado en 347.400 ha (Mella y Kühne, 1983. En Suelos Volcánicos de Chile 1985).

Los suelos derivados de arenas volcánicas, pómez y cenizas volcánicas recientes de depositación directa, constituyen una extensa formación situada en la cordillera misma, en los lugares sometidos directamente a la acción de los volcanes. Entre los 38° y 47° lat. sur constituyen una superficie prácticamente continua. Se estima que estas depositaciones ocupan aproximadamente 432.000 ha entre la VII y X región (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

La figura 12 ilustra la distribución de suelos derivados de materiales volcánicos en la zona centro sur de Chile, dentro de los cuales se encuentran los mencionados anteriormente.

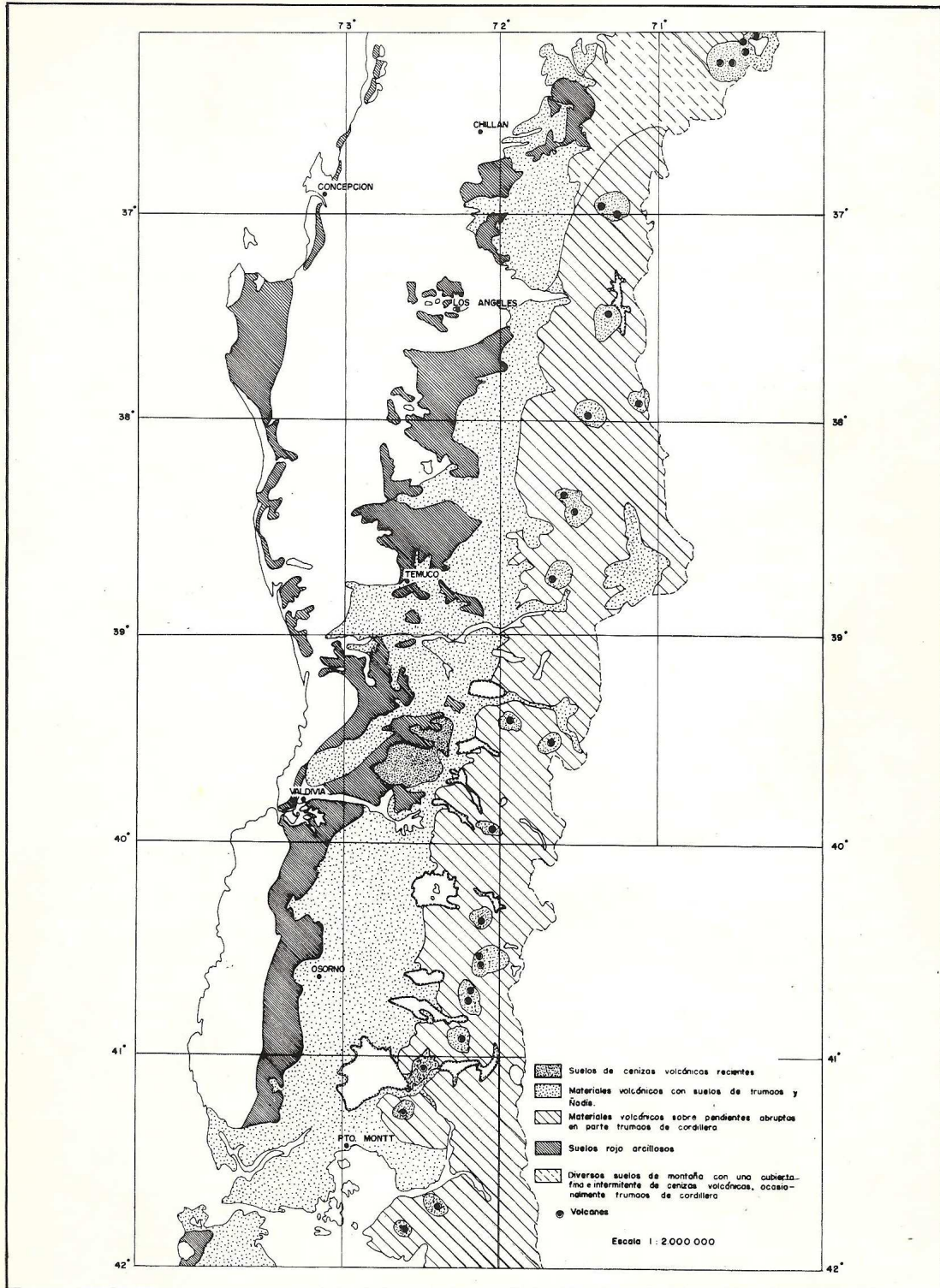


Figura Nº 12: Distribución de suelos derivados de materiales volcánicos zona centro-sur de Chile sobre la base del mapa original de C.S. Wright 1965 (Suelos Volcánicos de Chile, 1985)

La mineralogía de los suelos: Trumaos, Ñadis, Rojos Arcillosos y Pardo Arcillosos, relacionada al tipo de arcilla que se ha generado luego de la alteración del vidrio volcánico parental, se resume en la tabla 6.

Tabla N° 6: Edad y tipo de arcilla presente en los suelos derivados de cenizas volcánicas
(Besoain, E. 1985)

Suelo	Tipo Arcilla	Edad Probable [miles años]
Trumaos	Alofánica	0,5-20
Ñadis	Alofánica	10-20
Pardo Arcillosos	Haloisita y muy poco Alofán	25-60
Rojos Arcillosos	Haloisita	80

Desde Chiloé hacia el sur, la información de suelos es escasa, existiendo estudios más puntuales, pudiéndose rescatar lo siguiente:

En las áreas escarpadas de Chiloé continental y la provincia de Aysén se encuentran trumaos bien evolucionados, mientras que en la precordillera es posible encontrar cenizas volcánicas recientes y suelos de origen volcánico con baja alteración del vidrio volcánico. En los sectores más insulares, es posible encontrar suelos orgánicos derivados de tefras provenientes de los diversos volcanes que se ubican en la zona. Por último, en la región de Magallanes, estudios recientes han comprobado la existencia de suelos de origen volcánico con diversos grados de evolución. (Luzio, W., Alcayaga. S. 1990).

2.6. Trumao de Chillán

2.6.1. Definición y Distribución del Trumao

El Trumao corresponde a un suelo derivado de cenizas volcánicas jóvenes (holocénicas), las cuales han sido depositadas por la acción de los vientos, o por procesos de retransporte. Su nombre proviene de la lengua Mapuche y quiere decir "Lluvia de Cenizas".

Dentro de los factores que han favorecido a la formación de este tipo de suelo, se encuentran las precipitaciones, la temperatura ambiental, las condiciones topográficas, la edad, entre otras. Es por ello que es posible subdividir estos suelos en: trumaos de cordillera, de valle central, y de la cordillera de la costa.

Los trumaos de cordillera se sitúan entre los 500 y 2000 m de altura, con precipitaciones anuales de 2000 a 4000 mm, y temperatura media anual de 5°C. Derivan de cenizas volcánicas depositadas en forma de polvo, movilizadas por el viento, en general, sobre distancias cortas (Sanhueza, 1999).

Los trumaos de la depresión intermedia, ubicados entre los 36° y 42° de latitud sur, a una altura promedio de 200 m sobre el nivel del mar. Reciben precipitaciones anuales entre 1000 y 1500 mm, y una temperatura media anual de 15°C. Derivan principalmente de cenizas volcánicas retransportadas (Sanhueza 1999).

Por último, los trumaos de la cordillera de la costa se ubican entre los 37° y 43° de latitud sur, sobre los 600 m de altura sobre el nivel del mar. Sometidos a precipitaciones anuales de 500 a 1500 mm, y temperaturas de 8° a 10°C. Este suelo deriva generalmente de ceniza volcánica transportada por el viento (Sanhueza, 1999).

En cuanto a las condiciones topográficas, por lo general estos suelos se encuentran en superficies inclinadas, en donde existen buenas condiciones de drenaje, lo que posibilita el lavado de las partículas que constituyen el suelo.

En cuanto a su composición mineralógica, tal como se mencionó en el capítulo anterior, posee un importante porcentaje de arcilla alofánica, por lo que se les denomina suelos alofánicos.

2.6.2. Propiedades Singulares

Los suelos derivados de cenizas volcánicas, entre ellos el trumao, poseen propiedades singulares no encontradas en otros suelos denominados tradicionales, heredadas de las partículas que lo conforman, así también de la micro y macro estructura generada por el

proceso de enfriamiento y depositación de la ceniza volcánica. Dentro de las propiedades más características se encuentran:

- Baja densidad seca.
- Alta capacidad de retener agua.
- Fuerte influencia de su microestructura en el comportamiento tensión deformación.
- Al ser sometidos a distintos grados de secamiento, cambia por completo su estructura irreversiblemente, tratándose en cada grado de un suelo distinto.
- Alta sensibilidad al remoldeo en el ensaye de compresión no confinada (ver figura 13).
- Por lo general son suelos muy compresibles.

Estas propiedades conducen a que estos suelos posean un comportamiento geomecánico problemático.

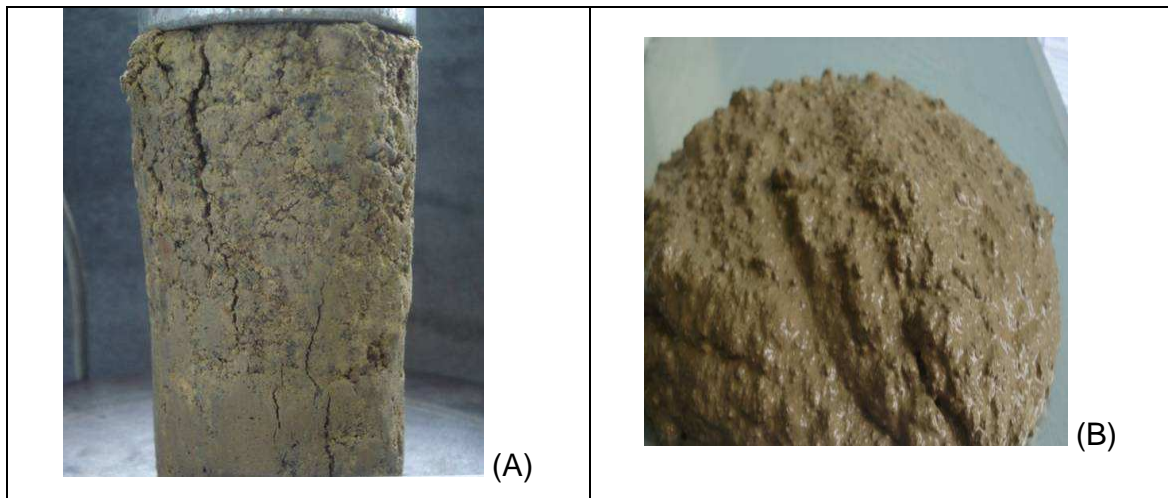


Figura Nº 13: Influencia del remoldeo en una muestra de suelo alofánico obtenida de la localidad de Curaco, Chile. (A) muestra inalterada, (B) muestra remoldeada.

2.6.3. Resultados de Estudios Anteriores en Suelos Alofánicos Chilenos (Paredes 2005)

Paredes (2005) realizó un extenso programa de ensayos de laboratorio sobre suelos de origen volcánico de la zona centro-sur del país, para el estudio de las propiedades singulares antes mencionadas. En particular, utilizó seis suelos alofánicos, y un suelo rojo arcilloso, extraídos entre la VIII y IX Región, tal como lo indica la siguiente figura.

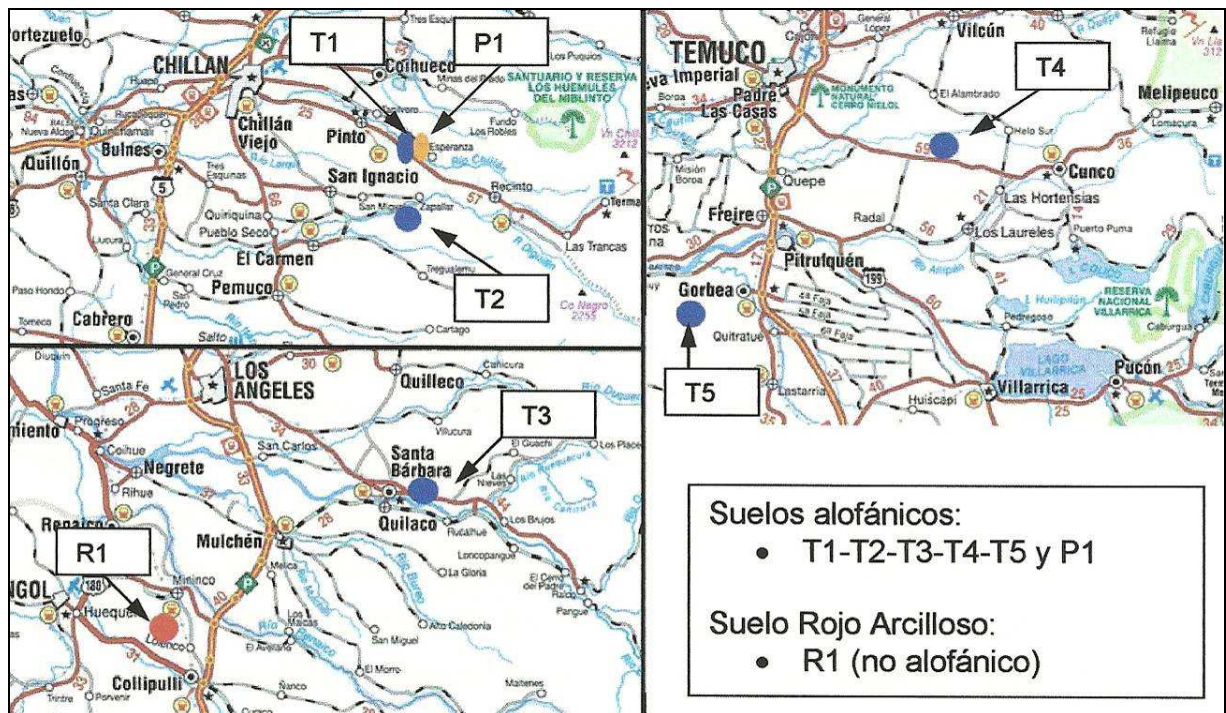


Figura N° 14: Ubicación de los Suelos Muestreados y Ensayados por Paredes (2005).

Los suelos alofánicos denominados T1, T2, T3, T4 y T5 corresponden a suelos del tipo Trumao. Mientras que P1 fue designado aparte por poseer un alto porcentaje de vidrio tipo pómez.

El suelo Rojo Arcilloso, a pesar de ser de origen volcánico, no corresponde a suelo alofánico por poseer un grado de alteración avanzado, tal como se señaló en el capítulo 2.5.2.

Acerca de los resultados de ensayos de caracterización y comportamiento geomecánico realizados por Paredes, se concluye lo siguiente:

Contenido de Alofán:

Los suelos alofánicos estudiados resultaron poseer porcentajes de alofán entre 18% (suelo T3) y 36% (suelo P1). Mientras que el suelo Rojo Arcilloso no presentó contenido de Alofán.

Densidad Seca y Contenido de Humedad:

La densidad seca obtenida de los suelos alofánicos varió entre 0.5 y 0.85 t/m³ (valores inferiores a la densidad del agua). Mientras que el suelo Rojo Arcilloso presenta densidades secas del orden de 1.4 t/m³. Por lo que la densidad seca permite distinguir entre suelos alofánicos y no-alofánicos. Las bajas densidades se explican por la singular estructura generada en estos suelos volcánicos, determinada por el contenido de alofán e imogolita, los cuales le otorgan un elevado índice de vacíos.

En cuanto al contenido de humedad natural, los suelos alofánicos poseen humedades que fluctúan entre 80% y 160%, generadas por la gran retención de agua que poseen las partículas de alofán e imogolita. Estos suelos en terreno no presentan una estructura barrosa, debido a que parte del agua permanece retenida en el interior de las partículas, no interactuando con el medio.

Peso Específico de los Sólidos Gs:

El peso específico de los sólidos depende de las condiciones de secado, entregando valores mayores para el suelo ensayado con humedad natural que cuando es secado previamente al horno. De esta forma, los valores de Gs varían entre 2.63 y 2.78, dependiendo del proceso de secamiento. Estas diferencias pueden ser explicadas debido a que la muestra posterior al secamiento en horno, no logra hidratar completamente el interior de las partículas, dejando así espacios llenos de aire.

Limites de Atterberg:

Los suelos alofánicos son significativamente afectados por las condiciones de humedad, o condiciones de secado previo al ensayo. La magnitud de las variaciones de los límites, entre el suelo en estado natural y el suelo previamente secado al horno es un indicador aproximado de la cantidad de arcilla alofánica contenida en el suelo. Por ejemplo, en el suelo P1 la diferencia entre los límites producida por el proceso de secado, es mayor que en el suelo T3. En la figura 15 se resumen los resultados obtenidos por Paredes (2005) para los límites de Atterberg bajo condiciones de secamiento previo en horno a 105°C y a humedad natural. Notar que en la muestra no alofánica R1, la diferencia que se produce por el proceso de secado no es considerablemente alta como en suelos alofánicos.

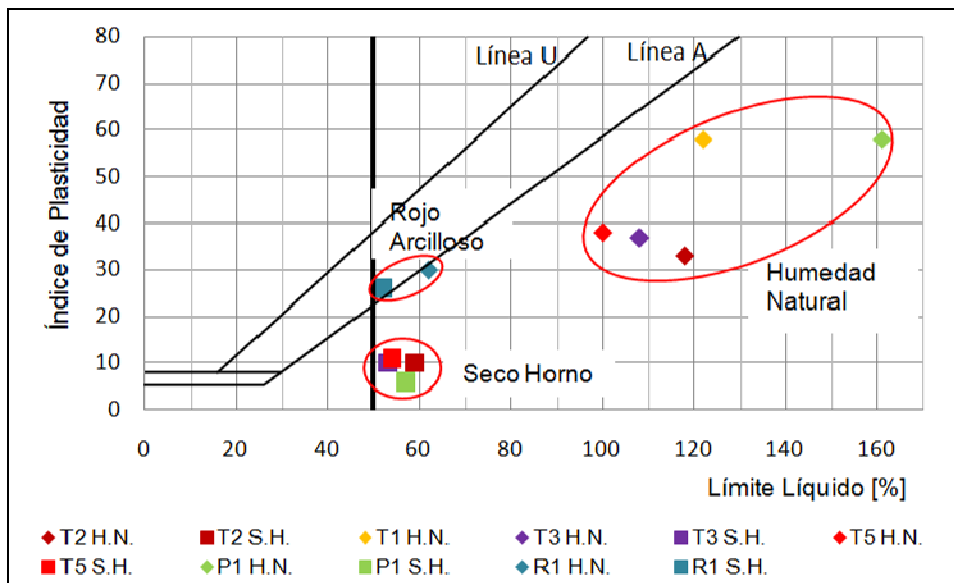


Figura N° 15: Límites de Atterberg Suelos Alofánicos y No Alofánicos (Paredes 2005)

De acuerdo a la clasificación USCS, los suelos alofánicos pertenecen al grupo de limos MH. No obstante, estos suelos por su tamaño de partícula corresponden a arcillas, los cuales son desplazados en la carta de plasticidad, debido a la existencia de agua interna que no interactúa con el medio particulado.

Análisis Granulométrico:

De acuerdo al análisis granulométrico, los suelos alofánicos del tipo trumao poseen una fracción fina (material pasante bajo malla ASTM N° 200) mayor al 70%.

En cuanto al análisis hidrométrico de la fracción fina, Paredes (2005) señala que el método posee objeciones, debido a que las partículas de alofán e imogolita tienden a aglomerarse siendo muy difícil su separación, aun con el uso de desfloculante. Esto hace que los resultados obtenidos por este método sobreestiman el tamaño real de las partículas, subestimando el porcentaje de partículas menores a 2 micrones.

Ensayos de Compactación:

La densidad seca máxima y la humedad óptima obtenidas a través del ensaye Proctor Modificado, varían substancialmente dependiendo del tipo de secado previo al ensayo. En ensayos realizados utilizando la muestra de trumao T3, se obtuvo un valor de densidad seca máxima de 0.79 t/m^3 para un ensayo realizado a humedad natural, y una densidad seca máxima aproximada de 1.27 t/m^3 para un ensayo realizado con la muestra secada previamente en horno a 105°C .

Ensayos de Permeabilidad:

La permeabilidad de los suelos alofánicos estudiados fue del orden de $2.0\text{E}-04 \text{ cm/s}$, determinada en probetas en estado inalterado.

Consolidación Odométrica:

Los suelos alofánicos estudiados, presentan presiones de fluencia o preconsolidación variables entre 1.5 kg/cm^2 y 2.0 kg/cm^2 , las cuales no provienen de una sobrecarga geológica, sino más bien son explicables por efectos físico-químicos de la estructura, desarrollados durante el proceso de alteración.

Compresión no Confinada CNC – Sensitividad:

La sensitividad medida mediante ensayos de compresión no confinada, utilizando muestras inalteradas y remodeladas de los suelos alofánicos estudiados, varía entre 3 y 12.

Ensayos Triaxiales CIU:

La presión de preconsolidación obtenida mediante ensayos odométricos, tiene correspondencia con el comportamiento dilatante y contractivo observado en probetas inalteradas en ensayos triaxiales, cuyo umbral se encuentra a una presión isotrópica entre 1.0 kg/cm^2 y 1.5 kg/cm^2 .

El ángulo de fricción interna que se desprende para el suelo trumao T1 en condición residual es de 38° , mientras que la cohesión es nula para la misma condición. Para el suelo P1, el ángulo de fricción residual es de 39° , y la cohesión 0.54 kg/cm^2 .

Resistencia Cíclica:

Para presiones de confinamiento inferiores a la presión de fluencia (preconsolidación) del suelo, la resistencia cíclica alcanzada por las probetas de suelo alofánico es elevada. Mientras que para presiones superiores a la de preconsolidación, dicha resistencia cae drásticamente.

Influencia de la Microestructura:

Por último, Paredes (2005) señala que los suelos alofánicos poseen una microestructura que los hace ser rígidos frente a bajas presiones de confinamiento, y bastante más deformable cuando la carga de consolidación supera la tensión de fluencia.

2.7. Depósitos de Pómez Plinianas del sector Neltume, Región de los Ríos

En la cordillera de Los Andes, y particularmente en Chile, existen volcanes que han estado asociados a erupciones del tipo plinianas, las que se caracterizan por un alto grado de explosividad, con manifestaciones muy violentas en las cuales se liberan grandes volúmenes de material piroclástico pumiceo (mayor 1km^3) a gran velocidad y altura (mayor a 25km), logrando alcanzar amplias áreas de dispersión.

Dentro de las principales características que se observan en terreno, para los materiales piroclásticos de caída generados por este tipo de erupciones (depósitos plinianos), se encuentran los siguientes (Sepúlveda F. 2004):

- Son constituidos principalmente por pómez (las cenizas se quedan en la alta atmósfera).
- Cubren la topografía de una capa continua de pómez (espesor de unos 5-10m cerca del punto de emisión).
- Los líticos más pesados caen cerca de la zona de emisión.
- Son depósitos fríos y por lo tanto no hay materia orgánica carbonizada en la base.
- La dispersión espacial es controlada por la dirección del viento.

Por otra parte, debido a los grandes volúmenes de material emitido durante una erupción pliniana, el resultado es el vaciamiento de la cámara magmática y el consecuente colapso de los aparatos volcánicos formando calderas.

Uno de estos grandes depósitos se encuentran en la región de Los Ríos (XIV), precisamente en el sector de Neltume, en donde los depósitos de pómez pumiceas o de caída, fueron originadas por erupciones plinianas del grupo volcánico Mocho-Choshuenco.

El material constituyente de estos depósitos, por lo general, clasifica de acuerdo a USCS como grava debido al predominio de partículas de tamaño sobre 5.0mm. Comúnmente se les asocia con el nombre de Lapilli debido al tamaño característico de las partículas (ver tabla 1). Dichas partículas poseen una alta porosidad como consecuencia del proceso eruptivo que las generaron, y en conjunto generan un esqueleto granular altamente compresible y de alta permeabilidad.

Además, es posible encontrar estos depósitos de pómez plinianas generando taludes naturales de gran pendiente, cercana o igual a la vertical. No obstante, al ser remodelados pierden radicalmente esta condición.

En la figura 16 se muestra una fotografía de un talud natural en la zona de Neltume (figura 16.A) constituido por pómez plinianas y una imagen de las partículas que constituyen este material (figura 16.B).

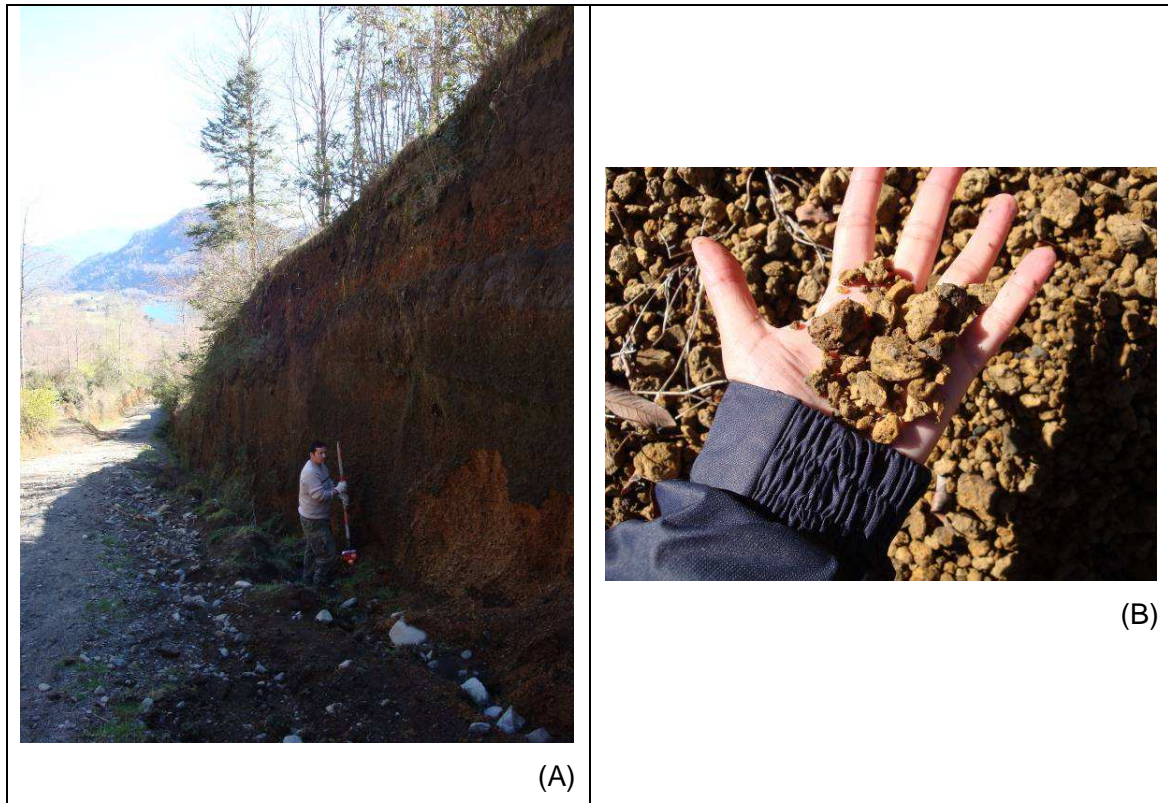


Figura Nº 16: (A) Talud natural constituido por pómez plinianas del sector de Neltume. (B) Partículas constituyentes del material (gentileza Ingendesa S.A).

2.7.1. El Grupo Volcánico Mocho-Choshuenco “GVMCH”

El Complejo volcánico Mocho-Choshuenco se localiza en la XIV Región de los Ríos, provincia de Valdivia, al este del lago Riñihue y sur del lago Panguipulli.

Este Complejo volcánico tiene al norte el volcán Choshuenco, que está erosionado e inactivo, con 2.360 m.s.n.m. y al centro sur el volcán Mocho, que corresponde a un cono truncado activo, alojado en el interior de una caldera de 4km de diámetro, con unos 2.430 m.s.n.m. La edad del Complejo es pleistocena superior a holocena (histórica) y presenta una composición química andesítica a dacítica (www.sernageomin.cl).

En la figura 17 se presenta un esquema de la ubicación del grupo volcánico Mocho-Choshuenco y en la figura 18 una fotografía aérea de éste.



Figura N° 17: Mapa ubicación Grupo Volcánico Mocho-Choshuenco “GVMCH” (ref. Turiscom)

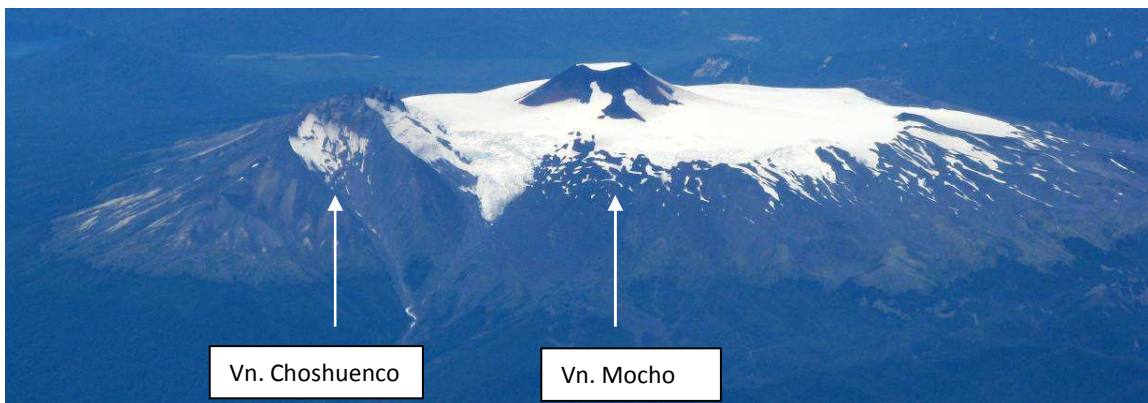


Figura N° 18: Grupo volcánico Mocho-Choshuenco, vista oeste. A la izquierda volcán Choshuenco, a la derecha volcán Mocho (Google Earth).

En cuanto a su actividad eruptiva, se puede mencionar que a partir del Holoceno temprano y desde centros eruptivos ubicados en el interior de la caldera, ocurrió un intenso volcanismo explosivo con emisión de flujos y oleadas piroclásticas, que incluyeron dos erupciones plinianas de gran magnitud. Esta etapa estuvo acompañada por abundantes emisiones de lava desde la caldera y por erupciones en sus flancos medios. Mientras que el volcanismo reciente ha sido acompañado también de una intensa

actividad explosiva freatomagmática. Actualmente, no presenta signos de actividad visible, aunque registra algo de actividad microsísmica instrumental y varias fuentes termales en sus cercanías (Carta Geológica de Chile N° 107, 2007).

2.7.2. Definición, Distribución y Litología del Depósito de Pómez Plinianas del Volcán Mocho-Choshuenco

La pómez pliniana del volcán Mocho-Choshuenco es un depósito pumiceo de caída, que se distribuye de forma elíptica, con un vértice en el GVMCH, extendiéndose hacia el norte hasta los alrededores de la localidad de Pucón. Su borde oriental pasa al este de las localidades de Liquiñe, Carirriñe, Panguín Alto, y por el flanco oeste del volcán Quetrupillán. Su borde occidental presenta una forma irregular y pasa por el erosionado volcán Quinchilca y al este de la ciudad de Villarrica, tal como se aprecia en la figura 19. Este depósito cubre un área aproximada de 1.800 km² y aparece tanto en los niveles topográfico más bajos, esto es, el piso de valles y quebradas, bordes de río, como en los niveles más altos, yaciendo con variados ángulos de inclinación. A lo lejos se distingue como un manto continuo en laderas y cerros, cortado abruptamente debido a deslizamientos del depósito mismo como del suelo sobre el cual yace (Echegaray J. 2004).

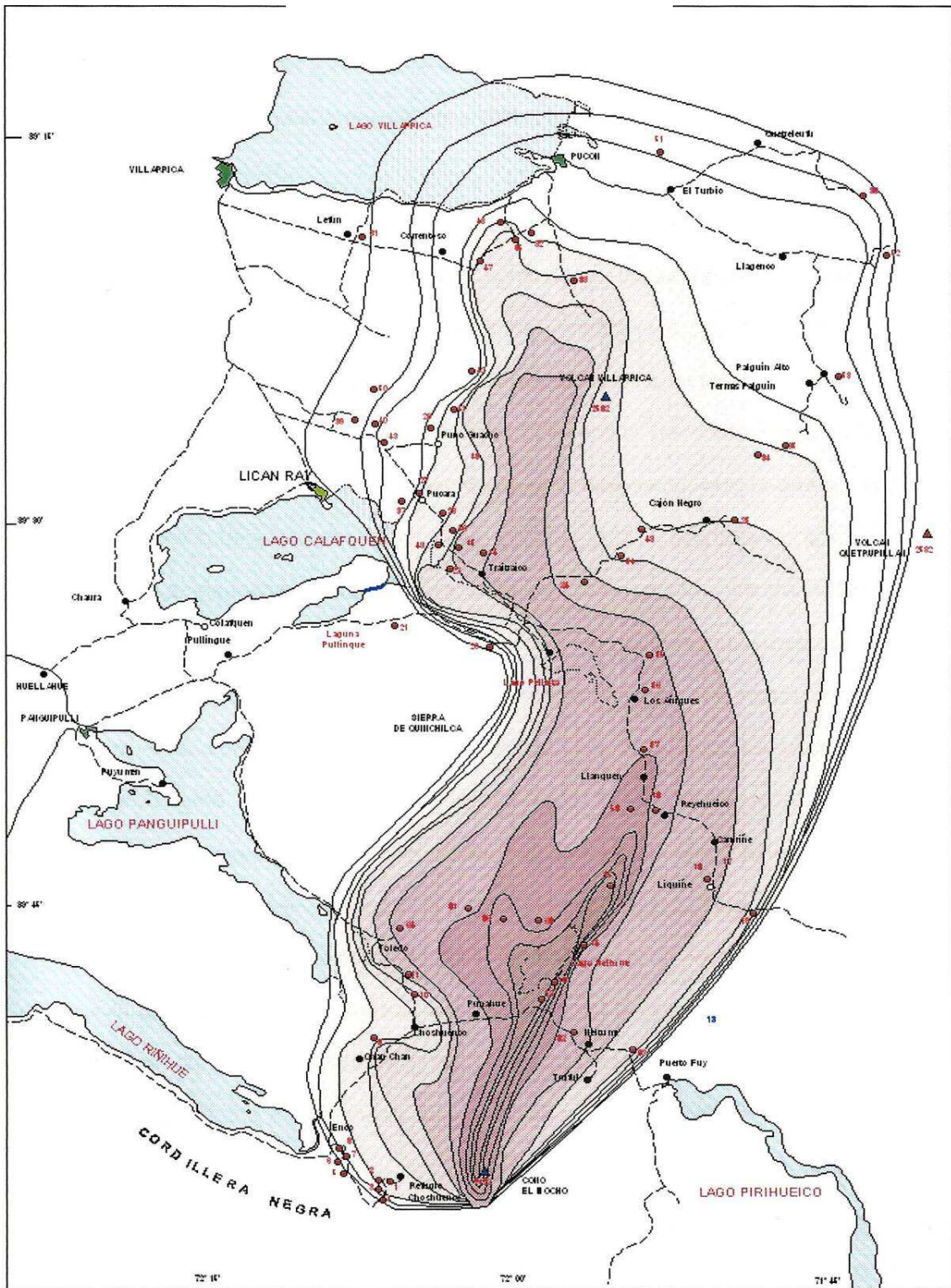


Figura N° 19: Distribución de depósitos de pómez plinianas del Volcán Mocho Choshuenco (Echegaray J. 2004).

El material que compone este depósito es de aspecto homogéneo, y corresponde en más de un 90% a pómez y a 10% líticos, con tamaños que van desde unos cuantos milímetros (cenizas) hasta 30 cm y ocasionalmente 60 cm (lapilli, bloque y/o bomba). Los fragmentos pumiceos presentan una coloración amarilla-parda y/o parda grisácea, en cuanto a los fragmentos líticos son de color gris claro a oscuro. El contenido de SiO₂ de la pómez fluctúa entre un 62,16%, y un 66,76% (Echegaray J. 2004)

En cuanto a la graduación del depósito y el contenido de líticos, generalmente, varían de acuerdo a la distancia en que se encuentre desde el complejo volcánico, disminuyendo su graduación y contenido de líticos a medida que se aleja del centro de emisión. Lo que presumiblemente se deba a las características de la erupción volcánica, tales como altura alcanzada por la columna eyectada, turbulencias y uniformidad de la pluma al encontrarse más alejada del centro de emisión (Fischer y Schmincke, 1984 y Walker 1981).

El depósito presenta una fuerte oxidación y meteorización avanzada, producida por los factores climáticos y vegetación presentes en la zona, los cuales corresponden a climas húmedos, con altos niveles de precipitación y a una vegetación boscosa. Por otra parte los espesores para este depósito varían entre 15 cm y 6.0 m (Echegaray J. 2004).

Dataciones con C¹⁴ permiten estimar que la erupción que dio origen a los depósitos de pómez plinianas del grupo Mocho-Choshuenco, tuvo lugar hace aproximadamente 9000 M.A. (Echegaray J. 2004).

Sobre la caracterización geotécnica y del comportamiento geomecánico de este depósito, no se encontró información.

3. SUELOS ESTUDIADOS, MUESTREO Y DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA, PROGRAMAS DE ENSAYOS - PROCEDIMIENTOS

3.1. Suelos Ensayados

En esta tesis se desarrolla el estudio de dos suelos de origen volcánico, el primero de ellos corresponde al suelo alofánico denominado trumao de Chillán, mientras que el segundo es el depósito de pómez plinianas ubicadas en el sector de Neltume, región de los Ríos.

3.1.1. Trumao de Chillán

El trumao de Chillán corresponde a un suelo alofánico cuyo estudio nace por la necesidad de complementar la investigación realizada por Paredes (2005), enfocándose particularmente en la determinación de la influencia de la microestructura que poseen estos suelos en el comportamiento tensión-deformación.

3.1.2. Pómez Plinianas del sector Neltume, Región de los Ríos

El segundo suelo corresponde al depósito de pómez plinianas ubicado en el sector de Neltume, generado por erupciones explosivas del Grupo Volcánico Mocho Choshuenco. Dicho depósito merece ser estudiado debido a la carencia de información relacionada a la caracterización geotécnica y particularmente al comportamiento geomecánico que poseen este tipo de suelos, antecedentes necesarios debido al desarrollo de proyectos de ingeniería que buscan emplazarse en el sector.

Es importante mencionar que el estudio de este suelo se llevó a cabo utilizando la información relacionada a la exploración geotécnica y ensayos de laboratorio proporcionados por la empresa Ingendesa S.A, la cual, al momento de realizado este trabajo, desarrolla un proyecto energético en uno de los sectores en donde se ubica este tipo de depósitos.

3.2. Muestreo y Descripción Estratigráfica

Para la realización del estudio de cada suelo, fue necesaria la extracción de muestras en terreno, las que fueron posteriormente sometidas a ensayos de laboratorio. A continuación se entregan detalles de las exploraciones geotécnicas y muestreo realizadas.

3.2.1. Trumao de Chillán

- Toma de Muestras en Terreno

La toma de muestras en terreno para este estudio se llevó a cabo en tres oportunidades: en Marzo de 2007, Marzo de 2008 y Noviembre de 2009; las tres consistieron en la toma de muestras desde un talud ubicado en la ruta que une la ciudad de Chillán con las termas que llevan el mismo nombre, a 19 km al sur-este del pueblo de Pinto. El suelo muestreado corresponde al descrito como T1 por Paredes (2005). En la figura 20 se señala la ubicación del lugar de muestreo.



Figura Nº 20: Ubicación de la zona de extracción de muestras (Ref. Google Earth).

En los tres casos, el muestreo consistió en la extracción mediante tallado de bloques in-situ de muestras “inalteradas” de trumao desde la ladera del talud carretero mencionado.

En las figuras 21, 22 y 23 se presentan fotografías del área de muestreo y de las muestras extraídas.



Figura Nº 21: Lugar muestreo realizado en Marzo de 2007



Figura Nº 22: Toma de muestras realizada en Marzo de 2008

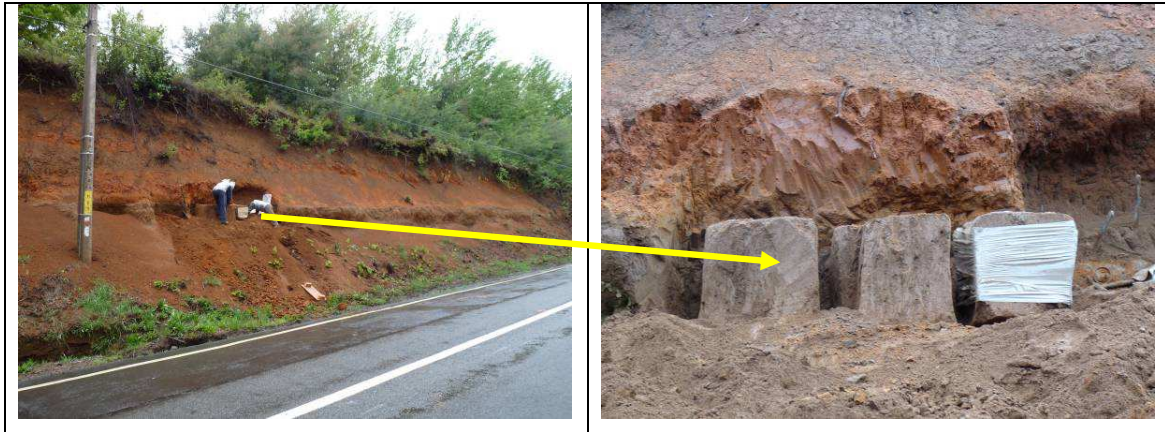


Figura N° 23: Toma de muestras realizada en Noviembre de 2009

- **Descripción Estratigráfica del Talud Muestreado**

En general, el talud está compuesto por estratificaciones de limos, de colores café anaranjados y café oscuro, derivados de cenizas volcánicas jóvenes. Las edades de las depositaciones varían de acuerdo a su posición en elevación, siendo las más antiguas aquellas que se encuentran más cercanas a la base del talud.

Paredes (2005) identificó dos de los estratos o depositaciones mencionadas, identificados como P1 y T1 (ver figura 24), ambos correspondientes a cenizas volcánicas alteradas con arcilla alofánica predominante, indicando lo siguiente:

Estrato P1: Limo de color café anaranjado, de plasticidad alta, y humedad alta, posee un 80% de matriz vítrea y el resto son cristales y líticos. Se estima que su edad es inferior a los 5000 años.

Estrato T1: Limo de color café oscuro algo rojizo, de plasticidad alta, humedad alta, posee un 70% de matriz vítrea y el resto son cristales. Se estima que la edad de este depósito se encuentre entre los 5000 y 10000 años.

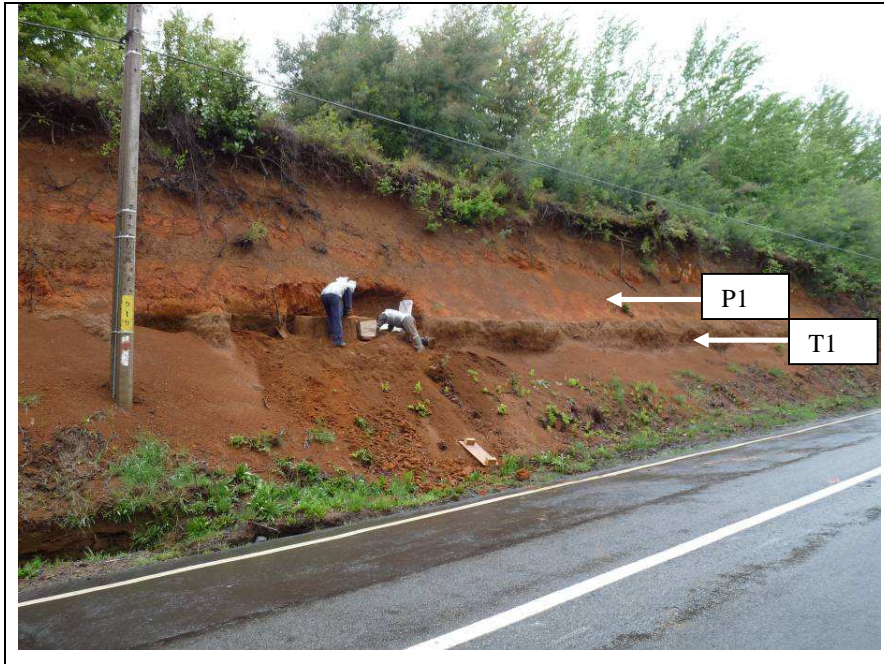


Figura Nº 24: Estratificaciones de Cenizas Alteradas en Talud de Muestreo

3.2.2. Pómez Plinianas Sector de Neltume, Región de Los Ríos

La exploración geotécnica y muestreo realizada por la empresa Ingendesa S.A., para la obtención de las muestras de pómez plinianas utilizadas en este estudio, se resume a continuación.

- **Toma de Muestras en Terreno**

Las muestras utilizadas en los ensayos que se presentan en este trabajo fueron extraídas de 5 calicatas de exploración, denominadas con los nombres: CPM-1, CPM-3, CIF-15, CCE-5b y CMLR-3b; la cuales se ubican entre el borde oriental del Lago Neltume y la localidad de Puerto Fuy, Región de los Ríos, tal como se señala en la figura 25.

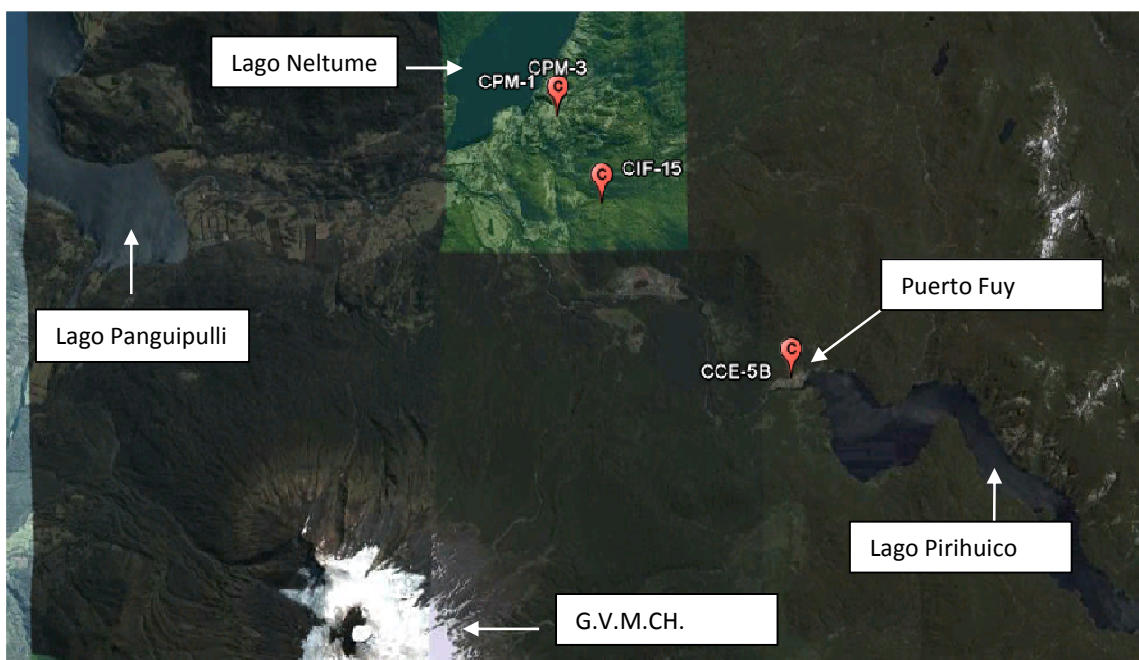


Figura N° 25: Esquema de ubicación pozos de exploración (imagen base ref. Google Earth).

La tabla 7 presenta las coordenadas (WGS84 H19) de 4 de los pozos señalados, así también su profundidad y fecha de exploración.

Tabla N° 7: Ubicación pozos de exploración (Coordenadas WGS84 H19).

Nombre Calicata	Ubicación		Profundidad [m]	Fecha
	N [m]	E [m]		
CPM-1	5589460,1	246021,2	5,60	18-10-2009
CPM-3	5589493,1	246035,1	5,60	08-10-2009
CIF 15	5587080	247292	5,00	13-10-2008
CCE 5B	5582444	252555	4,10	19-12-2008

De cada pozo de exploración, se extrajeron muestras inalteradas y perturbadas de pómez plinianas. Debido a la complejidad existente en la extracción de especímenes inalterados en este tipo de suelo, se utilizó una metodología especial, la cual se describe a continuación:

- Tallado de la muestra utilizando las dimensiones para ensayo final en laboratorio.
- Colocación de geomembrana, y caps superior e inferior.
- Aplicación de vacío.
- Disposición de la muestra dentro de un recipiente cilíndrico de PVC.
- Llenado de los espacios vacíos del recipiente de PVC con arena, de modo de evitar el movimiento de la probeta en su interior.
- Sellado del recipiente de PVC.

En la figura 26 se ilustra la secuencia del muestreo descrita.



Figura Nº 26: Secuencia de Extracción de muestras inalteradas (gentileza Ingendesa S.A).

Mientras que las muestras perturbadas fueron extraídas a granel y transportadas en bolsas plásticas.

El listado de muestras extraídas utilizadas en esta tesis, indicando su profundidad y tipo, se resume en la tabla 8.

Tabla Nº 8: Listado de Muestras Pómez Plinianas

Identificación de Muestra	Calicata	Cota [m]	Tipo
CCE-5B	CCE-5B	4,50	Perturbada
CIF 15	CIF 15	3,50	Perturbada
CPM-1	CPM-1	2,80-3,10	Perturbada
CPM-1	CPM-1	4,20-4,50	Perturbada
CPM-3	CPM-3	3,20-3,50	Perturbada
CPM-3	CPM-3	4,00-4,30	Perturbada
CMLR-3B	CMLR-3B	3,35-3,65	Perturbada
CMLR-3B	CMLR-3B	4,50-4,80	Perturbada
CPM-1	CPM-1	2,80-3,10	No Perturbada
CPM-1	CPM-1	4,20-4,50	No Perturbada
CPM-3	CPM-3	4,00-4,30	No Perturbada
CPM-3	CPM-3	3,20-3,50	No Perturbada
CMLR-3B	CMLR-3B	3,35-3,65	No Perturbada
CMLR-3B	CMLR-3B	4,50-4,80	No Perturbada
CPM-1 CONSOLIDACION	CPM-1	2,80-2,95	No Perturbada
CPM-3 CONSOLIDACION	CPM-3	3,30-3,35	No Perturbada
CMLR-3B CONSOLIDACION	CMLR-3B	3,35-3,50	No Perturbada
CPM-1 DENSIDAD	CPM-1	2,60	Perturbada
CPM-1 DENSIDAD	CPM-1	5,60	Perturbada
CPM-3 DENSIDAD	CPM-3	2,05	Perturbada
CPM-3 DENSIDAD	CPM-3	2,65	Perturbada
CPM-3 DENSIDAD	CPM-3	5,60	Perturbada
CMLR-3B DENSIDAD	CMLR-3B	5,00	Perturbada
CMLR-3B DENSIDAD	CMLR-3B	6,10	Perturbada
CCE-5B	CCE-5B	4.50	No Perturbada

- **Descripción Estratigráfica de los Pozos de Exploración**

A continuación se presentan los modelos estratigráficos correspondientes a los pozos de exploración señalados.

Tabla Nº 9: Descripción Estratigráfica Pozo CPM-1

Horizonte	Cota [m]	Descripción Estratigráfica
H-1	0.00–0.13	Carpeta vegetal.
H-2	0.13–1.55	Estratificaciones de limos y limos arenosos, de colores café oscuro y café amarillento, consistencia blanda a media, plasticidad baja a nula. Presenta gravas finas aisladas de tamaño máximo 2”.
H-3	1.55–5.60	Estratificaciones de pómez plinianas, colores café rojizo y café claro, estructura heterogénea, compacidad baja, tamaño predominante de las partículas 1”. Partículas de pómez presentan alteración y son desmenuzables. Se observan líticos de color negruzco, de tamaños entre 3mm y ½”.

Tabla Nº 10: Descripción Estratigráfica Pozo CPM-3

Horizonte	Cota [m]	Descripción Estratigráfica
H-1	0.00–0.07	Carpeta vegetal.
H-2	0.07–1.10	Estratificaciones de limos, limos arenosos y arenas limosas, de color café oscuro, consistencia media (limos), compacidad alta (arenas), plasticidad de los finos aumenta en profundidad de baja a alta plasticidad. Presenta gravas finas aisladas de tamaño máximo entre ½” y ¾”.
H-3	1.10–5.60	Estratificaciones de pómez plinianas, colores café rojizo y café rojizo amarillento, estructura heterogénea, compacidad baja, tamaño predominante de las partículas 1” aumentando en profundidad hasta 2”. Partículas de pómez presentan alteración y son desmenuzables. Se observan líticos de color negruzco, de tamaños entre 3mm y ½”.

Tabla N° 11: Descripción Estratigráfica Pozo CMLR-3B

Horizonte	Cota [m]	Descripción Estratigráfica
H-1	0.00–0.10	Carpeta vegetal.
H-2	0.10–1.90	Estratificaciones de limos, limos arenosos y arenas, de color café oscuro y café claro, consistencia media (limos), compacidad alta (arenas), plasticidad de los finos baja. Cercano a la superficie presenta gravas finas aisladas de tamaño máximo ¾".
H-3	1.90–2.40	Estratificaciones de pómez plinianas, color café rojizo, estructura heterogénea, compacidad baja. Partículas de pómez presentan alteración y son desmenuzables. Se observan líticos de color negruzco, de tamaño inferior a ½".
H-4	2.40–2.60	Limo de color café oscuro, plasticidad media, estructura homogénea algo porosa, consistencia alta. Presenta partículas de pómez dispersas en todo el estrato.
H-5	2.60–3.30	Estrato de transición, pómez en matriz de de limo, color café rojizo. Se observan líticos de color negruzco.
H-6	3.30–6.20	Estratificaciones de pómez plinianas, colores café rojizo y café amarillento, estructura heterogénea, compacidad baja, tamaño máximo 2 1/2". Partículas de pómez presentan alteración y son desmenuzables en los primeros metros del estrato, en profundidad aumentan su dureza y calidad. Se observan líticos de color negruzco, de tamaño máximo ½".
H-7	6.20–6.40	Limo de color café oscuro, plasticidad alta, estructura homogénea y porosa, consistencia alta, humedad alta a saturada. Se observan abundantes partículas dispersas de pómez color rojizo alteradas.

Tabla Nº 12: Descripción Estratigráfica Pozo CIF-15

Horizonte	Cota [m]	Descripción Estratigráfica
H-1	0.00–0.40	Carpeta vegetal.
H-2	0.40–1.30	Estratificaciones de limos, de color café y café rojizo, consistencia media, plasticidad de los finos media, estructura heterogénea.
H-3	1.30–4.20	Estratificaciones de pómez plinianas, color café amarillento, estructura homogénea, compacidad baja.
H-4	4.20–5.00	Limo de color café, plasticidad media, estructura homogénea, consistencia media, humedad alta.

Tabla Nº 13: Descripción Estratigráfica Pozo CCE-5B

Horizonte	Cota [m]	Descripción Estratigráfica
H-1	0.00–0.30	Relleno artificial.
H-2	0.30–2.07	Limo, color café claro, plasticidad media, estructura homogénea, consistencia alta. Presenta bolsones de arena y lentes de limos arenosos. El horizonte se presenta inclinado con manto sur este.
H-3	2.07–4.50	Estratificaciones de pómez plinianas, color café claro, estructura heterogénea, compacidad baja. El horizonte se presenta inclinado con manto sur este.

Nota: los modelos estratigráficos señalados anteriormente son de uso referencial, preferentemente para ubicación en profundidad de los horizontes de pómez plinianas.

3.3. Series de Ensayos y Procedimientos

Los ensayos de laboratorio ejecutados sobre las muestras de suelos en las diferentes etapas de exploración geotécnica, se realizaron de manera diferida en tres series de ensayos independientes. Dos de ellos correspondientes a ensayos para el estudio del Trumao de Chillán, y el tercero realizado sobre las muestras de pómez plinianas.

3.3.1. Serie de Ensayos 1: Trumao de Chillán

La primera serie de ensayos fue realizada sobre las muestras extraídas de los muestreos efectuados en los años 2007 y 2008, a solicitud y según programa definido por el profesor Ramón Verdugo, en el laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile por el Sr. Omar González. Dicho programa contempló la ejecución de los ensayos que se mencionan a continuación.

- Determinación de la Gravedad Específica de los Sólidos G_s: realizado de acuerdo a una metodología basada en la norma ASTM D854-58, utilizando una de las muestras extraídas el año 2007, preparada a humedad natural no sometiéndola a secamiento previo al ensayo.
- Ensayo de Consolidación: se ejecutaron ensayos de consolidación odométrica en probetas de suelo inalteradas y remoldeadas (mediante amasado, montadas a densidad y humedad natural), utilizando muestras extraídas el año 2007. El procedimiento para preparación de la muestra y ejecución del ensayo se resume a continuación:
 - o Preparación de probeta:
 - Probeta Inalterada: tallado probeta cilíndrica de 7.1 cm de diámetro, y 2.76 cm de altura.
 - Probeta Remoldeada: remoldeo de muestra natural mediante amasado, luego se confecciona la probeta a densidad y humedad natural, utilizando las mismas dimensiones que en probeta inalterada.
 - o Montaje de probeta de suelo en el equipo odométrico.

- Saturación de la probeta sin la aplicación de carga, midiendo deformación vertical.
- Aplicación de incrementos y decrementos de carga vertical midiendo la deformación axial sufrida por la probeta en el tiempo. La aplicación de una variación en carga se realiza posterior a la estabilización de la deformación para la carga anterior. A continuación se detallan los incrementos y decrementos de carga aplicado para cada tipo de probeta:
 - Probeta inalterada: 0.1 kg/cm², 0.25 kg/cm², 0.5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 4 kg/cm², 8 kg/cm², 16 kg/cm², 8 kg/cm², 4 kg/cm², 1 kg/cm², 0.1 kg/cm², 0.25 kg/cm², 0.5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 4 kg/cm², 8 kg/cm², 16 kg/cm², 32 kg/cm², 16 kg/cm², 8 kg/cm², 4 kg/cm², 0.1 kg/cm².
 - Probeta remoldeada: 0.1 kg/cm², 0.25 kg/cm², 0.5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 4 kg/cm², 8 kg/cm², 16 kg/cm², 32 kg/cm², 16 kg/cm², 8 kg/cm², 4 kg/cm², 0.1 kg/cm².
- Ensayo Triaxial Convencional Consolidado No-Drenado (CIU): realizado en probetas cilíndricas de 5x10 cm en condición inalterada y remoldeada (mediante amasado, montada a densidad y humedad natural). El procedimiento utilizado para el desarrollo de este ensayo se resume a continuación.
 - Preparación y montaje de probeta en celda triaxial.
 - Aplicación de CO₂.
 - Saturación de la probeta.
 - Revisión del grado de saturación con $B \geq 0.95$.
 - Consolidación isotrópica de la probeta a la presión de confinamiento de ensaye, registrando la variación volumétrica.
 - Aplicación del desviador de tensiones mediante deformación controlada, registrando carga vertical y presión de poros desarrolladas por la probeta.

En la tabla 14 se resume el listado de las muestras ensayadas, especificando: su nombre, tipo, presión de confinamiento de ensaye, contra presión, periodo de consolidación y año de muestreo.

Tabla N° 14: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU

Nombre Muestra	Tipo	Presión de Confinamiento Efectiva σ' [kg/cm ²]	Contra Presión BP [kg/cm ²]	Periodo de Consolidación Isotrópica [hrs]	Año Muestreo
NP1	Inalterada	0,5	2,0	4,0	2007
NP6	Inalterada	1,0	2,0	1,5	2007
NP7	Inalterada	2,0	2,0	0,7	2007
NP9	Inalterada	3,0	2,0	3,5	2007
NP11R	Inalterada	4,0	2,0	15,0	2007
NP19	Inalterada	6,0	1,0	15,0	2007
NP1-08	Inalterada	1,0	2,0	15,0	2008
NP3-08	Inalterada	2,0	2,0	15,0	2008
NP5-08	Inalterada	3,0	2,0	15,0	2008
NP7-08	Inalterada	4,0	2,0	15,0	2008
NP9-08	Inalterada	5,0	2,0	15,0	2008
RP2	Remoldeada	0,5	2,0	3,0	2007
RP3	Remoldeada	1,0	2,0	47,0	2007
RP5	Remoldeada	6,0	2,0	43,0	2007
RP4-08	Remoldeada	2,0	2,0	15,0	2008
RP6-08	Remoldeada	3,0	2,0	15,0	2008
RP8-08	Remoldeada	4,0	2,0	15,0	2008

- Ensayo Triaxial Consolidado No-Drenado con Probetas Pre-consolidadas Isotrópicamente: realizado en probetas cilíndricas de 5x10cm en condición inalterada y remoldeada (mediante amasado, montada a densidad y humedad natural). El procedimiento utilizado para el desarrollo del ensayo es el siguiente:
 - o Preparación y montaje de probeta en celda triaxial.
 - o Aplicación de CO₂.
 - o Saturación de la probeta.
 - o Revisión del grado de saturación con $B \geq 0.95$.

- Consolidación isotrópica a la presión de pre-consolidación, registrando la variación volumétrica.
- Descarga isotrópica de la probeta hasta la presión de confinamiento de ensaye.
- Consolidación isotrópica a la presión de confinamiento de ensaye.
- Aplicación del desviador de tensiones mediante deformación controlada, registrando carga vertical y presión de poros desarrolladas por la probeta.

En la tabla 15 se resume el listado de muestras ensayadas.

Tabla N° 15: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU preconsolidadas isotrópicamente.

Nombre Muestra	Tipo	Presión de Confinamiento Efectiva de Ensayo σ'_c [kg/cm ²]	Contra Presión BP [kg/cm ²]	Presión Preconsolidación Iso. σ_{pc}' [kg/cm ²]	Periodo de Preconsolidación Isotrópica [hrs]	Año Muestreo
NP2	Inalterada	0,5	2,0	1,0	15,0	2007
NP4	Inalterada	0,5	2,0	3,0	15,0	2007
NP5R	Inalterada	0,5	2,0	4,0	15,0	2007
NP8R	Inalterada	0,5	2,0	2,0	15,0	2007
NP12	Inalterada	3,0	1,0	6,0	15,0	2007
RP6	Remoldeada	0,5	2,0	6,0	48,0	2007
RP7	Remoldeada	0,5	2,0	3,0	26,0	2007

- Ensayo Triaxial Consolidado no Drenado Probetas Pre-consolidadas con Aplicación Previa de Corte sin Drenaje: realizado en probetas cilíndricas de 5x10cm en condición inalterada y remoldeada (mediante amasado, montadas a densidad y humedad natural). El procedimiento utilizado para el desarrollo de este ensayo se resume a continuación.
 - Preparación y montaje de probeta en celda triaxial.
 - Aplicación de CO₂.
 - Saturación de la probeta.

- Revisión del grado de saturación con $B \geq 0.95$.
- Aplicación de esfuerzo desviador “q” en condición no drenada, hasta una carga aproximada de 2/3 del esfuerzo de corte de falla de la probeta (velocidad de carga 0,13mm/min).
- Disminución del desviador continuando en condición sin drenaje (velocidad de descarga 0,13mm/min).
- Consolidación isotrópica a la presión de confinamiento de pre-consolidación por un periodo de al menos 12hrs, registrando la variación volumétrica.
- Descarga de la probeta hasta la presión de confinamiento isotrópica de ensaye.
- Consolidación isotrópica a la presión de confinamiento de ensaye.
- Aplicación del desviador de tensiones mediante deformación controlada, registrando carga vertical y presión de poros desarrolladas por la probeta.

En la tabla 16 se resume el listado de las muestras ensayadas.

Tabla N° 16: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU preconsolidadas isotrópicamente y con aplicación de razón de corte previo.

Nombre Muestra	Tipo	Presión de Confinamiento Efectiva de Ensaye σ'_c [kg/cm ²]	Contra Presión BP [kg/cm ²]	Desviador Previo Preconsolidación q [kg/cm ²]	Presión Preconsolidación Iso. σ_{pc}' [kg/cm ²]	Periodo de Preconsolidación [hrs]	Año Muestreo
NP17RR	Inalterada	0,5	1,0	1,47	6,0	15,0	2007
NP18	Inalterada	0,5	1,0	1,47	6,0	15,0	2007

3.3.2. Serie de Ensayos 2: Trumao de Chillán

La segunda serie de ensayos fue desarrollada por el autor de esta tesis, en el laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile, entre los años 2009 y 2011, sobre muestras extraídas el año 2009. El resumen de los ensayos efectuado, junto a sus respectivos procedimientos, se listan a continuación.

- Ensayos de Clasificación (Análisis Granulométrico, Humedad, Límites de Atterberg, Peso Específico, Peso Unitario)
 - o Análisis granulométrico: se realizó un análisis granulométrico mediante tamizado, utilizando una muestra de suelo a humedad natural y utilizando lavado con agua en cada tamiz. Adicionalmente, se ejecutó un análisis hidrométrico con material previamente secado al horno a 60°C, siguiendo recomendaciones de Norma ASTM D422.
 - o Determinación de humedad: se determinó la humedad natural o de terreno, de las muestras mediante secado al horno a 60°C.
 - o Límites de Atterberg: la determinación de los límites líquido y plástico, y posterior determinación de índice de plasticidad del suelo, se realizó utilizando muestras de trumao remoldeadas con humedad natural sin secamiento previo. Procedimiento utilizando recomendaciones de Norma ASTM D4318.
 - o Peso Específico: se determinó la gravedad específica de los sólidos, utilizando una muestra remoldeada seca al horno a 60°C compuesta por material de partículas de tamaño inferior al tamiz ASTM #4. Procedimiento utilizando recomendaciones de Norma ASTM D854.
 - o Peso Unitario: La determinación del peso unitario se realizó a muestras inalteradas talladas in-situ, mediante el método de volumen de agua desplazada. Procedimiento utilizando recomendaciones de Norma ASTM D7263 – 09.

- Ensayo de Consolidación: se ejecutaron ensayos de consolidación odométrica en probetas de suelo inalteradas y remoldeadas (mediante amasado, montadas a densidad y humedad natural). El procedimiento para preparación de la muestra y ejecución del ensayo se resume a continuación:
 - o Preparación de probeta:
 - Probeta Inalterada: tallado probeta cilíndrica de 7.1 cm de diámetro, y 2.76 cm de altura.
 - Probeta Remoldeada: remoldeo de muestra natural mediante amasado, luego se confecciona la probeta a densidad y humedad natural, utilizando las mismas dimensiones que en probeta inalterada.
 - o Montaje de probeta de suelo en el equipo odométrico.
 - o Saturación de la probeta durante 192 hrs (8 días) en el caso de la muestra inalterada, y 216 hrs (9 días) en el caso de la remoldeada. El proceso de saturación se realizó sin la aplicación de carga, midiendo deformación vertical.
 - o Aplicación de incrementos y decrementos de carga vertical midiendo la deformación axial sufrida por la probeta en el tiempo. La aplicación de una variación en carga se realiza posterior a la estabilización de la deformación para la carga anterior. A continuación se detallan los incrementos y decrementos de carga aplicado para cada tipo de probeta:
 - Probeta Inalterada: 0.1 kg/cm², 0.25 kg/cm², 0.5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 4 kg/cm², 8 kg/cm², 16 kg/cm², 8 kg/cm², 4 kg/cm², 1 kg/cm², 0.1 kg/cm², 2 kg/cm², 8 kg/cm², 16 kg/cm², 4 kg/cm², 1 kg/cm², 0.5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 5 kg/cm², 8 kg/cm², 4 kg/cm², 1 kg/cm², 0.1 kg/cm² y 0 kg/cm².
 - Probeta Remoldeada: 0.1 kg/cm², 0.25 kg/cm², 0.5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 5 kg/cm², 8 kg/cm², 4 kg/cm², 1 kg/cm², 0.1 kg/cm² y 0 kg/cm².

- Ensayo de Compresión No Confinada: se realizaron ensayos de compresión no confinada en probetas cilíndricas inalterada y remoldeada (mediante amasado, montada a humedad y densidad natural), de dimensiones 5cm de diámetro por 10cm de altura; determinando la sensibilidad del suelo frente a la perturbación de la muestra. Procedimiento utilizando recomendaciones de Norma ASTM D2166-00).

- Ensayo Triaxial CIU: se ejecutaron ensayos triaxiales consolidados no drenados a deformación controlada, en probetas de suelo inalteradas de 5cm de diámetro por 10cm de altura. Utilizando presiones de confinamiento entre 0.5kg/cm^2 y 3.0kg/cm^2 . La metodología empleada para la realización de estos ensayos, se resume a continuación:
 - o Preparación y montaje de probeta en celda triaxial.
 - o Aplicación de CO_2 por un periodo de al menos 45min.
 - o Saturación de la probeta por un periodo de al menos 45min.
 - o Revisión del grado de saturación con $B \geq 0.95$
 - o Consolidación isotrópica de la probeta a la presión de confinamiento de ensaye, registrando la variación volumétrica.
 - o Aplicación del desviador de tensiones mediante deformación controlada, registrando carga vertical y presión de poros desarrolladas por la probeta.

En la tabla 17 se resume el listado de las muestras ensayadas, especificando: nombre, tipo, presión de confinamiento de ensaye, contra presión, periodo de consolidación.

Tabla N° 17: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU

Nombre Muestra	Tipo	Presión de Confinamiento Efectiva σ_c' [kg/cm ²]	Contra Presión BP [kg/cm ²]	Periodo de Consolidación Isotrópica [hrs]
ciu1q3	Inalterada	0,5	5,0	14,0
ciu2q3	Inalterada	1,0	4,0	16,0
ciu3q3	Inalterada	3,0	3,0	15,0
ciu4q3	Inalterada	1,0	2,0	16,0
ciu5q1	Inalterada	1,5	3,0	12,0

- Ensayo Triaxial Cíclico No Drenado Consolidado isotrópicamente: se realizaron ensayos triaxiales cíclicos no drenados, en probetas inalteradas y remodeladas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, a presiones de confinamiento entre 0.5 kg/cm² y 4.0 kg/cm², con razones de corte cíclica entre 0.25 y 1.16. La metodología empleada para la realización de estos ensayos se señala a continuación:

Probetas Inalteradas:

- o Preparación y montaje en celda triaxial.
- o Aplicación de CO₂ por un periodo de al menos 45min.
- o Saturación de la probeta por un periodo de al menos 45min.
- o Revisión del grado de saturación con $B \geq 0.95$.
- o Consolidación isotrópica de la probeta a la presión de confinamiento de ensaye, registrando la variación volumétrica.
- o Aplicación de ciclos de carga y descarga a una razón de 3 ciclos/minuto.
- o Registro de presión de poros, deformación axial y carga vertical a razón de 30 lecturas por segundo mediante la utilización de sensores electrónicos, durante todo el ensaye.
- o Finalización del ensayo y desmontaje de la probeta.

Probetas Remoldeada:

- Preparación de probeta remoldeada mediante amasado, montada a humedad y densidad natural.
- Saturación de la probeta por un periodo de al menos 45 min.
- Revisión del grado de saturación con $B \geq 0.95$
- Consolidación isotrópica de la probeta a la presión de confinamiento de ensaye, registrando la variación volumétrica.
- Aplicación de ciclos de carga y descarga a una razón de 3 ciclos/minuto.
- Registro de la presión de poros, deformación axial y carga vertical a razón de 30 lecturas por segundo mediante la utilización de sensores electrónicos, durante todo el ensaye.
- Finalización del ensayo, y desmontaje de la probeta.

En la tabla 18 se resume el listado de las muestras ensayadas, especificando: nombre, tipo, razón cíclica, contra presión, presión de confinamiento de ensaye, periodo de consolidación.

Tabla Nº 18: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales cíclicos

Nombre Muestra	Tipo	Razón Cíclica Rc	Contra Presión BP [kg/cm ²]	Presión de Confinamiento Efectiva de Ensaye σ_c' [kg/cm ²]	Periodo de Consolidación Isotrópica [hrs]
p11q2	Inalterada	0,94	1,0	0,5	10,3
p12q2	Inalterada	0,10	1,0	0,5	10,0
p13q2	Inalterada	1,05	1,0	0,5	10,4
p15q2	Inalterada	1,10	1,5	0,5	10,0
p1q1	Inalterada	0,61	2,0	1,0	15,0
p2q1	Inalterada	0,56	1,0	1,0	5,7
p3q1	Inalterada	0,50	3,0	1,0	14,8
p4q1	Inalterada	0,46	1,0	1,0	12,5
p5q1	Inalterada	0,50	1,0	1,0	12,0
p16q2	Inalterada	0,45	1,0	2,0	10,3
p24q3	Inalterada	0,38	3,0	2,0	13,3
p26q3	Inalterada	0,35	3,0	2,0	12,5
p18q2	Inalterada	0,40	4,0	2,0	9,7
p21q2	Inalterada	0,30	2,0	4,0	9,2
p23q3	Inalterada	0,32	3,0	4,0	12,8
p22q2	Inalterada	0,35	3,0	4,0	11,0
r4q3	Remoldeada	0,33	3,0	1,0	9,8
r5q3	Remoldeada	0,38	3,0	1,0	10,8
r16q3	Remoldeada	0,40	4,0	1,0	12,0
r13q2	Remoldeada	0,30	5,0	1,0	10,3
r2q3	Remoldeada	0,33	2,0	1,0	9,5
r8q3	Remoldeada	0,30	3,0	2,0	11,0
r9q3	Remoldeada	0,35	5,0	2,0	12,0
r15q3	Remoldeada	0,42	5,0	2,0	12,0
r14q	Remoldeada	0,25	4,0	3,0	10,0
r10q3	Remoldeada	0,30	4,0	3,0	11,0
r11q3	Remoldeada	0,35	4,0	3,0	11,5
r18q3	Remoldeada	0,50	6,0	0,5	10,0
r19q3	Remoldeada	0,45	5,0	0,5	9,8

- Ensayo Triaxial Cíclico No Drenado Pre-Consolidado Isotrópicamente: se realizaron triaxiales cíclicos pre-consolidados isotrópicamente, con razones de pre-consolidación (OCR) de 2 y de 4, en probetas inalteradas y remodeladas de dimensiones 5cm de diámetro y 10cm de altura. La metodología utilizada para la realización de estos ensayos es similar a la descrita en el punto anterior, salvo para la etapa consolidación la cual se describe a continuación.

Etapa de Consolidación (valido para probetas inalteradas y remodeladas):

- o Consolidación isotrópica a la presión de pre-consolidación por un periodo de al menos 12hrs.
- o Descarga isotrópica de la probeta hasta la presión de confinamiento de ensaye.
- o Consolidación isotrópica a la presión de ensaye por un periodo variable de 8hrs a 10hrs.

En la tabla 19 se resume el listado de las muestras ensayadas, especificando: nombre, tipo, razón cíclica, contra presión, presión de confinamiento de ensaye, periodo de consolidación a presión de confinamiento ensaye, presión de pre-consolidación y periodo de pre-consolidación.

Tabla Nº 19: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales cíclicos preconsolidados isotrópicamente

Nombre Muestra	Tipo	Razón Cíclica Rc	Contra Presión BP [kg/cm ²]	Presión de Confinamiento Efectiva de Ensaye σ' [kg/cm ²]	Periodo de Consolidación a Confinamiento Ensaye [hrs]	Presión de Pre-consolidación Efectiva σ_{pc}' [kg/cm ²]	Periodo de Pre-consolidación Isotrópica [hrs]
oc2q3	Inalterada	0,70	3,0	1,0	12,5	2,0	3,8
oc4q3	Inalterada	0,77	3,0	1,0	10,5	2,0	5,7
oc11q3	Inalterada	0,66	3,0	1,0	13,3	2,0	9,0
oc8q3	Inalterada	1,00	3,0	1,0	11,8	4,0	7,0
oc9q3	Inalterada	1,11	3,0	1,0	12,0	4,0	7,4
oc10q3	Inalterada	1,16	3,0	1,0	13,0	4,0	7,0
roc1q3	Remoldeada	0,60	4,0	1,0	12,5	2,0	8,0
roc3q3	Remoldeada	0,65	5,0	1,0	13,0	2,0	7,0
roc4q3	Remoldeada	0,50	5,0	1,0	12,5	2,0	8,0

3.3.3. Serie de Ensayos 3: Pómez Plinianas

Sobre las muestras extraídas de los pozos de exploración antes mencionados se realizaron ensayos de clasificación y caracterización en laboratorio a solicitud de Ingendesa S.A. Los ensayos fueron ejecutados en el Laboratorio IDIEM, perteneciente a la Universidad de Chile, mientras que los ensayos químicos y de microscopía se realizaron en las Universidades de La Frontera y Concepción respectivamente.

A continuación se presentan el listado de ensayos realizados y procedimientos utilizados.

- Ensayos de Clasificación (Análisis Granulométrico, Humedad, Límites de Atterberg, Clasificación USCS, Peso Específico).
 - o Análisis granulométrico: Realizado de acuerdo al procedimiento de IDIEM SLG-PP-05 basado en 8.102.1 Suelos: Método para determinar la granulometría (LNV 105), utilizando material húmedo o seco al aire.

- Límites de Atterberg: Límite líquido, límite plástico e Índice de Plasticidad según SLG-PP-08 basado en ASTM D4318-05. Utilizando material seco al aire.
 - Clasificación USCS: De acuerdo a SLG-PP-13 basado en ASTM D2487-06
 - Determinación de humedad: se determinó la humedad natural o de terreno, de las muestras mediante secado al horno a 60°C, según SLG-PP-07 basado en ASTM D2216-05.
 - Peso Específico: se determinó la gravedad específica de los sólidos, utilizando una muestra remoldeada a húmeda natural compuesta por material de partículas de tamaño inferior al tamiz ASTM #4. Determinado según SLG-PP-09, basado en ASTM D854.
- Ensayo de Densidad In-Situ: se llevaron a cabo tomas de densidad in-situ mediante método de sonda de agua.
 - Ensayo Triaxial CIU: se ejecutaron ensayos triaxiales consolidados no drenados a deformación controlada, en probetas de suelo inalteradas talladas en terreno de 15cm de diámetro por 30cm de altura. Utilizando presiones de confinamiento entre 0.4kg/cm² y 3.0kg/cm². Realizado según ASTM D4767-04.

En la tabla 20 se resume el listado de las muestras ensayadas, especificando: nombre, tipo, presión de confinamiento de ensaye y contra presión.

Tabla N° 20: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CIU

Nombre Muestra	Tipo	Presión de Confinamiento Efectiva σ' [kg/cm ²]	Contra Presión BP [kg/cm ²]
CPM-1 (2.80-3.10)	Inalterada	0,4	3,0
CPM-1 (2.80-3.10)	Inalterada	1,5	3,0
CPM-1 (2.80-3.10)	Inalterada	3,0	2,0
CPM-3 (3.20-3.50)	Inalterada	0,4	3,0
CPM-3 (3.20-3.50)	Inalterada	1,5	3,0
CPM-3 (3.20-3.50)	Inalterada	3,0	3,0
CMLR-3B (3.35-3.65)	Inalterada	1,5	3,0
CMLR-3B (3.35-3.65)	Inalterada	3,0	3,0

- Ensayo Triaxial CID: se ejecutaron ensayos triaxiales consolidados drenados a deformación controlada, en probetas de suelo inalteradas talladas en terreno de 15cm de diámetro por 30cm de altura. Utilizando presiones de confinamiento entre 0.5kg/cm² y 3.0kg/cm². Las probetas se ensayaron a humedad natural (parcialmente saturadas) y drenadas al aire.

En la tabla 21 se resume el listado de las muestras ensayadas, especificando: nombre, tipo y presión de confinamiento de ensaye.

Tabla N° 21: Listado de muestras ensayadas mediante triaxiales CID

Nombre Muestra	Tipo	Presión de Confinamiento Efectiva σ'_c [kg/cm ²]
CPM-1 (4.20-4.50)	Inalterada	0,5
CPM-1 (4.20-4.50)	Inalterada	1,5
CPM-1 (4.20-4.50)	Inalterada	3,0
CPM-3 (4.00-4.30)	Inalterada	0,5
CPM-3 (4.00-4.30)	Inalterada	1,5
CPM-3 (4.00-4.30)	Inalterada	3,0
CMLR-3B (4.50-4.80)	Inalterada	0,5
CMLR-3B (4.50-4.80)	Inalterada	1,5
CMLR-3B (4.50-4.80)	Inalterada	3,0

- Ensayo de Consolidación Odométrica: se ejecutaron ensayos de consolidación odométrica, en probetas de suelo inalteradas talladas en terreno de dimensiones aproximadas 19cm de diámetro y 12cm de alto. El procedimiento para preparación de la muestra y ejecución del ensayo se realiza de acuerdo a las recomendaciones de ASTM D2435-03.

A continuación se señala la muestra ensayada indicando la presión vertical máxima de ensaye.

Tabla N° 22: Listado de muestras ensayadas consolidación odométrica

Nombre Muestra	Tipo	Presión vertical máx. ensaye σ_v [kg/cm ²]
CPM-1 Consolidación (2.80-2.95)	Inalterada	7.0

- Ensayo de Permeabilidad Carga Constante: se realizaron ensayos de permeabilidad a carga constante en pared flexible (celda triaxial) en probetas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, a presión de confinamiento efectiva entre 0,25 kg/cm² y 1,00 kg/cm². El detalle de las muestras ensayadas, se señala en la tabla 23.

Tabla Nº 23: Listado de muestras ensayadas para determinación de permeabilidad

Nombre Muestra	Tipo	Presión de Confinamiento σ' [kg/cm ²]	Contra Presión BP [kg/cm ²]
CPM-1 (2.80-3.10)	Inalterada	0,25	3,0
CPM-1 (2.80-3.10)	Inalterada	0,50	3,0
CPM-1 (2.80-3.10)	Inalterada	1,00	3,0
CPM-3 (3.20-3.50)	Inalterada	0,25	3,0
CPM-3 (3.20-3.50)	Inalterada	0,50	3,0
CPM-3 (3.20-3.50)	Inalterada	1,00	3,0
CMLR-3B (3.35-3.65)	Inalterada	0,25	3,0
CMLR-3B (3.35-3.65)	Inalterada	0,50	3,0
CMLR-3B (3.35-3.65)	Inalterada	1,00	3,0

- Ensayo de Disolución Selectiva: se realizó un análisis químico de suelos en dos muestras de pómez plinianas, utilizando los siguientes métodos:
 - o Método de Sadzawka (1990), para determinación de: Aluminio Oxalato, Silicio Oxalato y Aluminio Pirofosfato.
 - o Método de Parfitt and Wilson (1985), para la determinación del contenido de Alofán.

En la preparación de las muestras, se utilizaron dos procesos de secado: secado al aire, y en horno a 105°C. A continuación se detallan las muestras de pómez analizadas, indicando el proceso de secado utilizado en su preparación:

Tabla N° 24: Listado de Muestras Ensayadas para Análisis Químico

Nombre Muestra	Tipo de Secado
CPM-3 (4.00-4.30)	Al aire
CPM-3 (4.00-4.30)	Horno 105°C
CMLR-3B (4.50-4.80)	Al aire
CMLR-3B (4.50-480)	Horno 105°C

- Fotografía Microscopio de Barrido de Electrones (SEM): Se obtuvieron fotografías de una muestra de pómez pliniana a aumentos entre 1 mm y 10 μm , mediante la utilización de una sonda de barrido de electrones (SEM).

4. RESULTADOS SERIE DE ENSAYOS 1: TRUMAO DE CHILLÁN

4.1. Gravedad Específica de los Sólidos G_s

A continuación se entrega el resultado del ensayo de gravedad específica de los sólidos, obtenido para una muestra de trumao preparada a humedad natural sin ser sometida a secamiento previo.

Tabla Nº 25: Gravedad específica de los sólidos G_s.

Tipo de Ensayo	Gravedad Especifica de los Sólidos G _s []
Humedad Natural	2.71

El resultado anterior se encuentra dentro del rango estudiado para este tipo de suelos (ver acápite 2.6.3). Ahora bien, es importante mencionar que los valores más representativos para la determinación de la gravedad específica de los sólidos, se obtienen a través del ensayo de muestras a humedad natural, debido a la influencia que posee el proceso de secado en las propiedades del suelo (Paredes 2005).

4.2. Ensayos de Consolidación Odométrica

Como fue mencionado en el capítulo 3.3.1, se realizaron ensayos de consolidación odométrica en probetas de trumao inalteradas y remoldeadas de 7 cm de diámetro, utilizando muestras extraídas el año 2007. Los ensayos se llevaron a cabo esperando la estabilización de las deformaciones en cada incremento de carga.

4.2.1. Probeta Inalterada

Se realizó un ensayo utilizando una probeta inalterada con incrementos de carga hasta una tensión máxima vertical de 32 kg/cm². Adicionalmente, se aplicó un ciclo de descarga-carga a los 16 kg/cm², tal como lo señala la figura 27.

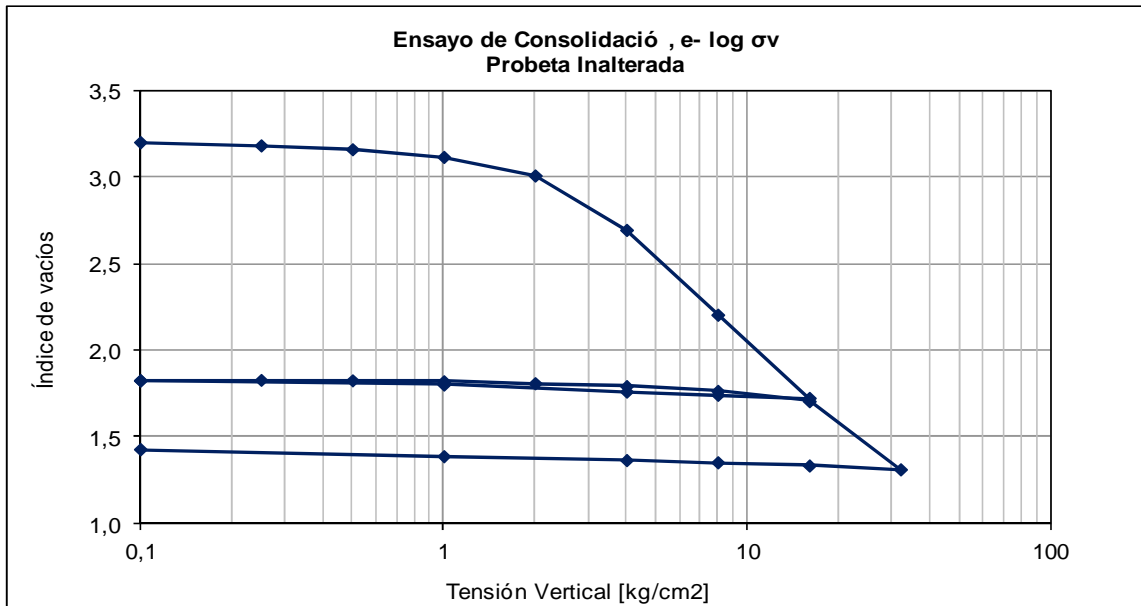


Figura Nº 27: Ensaye de consolidación muestra de trumao inalterada, diagrama e-log σ_v .

Adicionalmente, se presenta la variación del índice de huecos “e” en función de la tensión vertical “ σ_v ” en escala logarítmica para los primeros incrementos de carga, indicando la presión de preconsolidación resultante

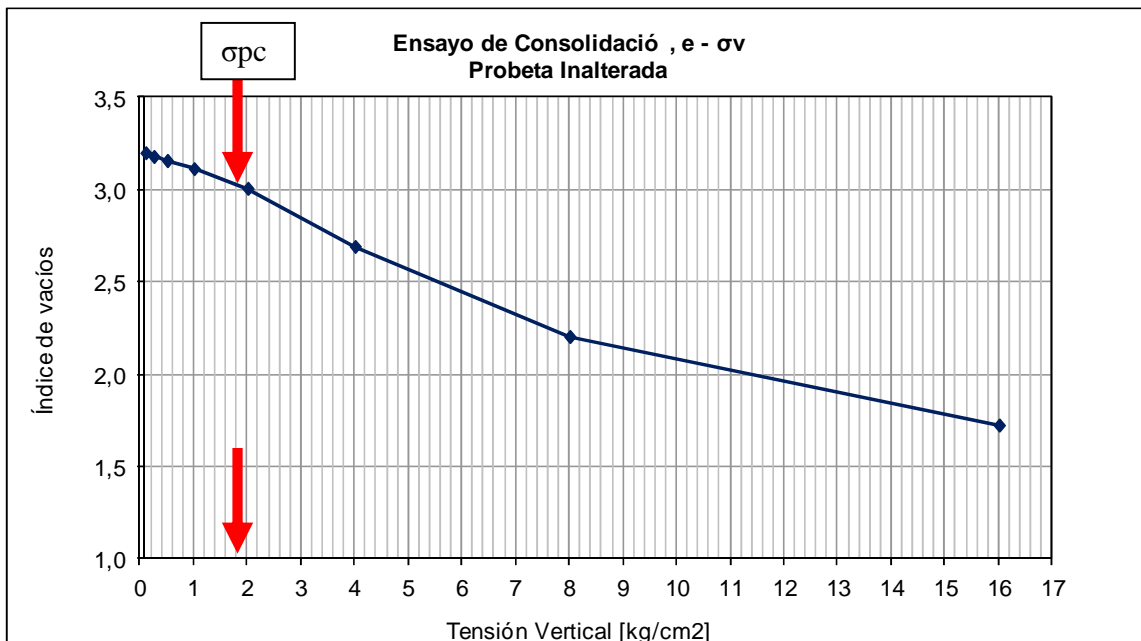


Figura Nº 28: Ensaye de consolidación muestra de trumao inalterada, diagrama e- σ_v , primeras cargas.

De los resultados en las figuras 27 y 28, se desprenden los siguientes parámetros de consolidación para el suelo en estudio:

$\sigma_{pc}' = 1,8 \text{ kg/cm}^2$ Presión de Preconsolidación

$C_c = 1,55$ Índice de Compresibilidad en Carga Virgen

$C_r = 0,08$ Índice de Compresibilidad en Recarga

Es importante mencionar que la carga de preconsolidación obtenida en estos ensayos se aproxima a la descrita en estudios anteriores para el mismo tipo de suelo, esto es $\sigma_{pc}'=2.0 \text{ kg/cm}^2$. Cabe destacar que la preconsolidación de estos suelos no se debe a una precarga geológica, sino más bien a un fenómeno físico-químico ocurrido en las partículas que conforman la microestructura del suelo (ver 2.6.3).

4.2.2. Probeta Remoldeada

El ensayo de consolidación utilizando una probeta de trumao remoldeada se llevó a cabo aplicando incrementos de carga hasta una tensión vertical máxima de 32 kg/cm^2 , esperando la estabilización de deformaciones en cada incremento. En las figuras 29 y 30 se presentan los diagramas “e-log σ_v ” y “e- σ_v ” resultantes del ensayo.

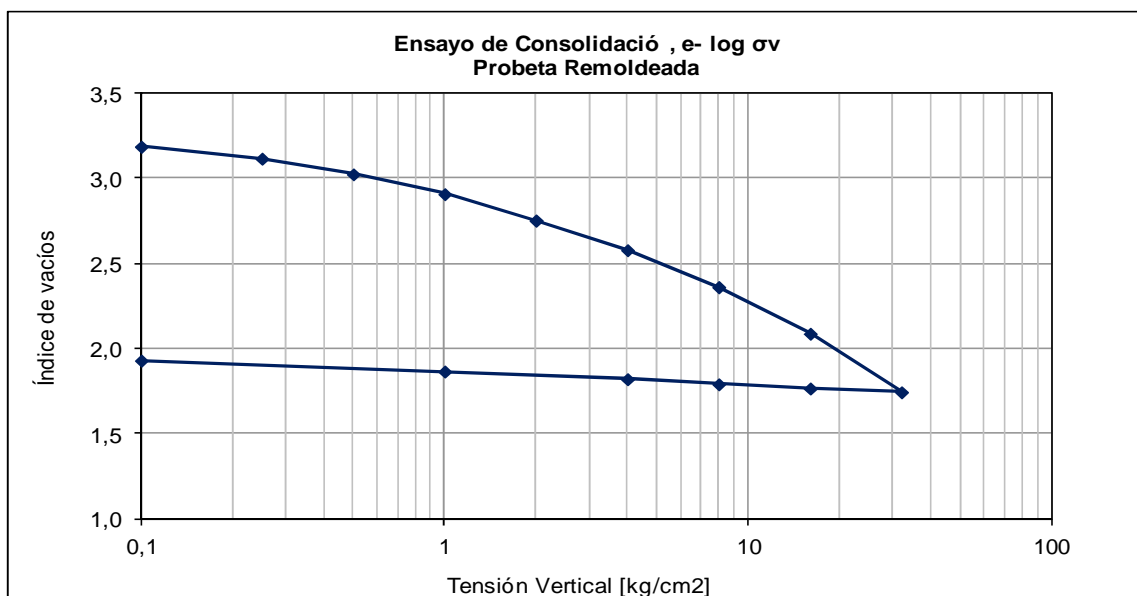


Figura Nº 29: Ensayo de consolidación muestra de trumao remoldeada, diagrama e-log σ_v .

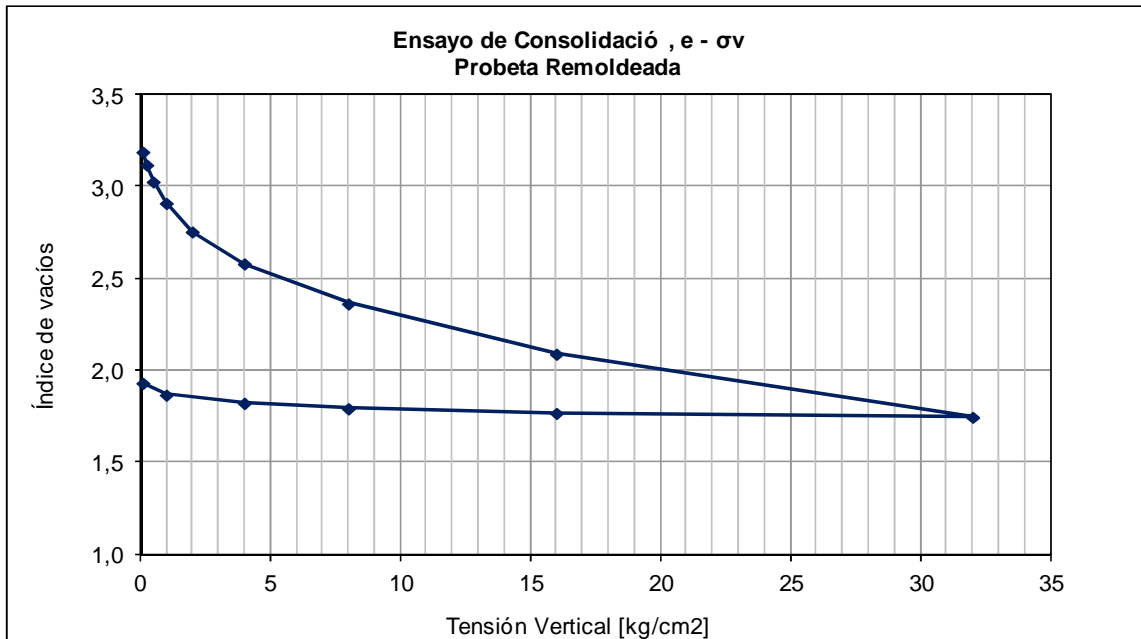


Figura Nº 30: Ensayo de consolidación muestra de trumao remoldeada, diagrama e-σv.

De las figuras 29 y 30 se desprende que para la condición remoldeada, la muestra de trumao solo exhibe un comportamiento normalmente consolidado, por ende no presenta presión de preconsolidación como la muestra inalterada, determinándose de esta manera, que la influencia de la estructura interna que posee el suelo en la consolidación es destruida por el remodelo.

De este ensayo se obtuvo un índice de compresibilidad en carga virgen de:

$$C_c = 0,70 \text{ Índice de Compresibilidad en Carga Virgen.}$$

Este valor es considerablemente menor que el obtenido en las probetas inalteradas.

4.2.3. Resumen Probetas Inalteradas y Remoldeadas

En la figura 31 se presenta un diagrama “e-logσv”, en el cual se muestran los resultados obtenidos para los dos tipos de probetas.

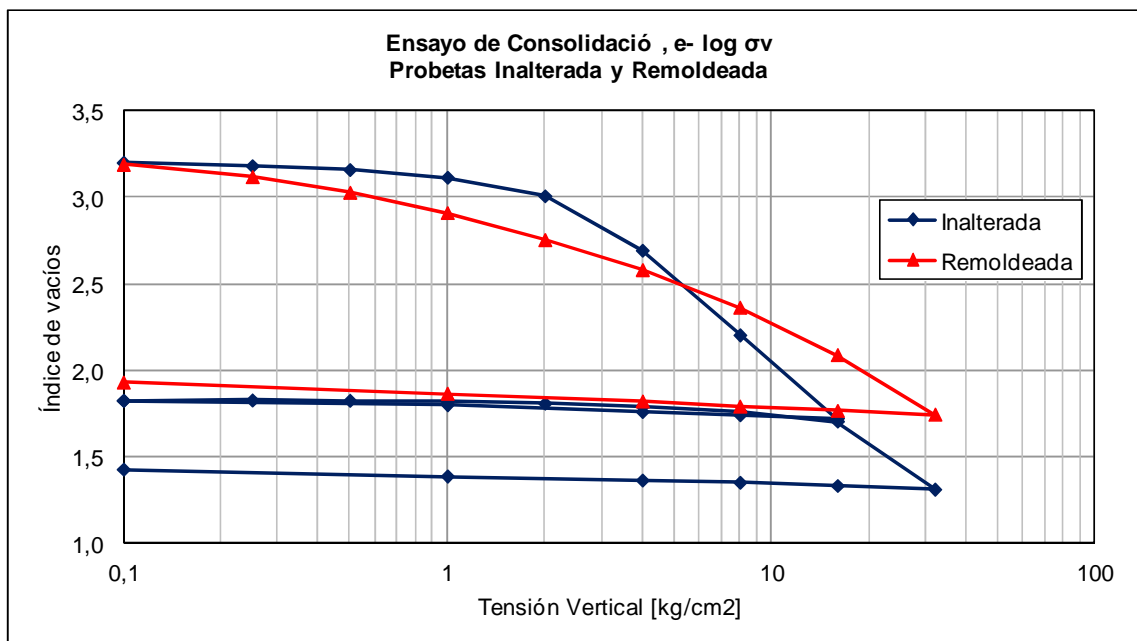


Figura Nº 31: Ensayes de consolidación muestras de trumao inalterada y remoldeada, diagrama e - log σ_v .

En la figura 31 se observa que la variación del índice de vacíos en probetas remoldeadas, no posee como frontera a la variación seguida en probetas inalteradas como es común en otros tipos de suelos, sino que existe un cruce entre ambas curvas entre 5 kg/cm² y 6 kg/cm² de tensión vertical.

Mayor detalle relacionado a las diferencias de compresibilidad entre ambos tipos de muestras, será tratado en el capítulo 5.2 de este estudio.

4.3. Triaxiales Consolidados No Drenados (CIU)

Como fue mencionado en el capítulo 3.3.1, las muestras de trumao obtenidas fueron sometidas a ensayos triaxiales convencionales, consolidados no drenados en probetas inalteradas y remoldeadas cilíndricas de 5x10cm, utilizando presiones de confinamientos de 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 5.0 y 6.0 kg/cm². La importancia del ensaye utilizando ambos tipos de probetas, radica en la necesidad de conocer el comportamiento desarrollado por estos suelos con su fábrica natural y los efectos que se producen si se destruye dicha fábrica.

4.3.1. Probetas Inalteradas

A continuación se presentan los diagramas: trayectoria de tensiones efectivas ($q-p'$), tensión vertical " $\Delta\sigma$ " versus deformación axial unitaria " ϵ ", variación de presión de poros " Δu " versus deformación axial unitaria " ϵ " y resistencia última no drenada " S_u " versus presión de confinamiento efectivo; obtenidos como resultados de los ensayos triaxiales CIU realizados en probetas de trumao inalteradas correspondientes al muestreo realizado en 2007.

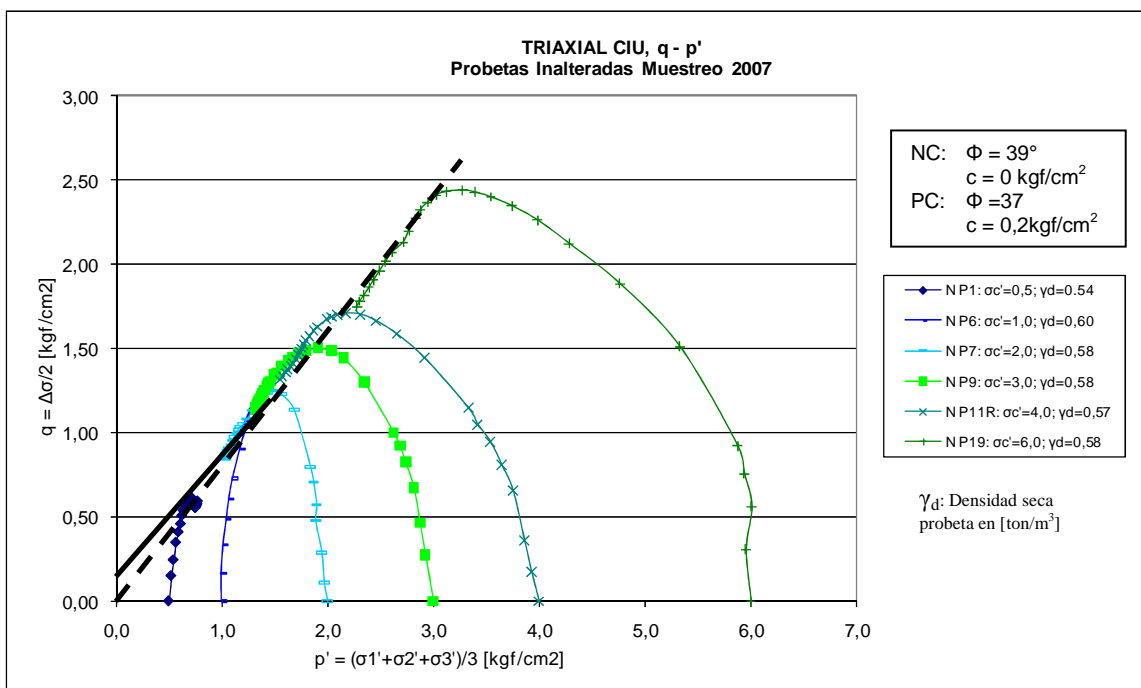


Figura Nº 32: Triaxial CIU esfuerzo desviador "q" versus presión media "p", muestreo 2007.

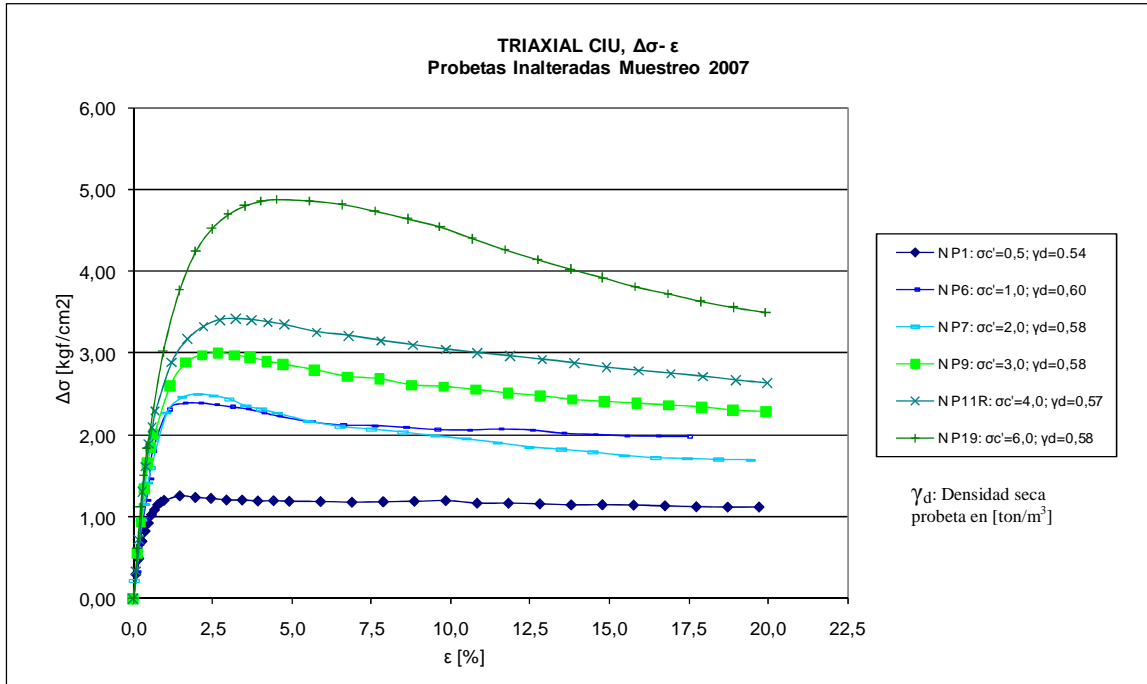


Figura N° 33: Triaxial CIU esfuerzo desviador " $\Delta\sigma$ " versus deformación unitaria " ϵ ", muestreo 2007.

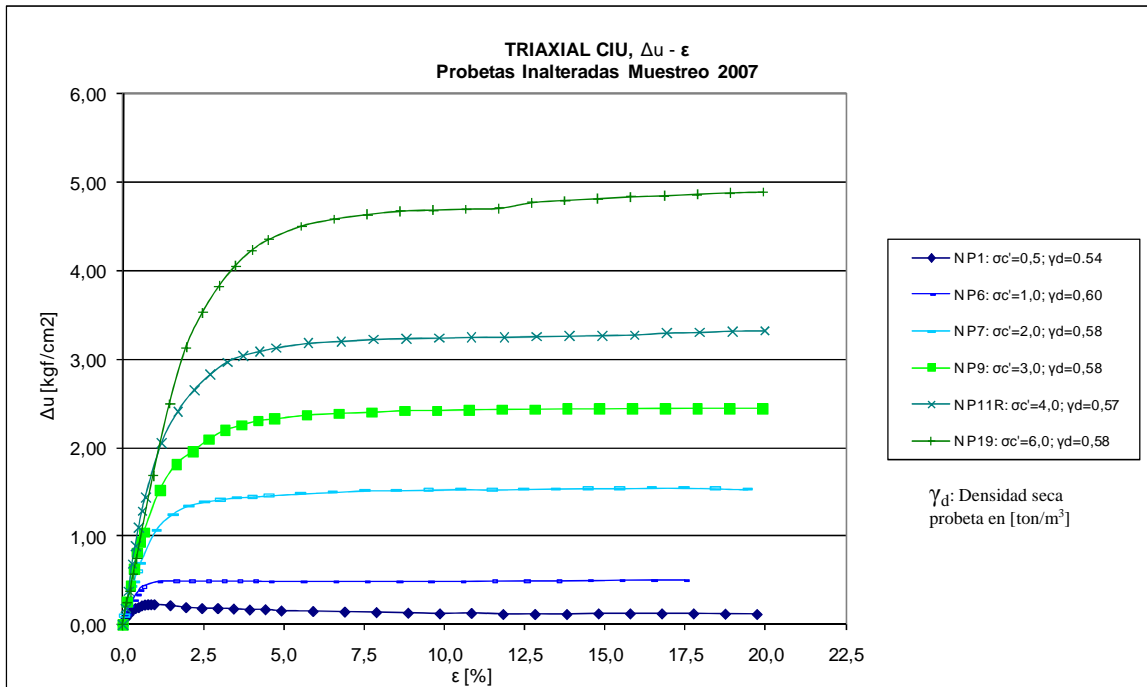


Figura N° 34: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria " ϵ ", muestreo 2007.

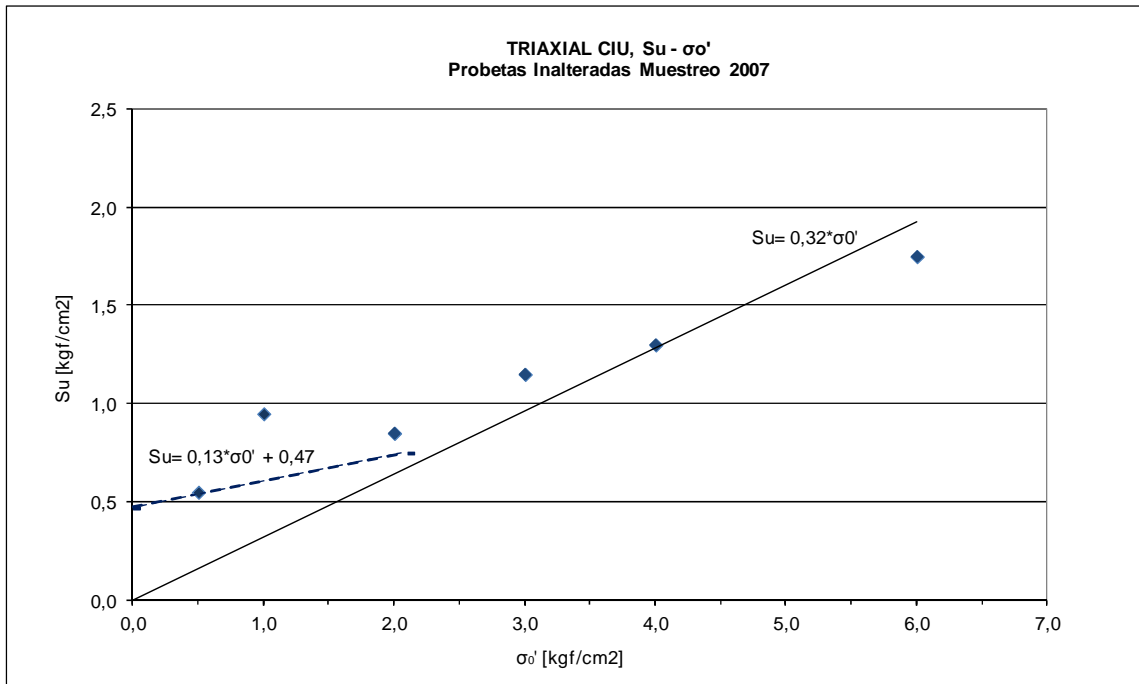


Figura Nº 35: Triaxial CIU resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ_0' , muestreo 2007.

Del diagrama de tensiones efectivas presentado en la figura 32, se desprende una diferenciación entre un comportamiento contractivo de uno dilatante entre las presiones de confinamiento de 1.0 kg/cm^2 y 2.0 kg/cm^2 , indicando que la presión de preconsolidación isotrópica de este suelo yace entre esas presiones. Ahora bien, la diferencia entre comportamientos, también es posible observarla en la variación de Su señalada en la figura 35, aunque en este caso la diferenciación se observa a una presión algo mayor a 2.0 kg/cm^2 .

En cuanto a los parámetros de resistencia al corte para el estado normalmente consolidado, se observa que el suelo desarrolla una cohesión nula, mientras que el ángulo de fricción interna “ Φ ” bordea los 39° . Por otra parte, de los ensayos realizados a presiones de confinamiento de 0.5 kg/cm^2 y 1.0 kg/cm^2 , es posible obtener como parámetros de resistencia al corte para el estado preconsolidado, una cohesión cercana a 0.2 kg/cm^2 y un ángulo de fricción interna de 37° .

Los resultados de los ensayos triaxiales CIU efectuados en probetas de trumao inalteradas correspondientes al muestreo realizado en 2008, se presentan las siguientes figuras.

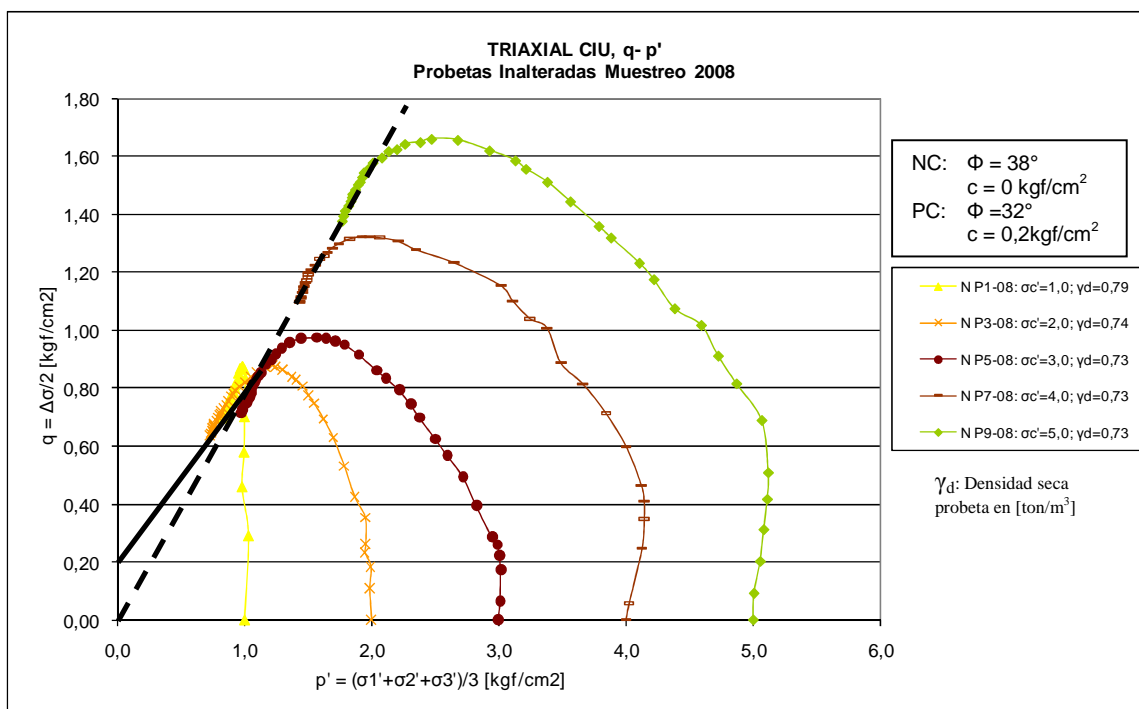


Figura Nº 36: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, muestreo 2008.

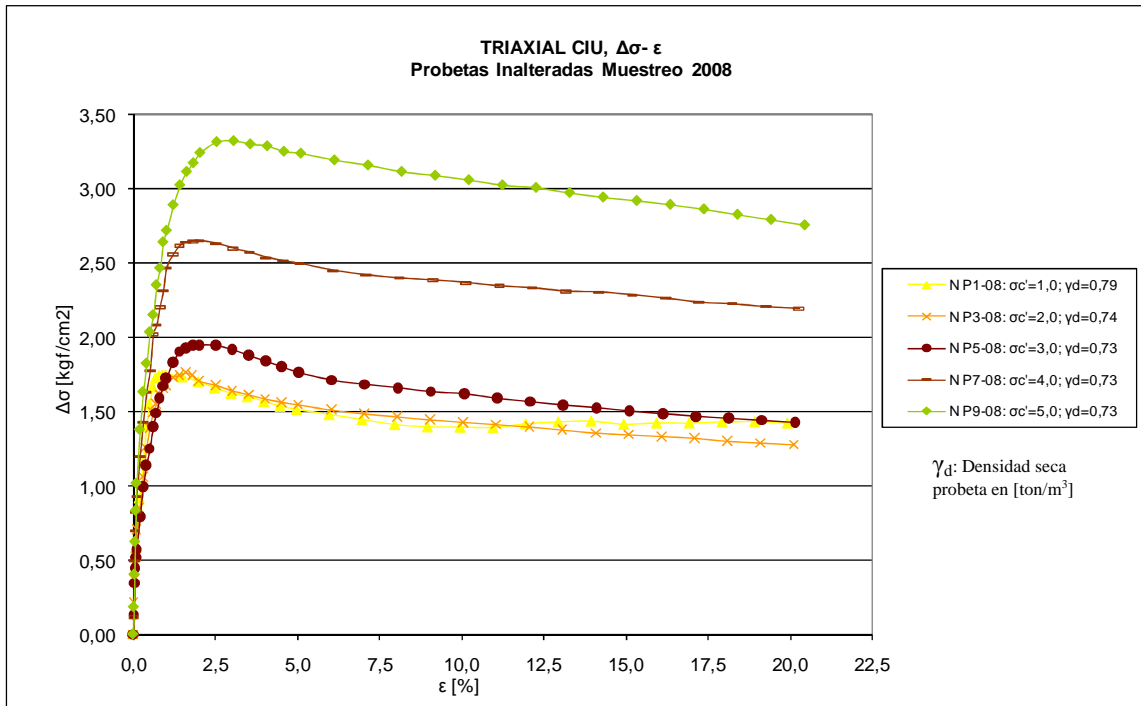


Figura Nº 37: Triaxial CIU esfuerzo desviador " $\Delta\sigma$ " versus deformación unitaria " ϵ ", muestreo 2008.

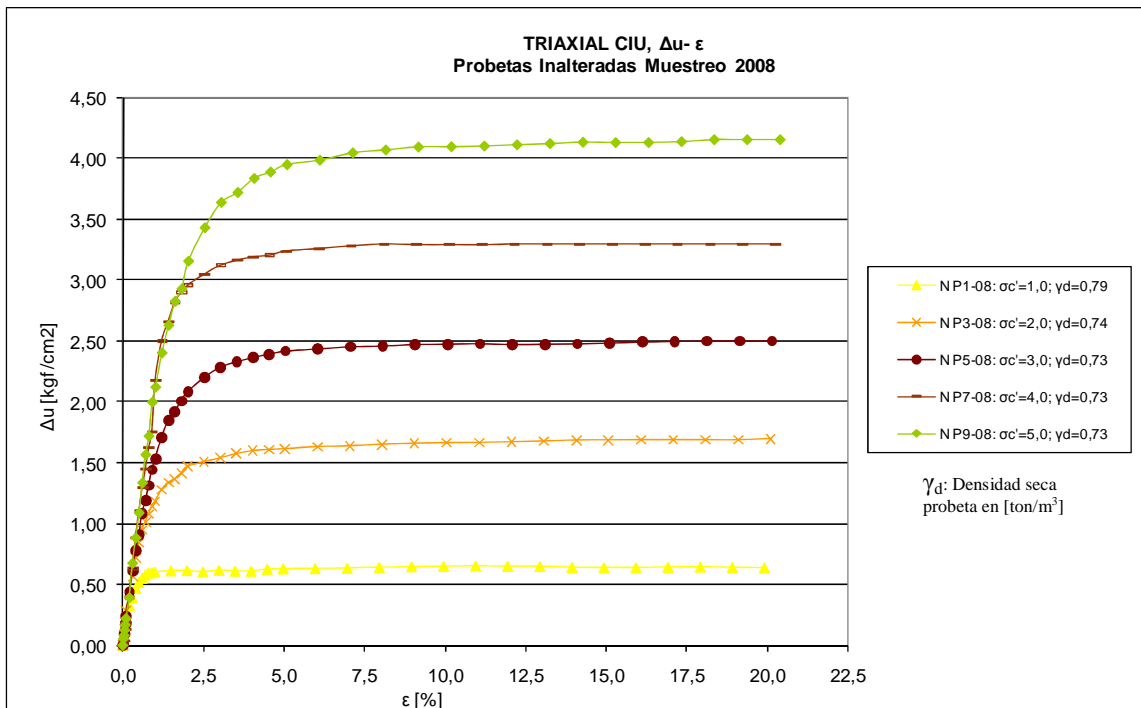


Figura Nº 38: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria " ϵ ", muestreo 2008.

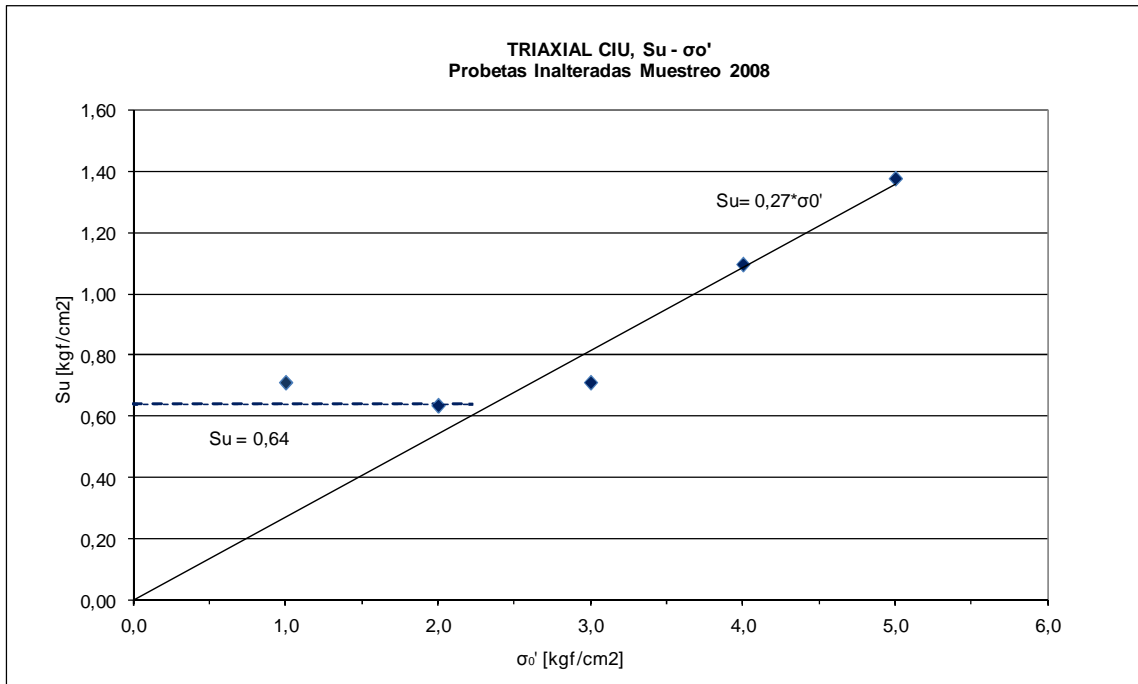


Figura N° 39: Triaxial CIU resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ'_0 , muestreo 2008.

En los resultados anteriores es posible observar una diferenciación entre comportamiento normalmente consolidado y pre-consolidado, pudiendo determinar que la presión de preconsolidación isotrópica se encontraría cercana a 2.0kg/cm².

Los parámetros de resistencia al corte obtenidos para el comportamiento normalmente consolidado son: fricción interna “ Φ ” de 38° y una cohesión nula. Mientras que para el caso preconsolidado, un ángulo de fricción interna de 32° y una cohesión cercana a 0,2 kg/cm².

Las principales diferencias observadas entre ambos muestreos están relacionadas a la densidad seca de las probetas, la presión de preconsolidación, los ángulos de fricción interna para la condición preconsolidada y las resistencias no drenadas desarrolladas en cada ensayo.

Los resultados de ambos muestreos, permitieron observar que prácticamente la línea de estado último es compartida por todas las muestras, con un ángulo de fricción interna aproximado de 38° y cohesión nula, tal como se puede observar en la figura 40.

Las figuras 40, 41, 42 y 43 presentan el resumen de los resultados obtenidos para ambos muestreos. En esta última figura, se trazan las envolventes de resistencia no drenada resultantes de todos los ensayos.

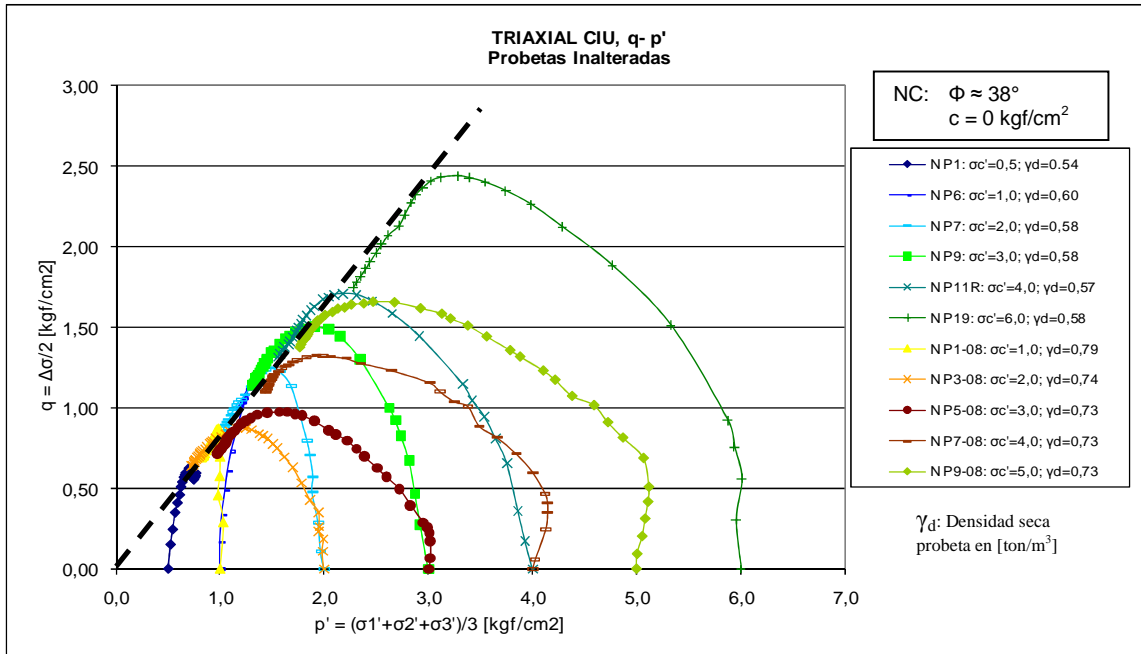


Figura Nº 40: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, resumen muestreos 2007 y 2008.

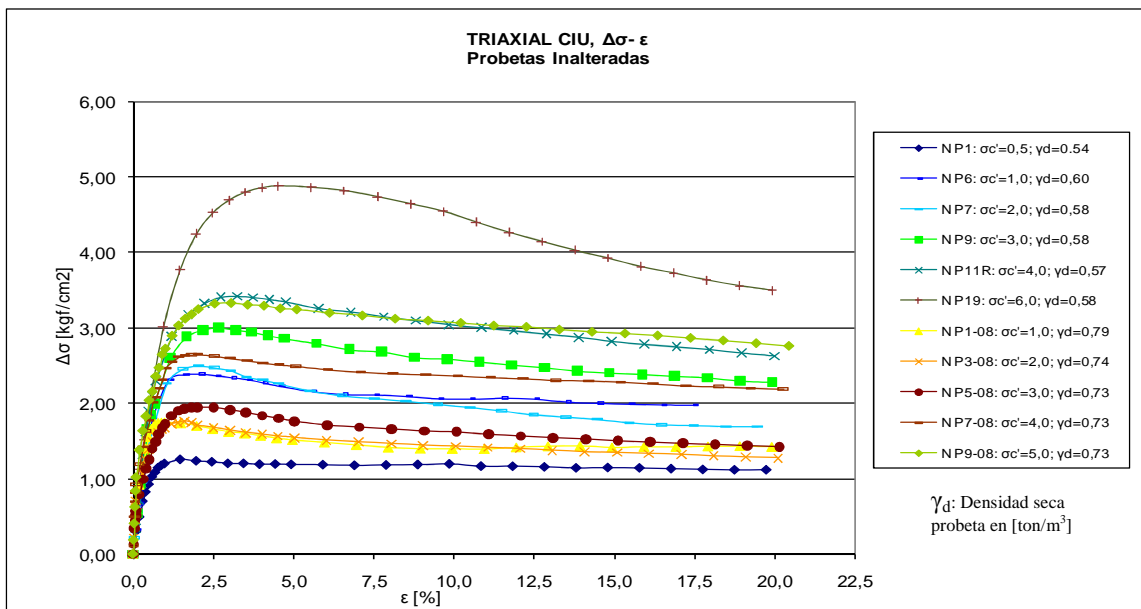


Figura Nº 41: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, resumen muestreos 2007 y 2008.

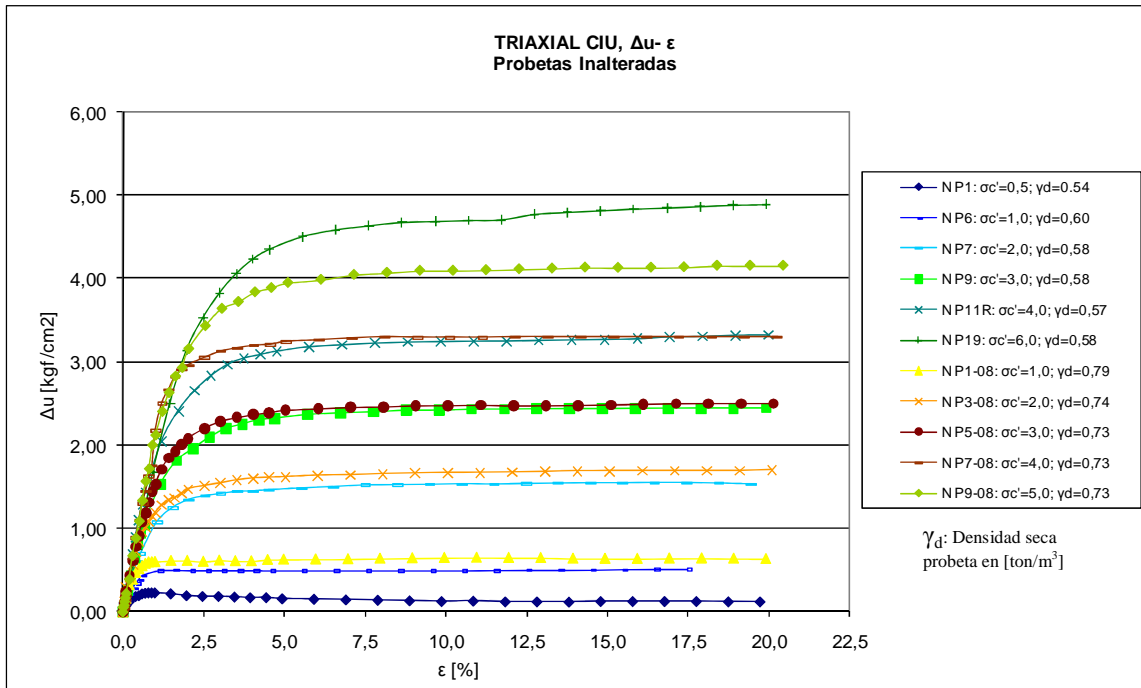


Figura Nº 42: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria “ ϵ ”, resumen muestreos 2007 y 2008.

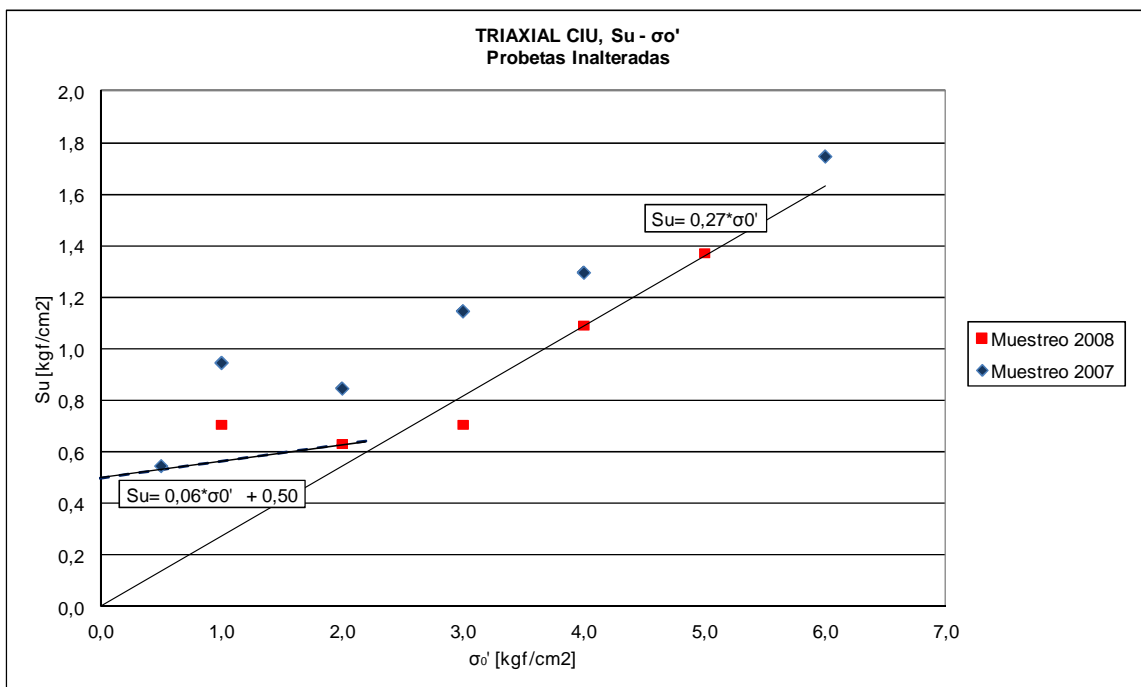


Figura Nº 43: Triaxial CIU resistencia última no drenada “ S_u ” versus presión de confinamiento efectiva σ'_0 , muestreos 2007 y 2008.

Ahora bien, a pesar que las muestras corresponden al mismo tipo de suelo, las diferencias observadas podrían relacionarse a la heterogeneidad existente entre las muestras inalteradas obtenidas, las cuales a pesar que fueron extraídas del mismo talud poseen densidades secas y humedades diferentes.

4.3.2. Probetas Remoldeadas

A continuación se presentan los diagramas: trayectoria de tensiones efectivas ($q-p'$), tensión vertical " $\Delta\sigma$ " versus deformación axial unitaria " ϵ ", variación de presión de poros " Δu " versus deformación axial unitaria " ϵ " y resistencia última no drenada " S_u " versus presión de confinamiento efectivo; obtenido como resultados de los ensayos triaxiales CIU realizados en probetas de trumao remoldeadas correspondientes a los muestreos realizados en 2007 y 2008.

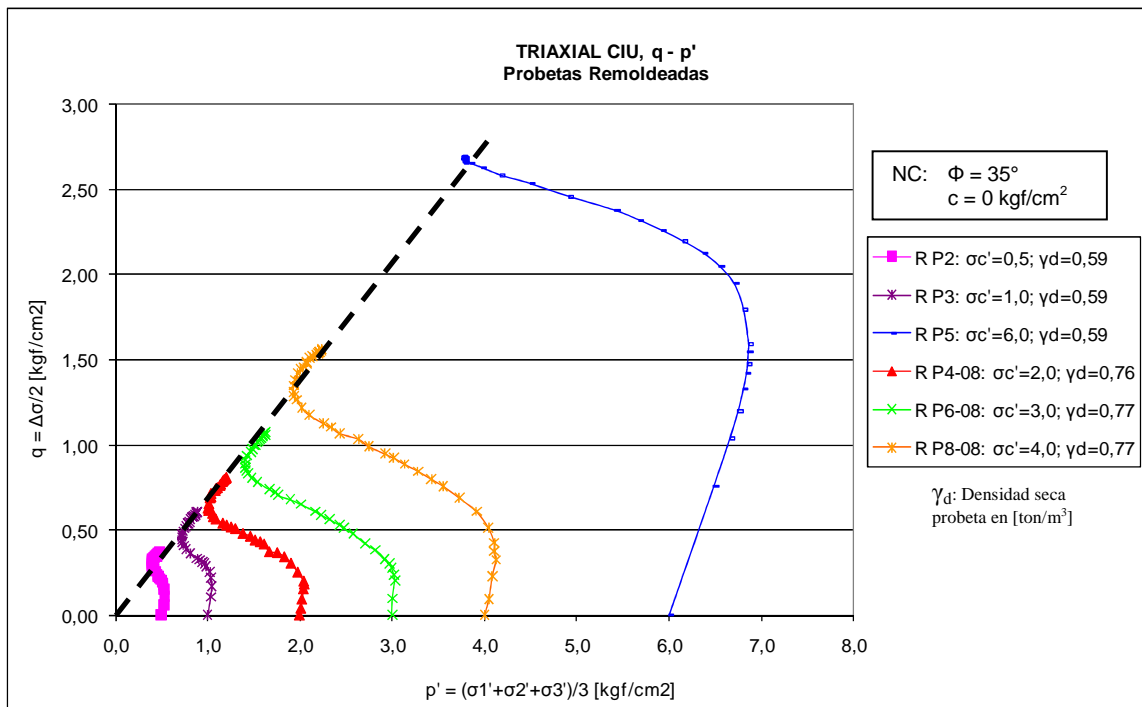


Figura N° 44: Triaxial CIU probetas remoldeadas esfuerzo desviador "q" versus presión media "p", muestreos 2007 y 2008.

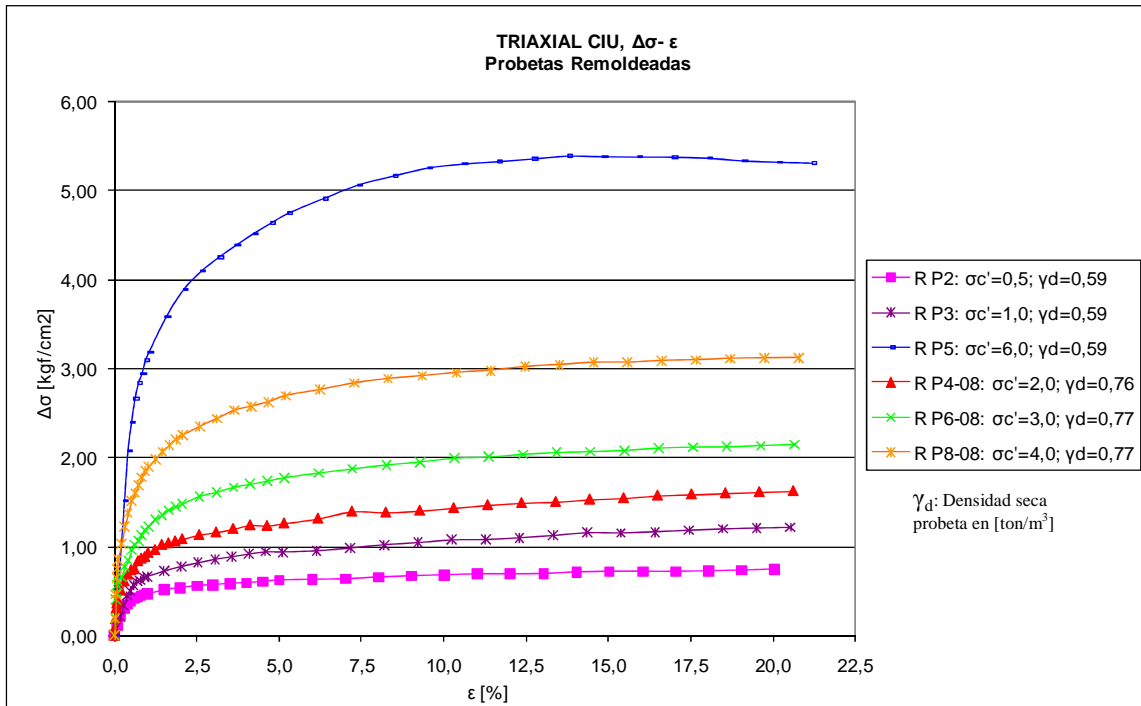


Figura N° 45: Triaxial CIU probetas remoldeadas esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestreos 2007 y 2008.

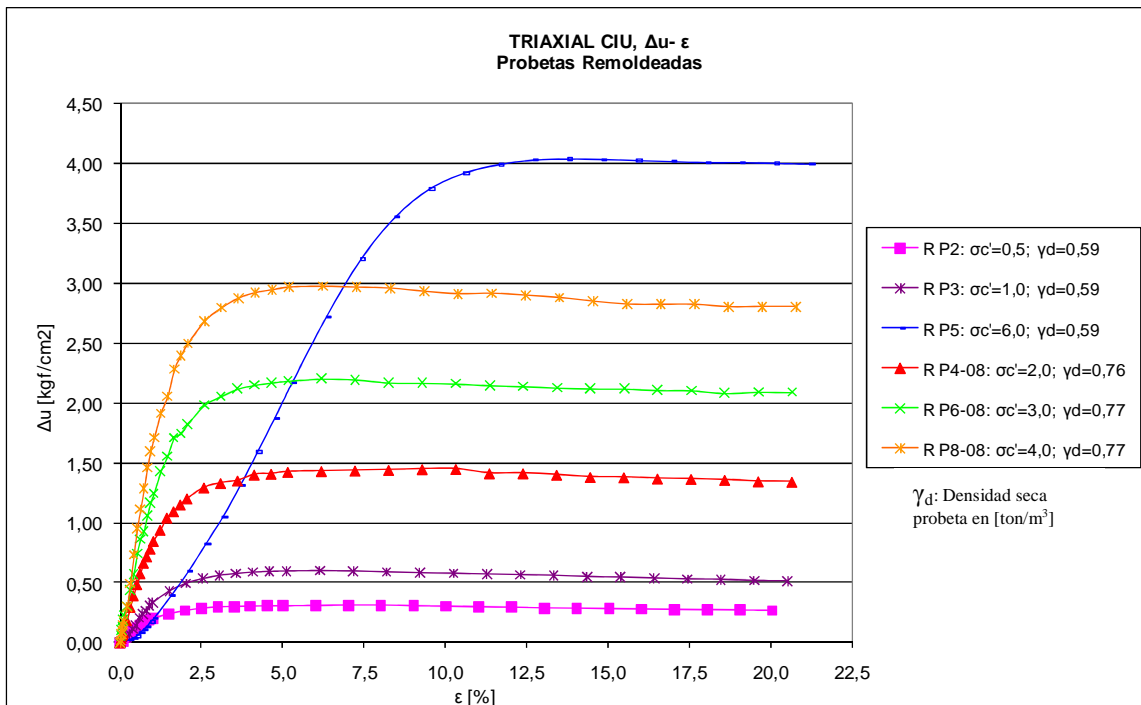


Figura N° 46: Triaxial CIU probetas remoldeadas variación presión de poros “ Δu ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestreos 2007 y 2008.

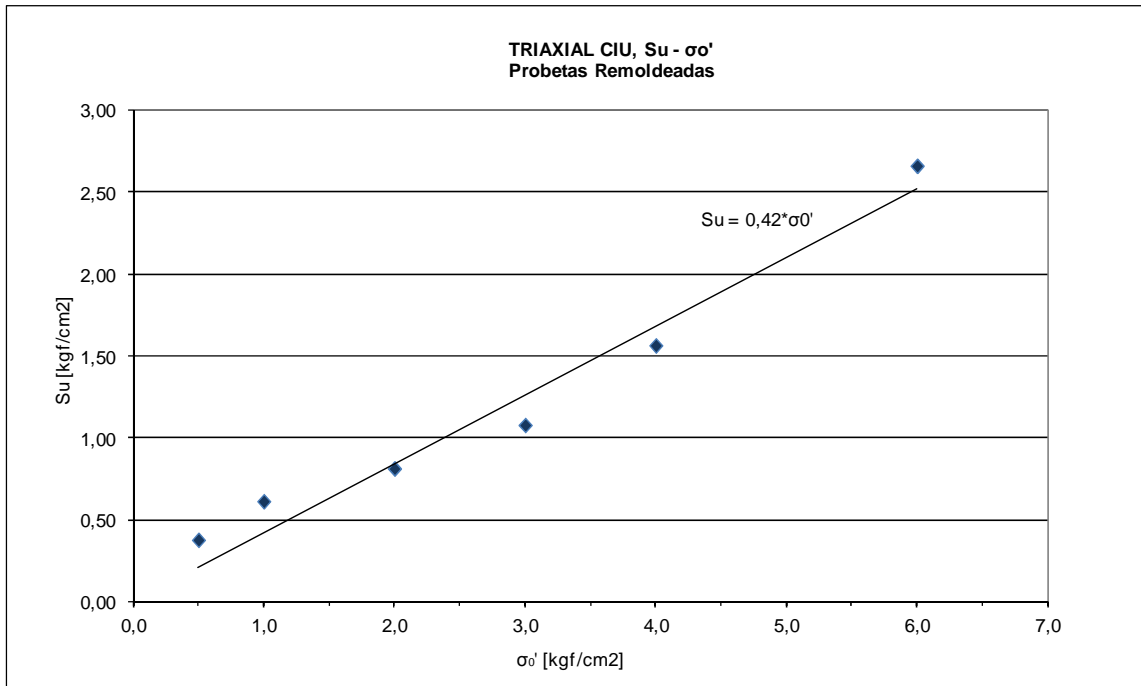


Figura Nº 47: Triaxial CIU probetas remoldeadas resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ_0' , muestreos 2007 y 2008.

Las trayectorias tensiones efectivas presentadas en la figura 44, exhiben un comportamiento contractivo acompañado de un comportamiento dilatante, el cual se desarrolla luego de un estado transiente de cambio de fase (Phase Transformation), este comportamiento particular es similar al observado y estudiado en arenas, Ishihara (1975).

Del diagrama “Su- σ_0' ”, se desprende una tendencia lineal de la resistencia no drenada para presiones mayores a 1.0 kg/cm². No obstante, no se observa con claridad una presión de preconsolidación en todos los resultados expuestos. Ahora bien, se tendería a pensar que dicha presión se encuentra cercana a los 0.5kg/cm² debido a la inclinación en la trayectoria de tensiones efectivas (ver figura 44) y en la existencia de un ángulo de fricción movilizado peak y residual, tal como lo indica la figura 48.

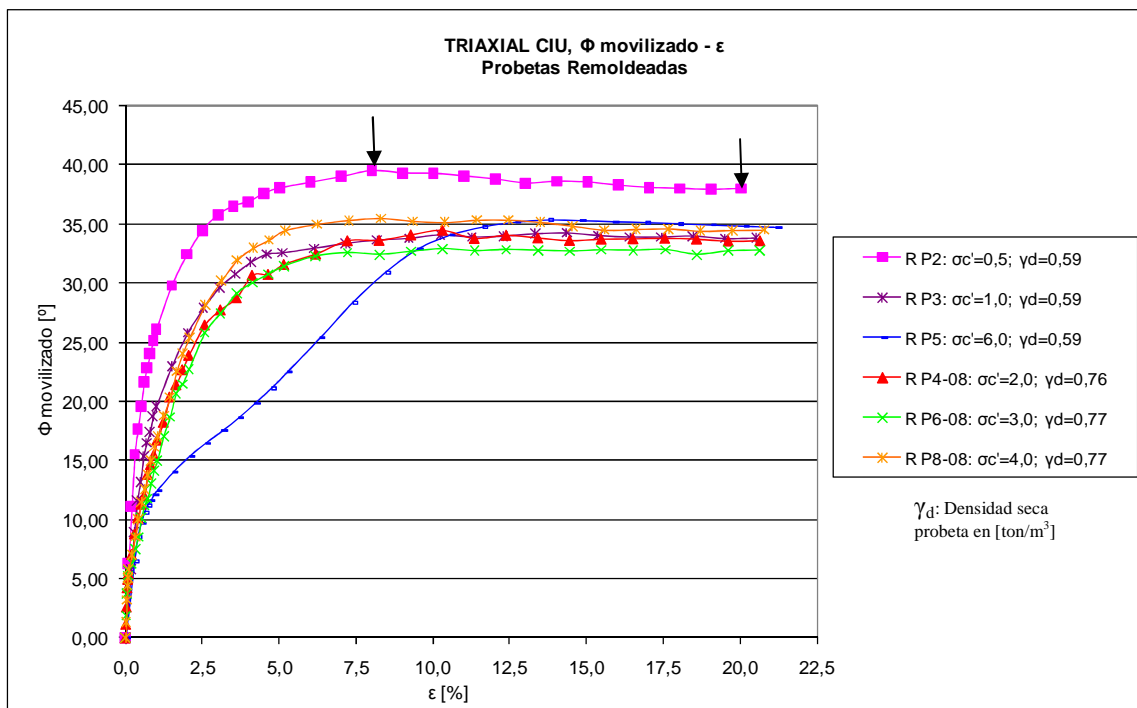


Figura Nº 48: Triaxial CIU ángulo de fricción movilizado “Φmovilizado” versus deformación unitaria “ε”, resumen muestreos 2007 y 2008.

En el gráfico anterior se observa que la probeta ensayada a 6.0kg/cm² se escapa de la tendencia seguida por las otras.

En cuanto a los parámetros de resistencia al corte obtenido para estas muestras, se observa que poseen una cohesión muy baja o nula y un ángulo de fricción interna de aproximadamente 35°.

Con los resultados anteriores, es posible mencionar que las muestras remoldeadas de trumao poseen un ángulo de fricción interna residual menor que las muestras inalteradas.

$$\Phi_{\text{inalteradas}} = 38^\circ > \Phi_{\text{remoldeada}} = 35^\circ$$

Dada la concordancia en el comportamiento de las probetas remoldeadas ensayadas a diferentes presiones de confinamiento, no es posible identificar diferencias entre muestras extraídas en 2007 y 2008, tal como se observó en probetas inalteradas. Este hecho es un

indicador de la importancia de la fábrica natural que posee el suelo y las consecuencias del remoldeo.

Además de la diferencia de comportamientos entre probetas inalteradas y remoldeadas, existe una variación de las resistencias últimas no drenadas para similares presiones de confinamiento, observándose que probetas inalteradas desarrollan mayor resistencia última que probetas remoldeadas bajo la presión de preconsolidación isotrópica de estas, la cual se encuentra entre 1.0 kg/cm² y 2.0 kg/cm². Luego de esta presión umbral se invierte la situación, desarrollando las probetas remoldeadas, mayor resistencia última que las inalteradas, tal como se aprecia en los diagramas $q'-\epsilon$ que se señalan en las figuras 49 y 50, generados para cada presión de confinamiento de ensaye utilizando los dos tipos de probetas.

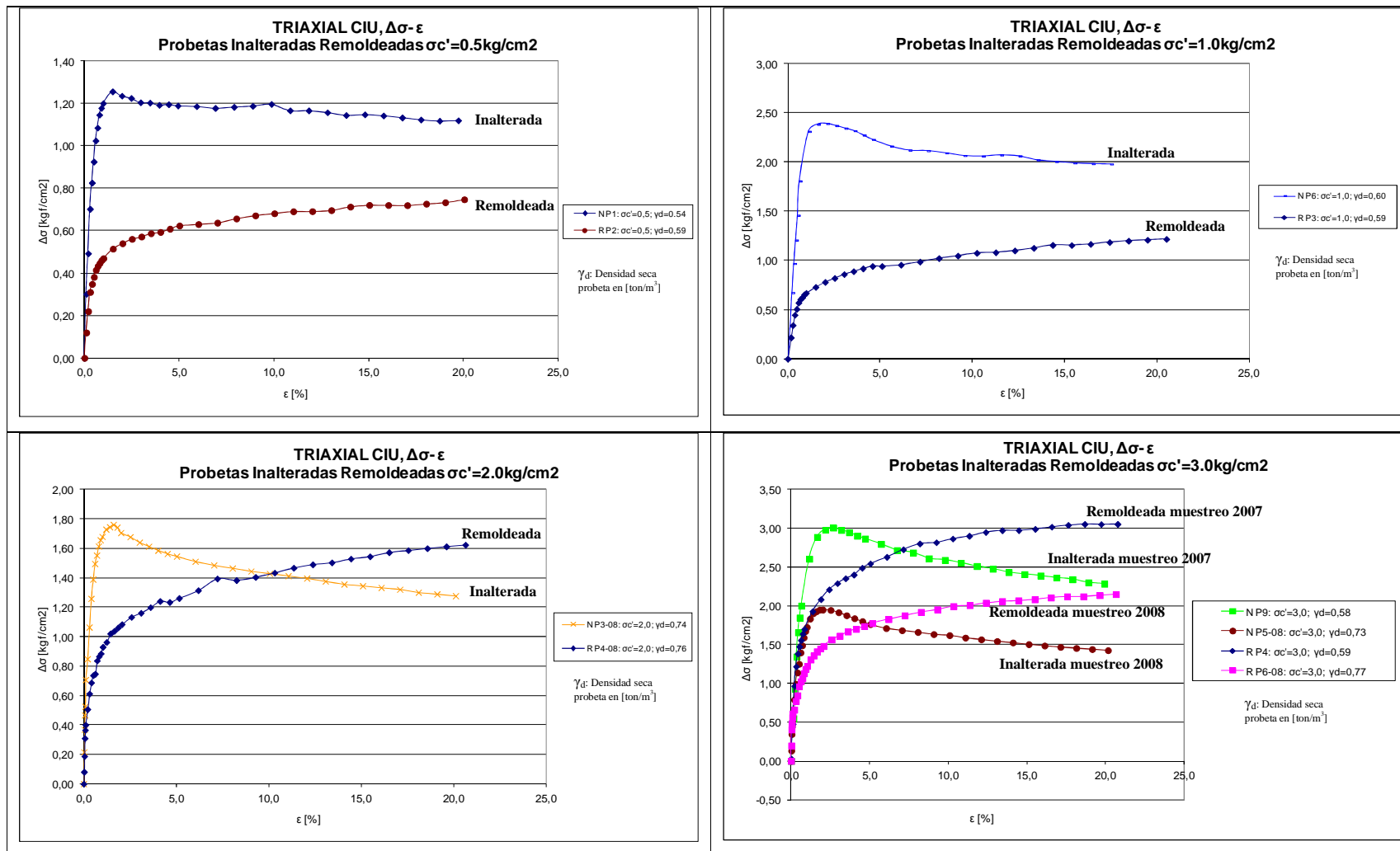


Figura N° 49: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestras remoldeadas e inalteradas para diferentes presiones de confinamiento.

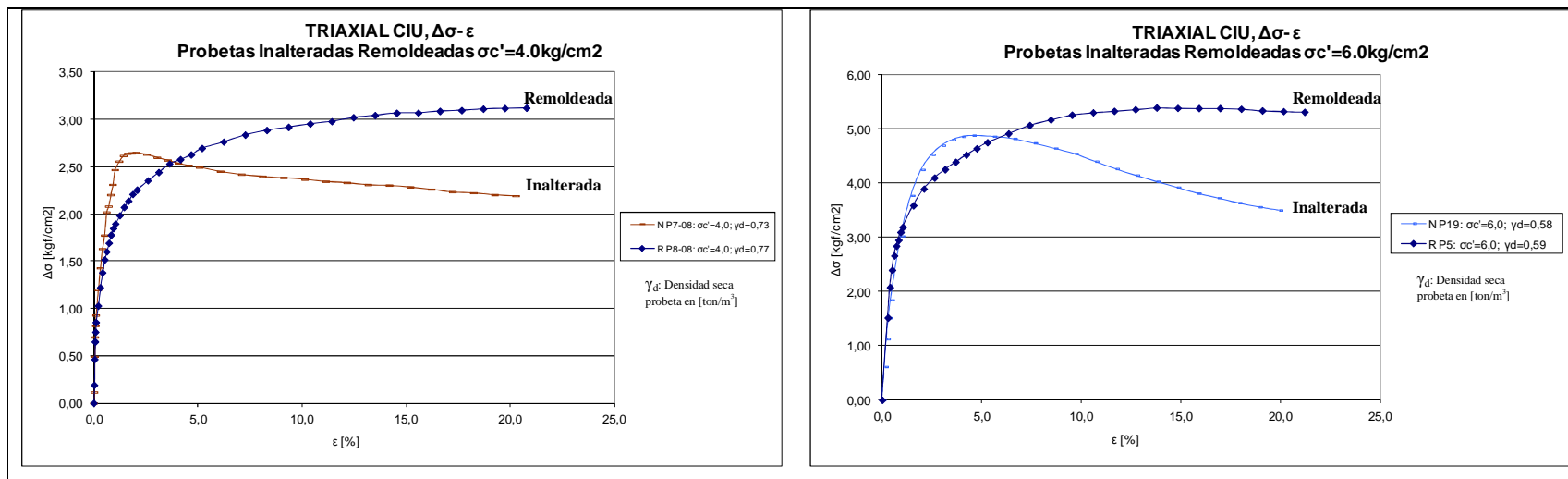


Figura N° 50: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”, muestras remoldeadas e inalteradas para diferentes presiones de confinamiento.

Esta relación entre resistencias no drenadas modificaría lo que se entendía hasta el momento en este tipo de suelo, ya que se demuestra que no necesariamente la resistencia no drenada de probetas remoldeadas es menor que las inalteradas, sino que esto depende de la presión de confinamiento y del estado de preconsolidación del suelo.

4.4. Triaxiales Consolidados No Drenados (CIU) con Probetas Preconsolidadas

En el capítulo anterior se estudió el comportamiento desarrollado por el trumao conservando su fábrica natural (probetas inalteradas) y rompiendo dicha fábrica (probetas remoldeadas). Ahora bien, interesa conocer el efecto generado bajo la aplicación de cargas isotrópicas y de corte previas al ensaye, en el comportamiento de estos suelos. Para ello que se desarrollaron ensayos triaxiales CIU en probetas inalteradas y remoldeadas preconsolidadas isotrópicamente de acuerdo al detalle presentado en el capítulo 3.3.1.

4.4.1. Probetas Inalteradas

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales CIU realizados en probetas de trumao inalteradas correspondientes al muestreo realizado en 2007, ensayadas a una presión de confinamiento de 0.5kg/cm^2 y sometidas a diferentes estados de preconsolidación. Es importante considerar que la presión de confinamiento señalada anteriormente, se encuentra bajo la presión de preconsolidación natural de las muestras de trumao en estudio (ver capítulo 4.2).

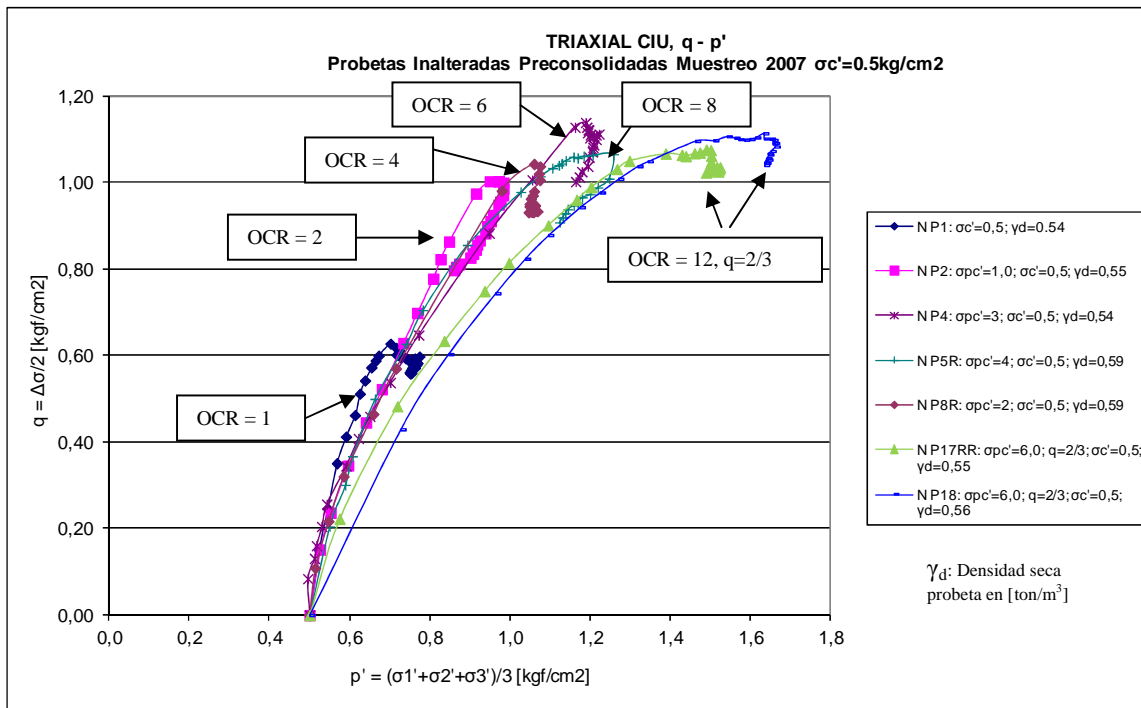


Figura N° 51: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”.

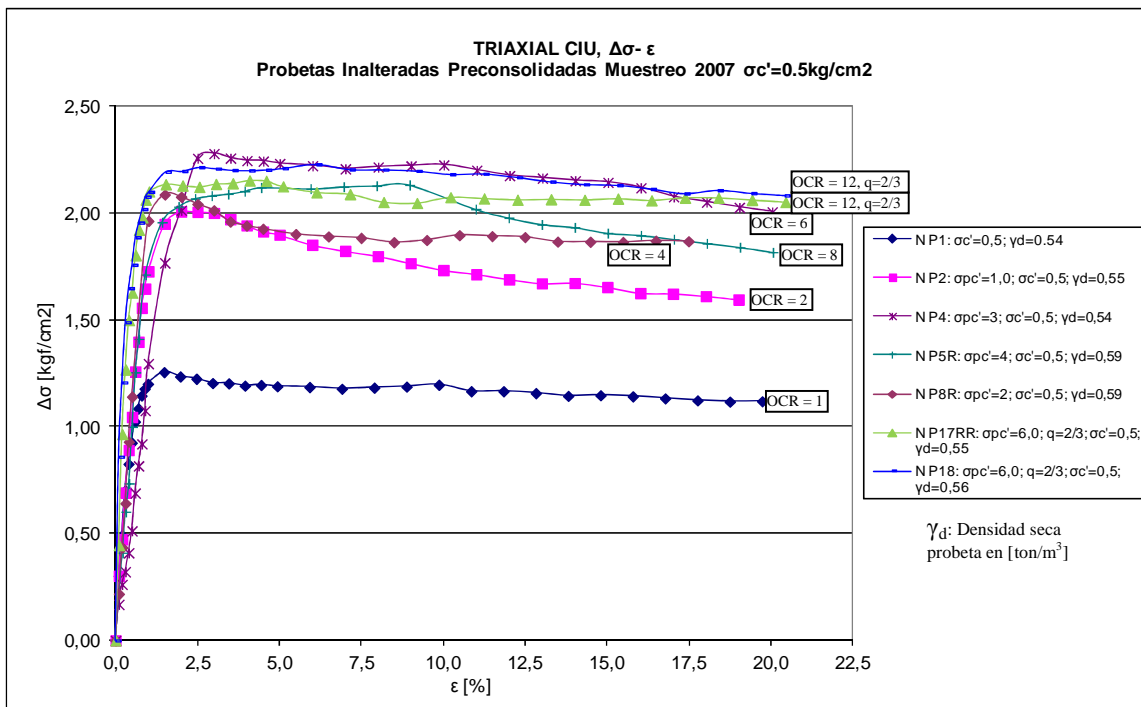


Figura N° 52: Triaxial CIU esfuerzo desviador “Δσ” versus deformación unitaria “ε”.

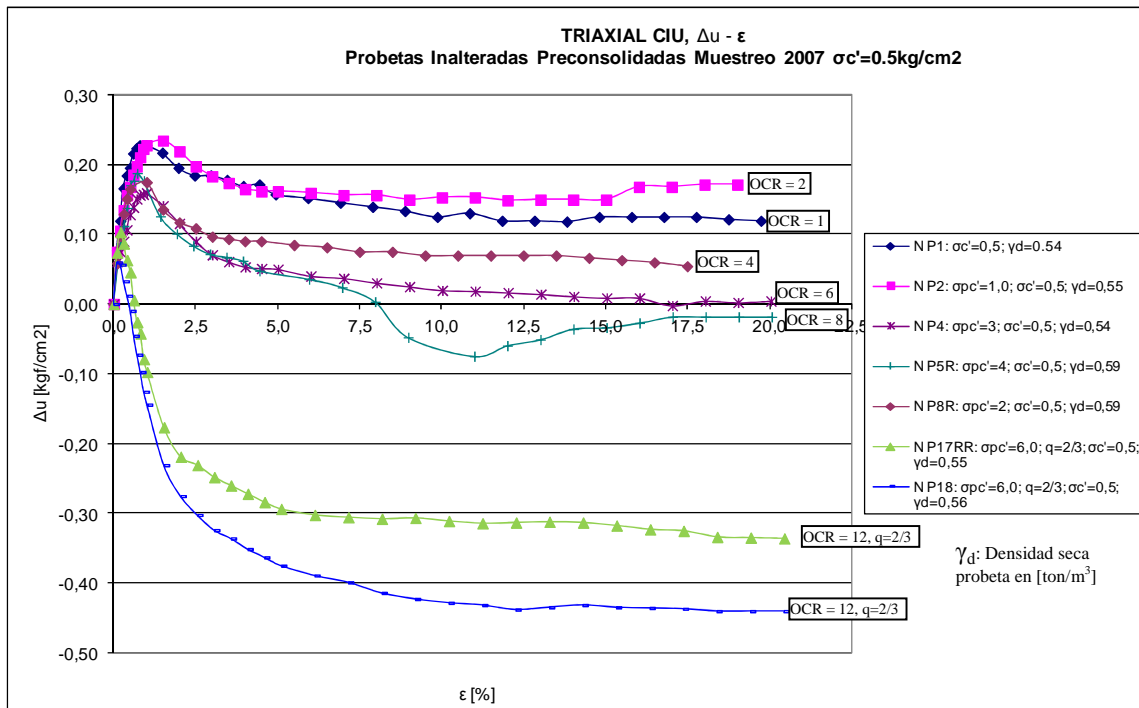


Figura N° 53: Triaxial CIU variación presión de poros “ Δu ” versus deformación unitaria “ ϵ ”.

De las figuras anteriores se desprende que el aumento de la razón de preconsolidación, sin aplicación de un desviador en la precarga (probetas: NP1, NP2, NP4, NP5R, NP8R), la resistencia no drenada desarrollada por el suelo aumenta de acuerdo al OCR aplicado. La probeta con OCR=8 escapa a dicha tendencia, disminuyendo la resistencia. En la figura 54 se grafica la variación de la resistencia no drenada en función de la razón de preconsolidación, obtenida de los ensayos realizados.

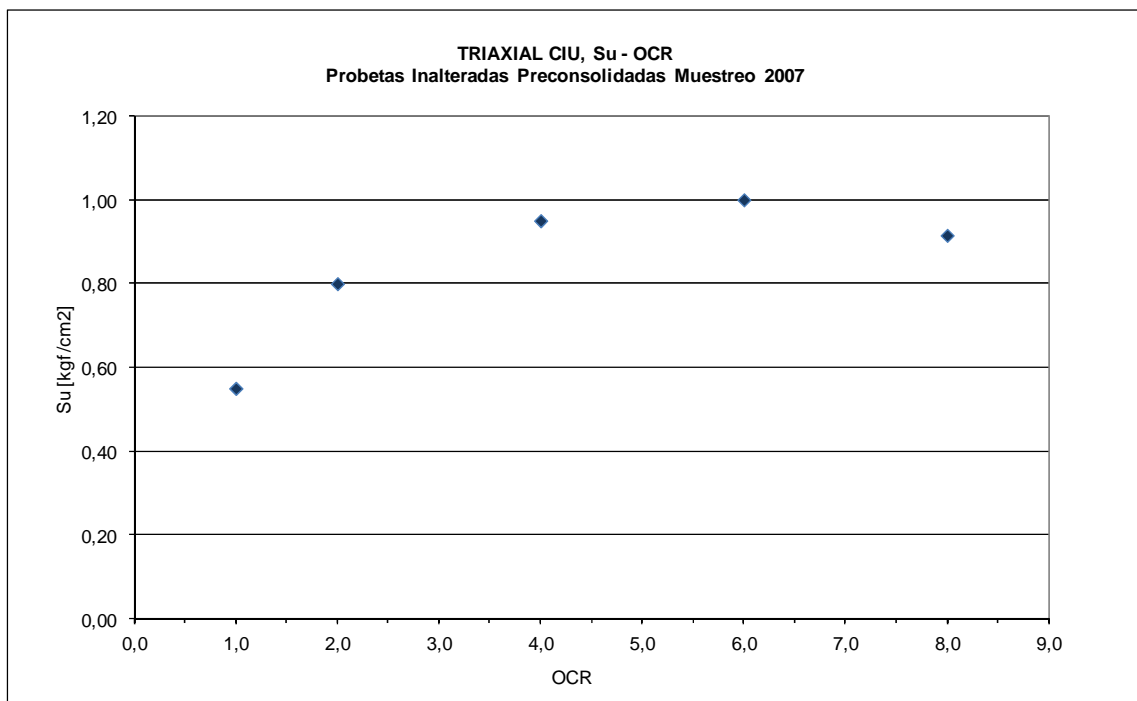


Figura Nº 54: Triaxial CIU variación de la resistencia última no drenada en función de la razón de preconsolidación, probetas inalteradas muestreo 2007.

De los ensayos desarrollados con aplicación de preconsolidación isotrópica y corte (probetas: NP17RR y NP18), se desprende que a pesar que la resistencia última aumenta en comparación con la muestra con OCR=1, éste aumento no sigue la misma tendencia observada en los otros ensayos, siendo incluso menor a la muestra con OCR=6. Así también, estas probetas exhiben en general una variación en la presión de poros que difiere de las otras probetas (ver figura 53), a su vez dicha variación, se encuentra relacionada con las diferencias observadas en la trayectoria de tensiones efectivas (ver figura 51). Lo anterior, es posible relacionarlo a una fuerte influencia que tiene la aplicación de presión isotrópica y desviador en la precarga sobre el esqueleto granular y en la degradación de éste, expresado implícitamente en la disminución del ángulo de fricción interna movilizado.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales CIU realizados en probetas de trumao inalteradas correspondientes al muestreo realizado en 2007, ensayadas a una presión de confinamiento de 3.0kg/cm² y sometidas a diferentes estados de preconsolidación. Es importante considerar que la presión de confinamiento antes señalada, se encuentra por sobre la presión de preconsolidación.

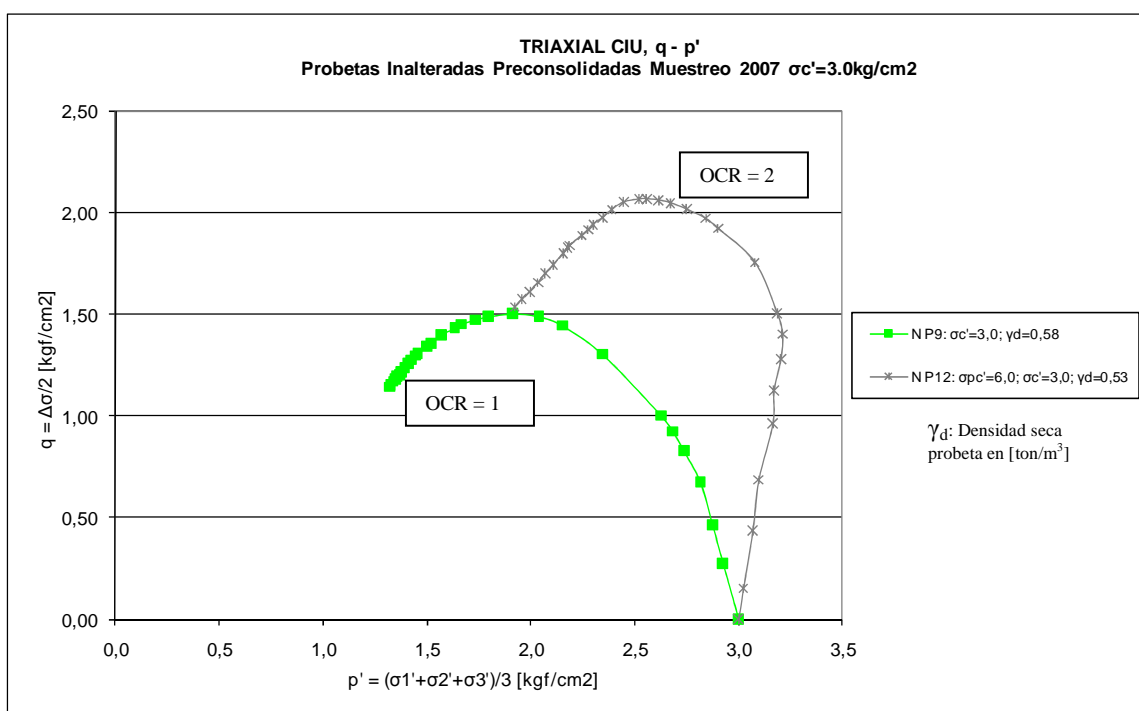


Figura N° 55: Triaxial CIU esfuerzo desviador "q" versus presión media "p".

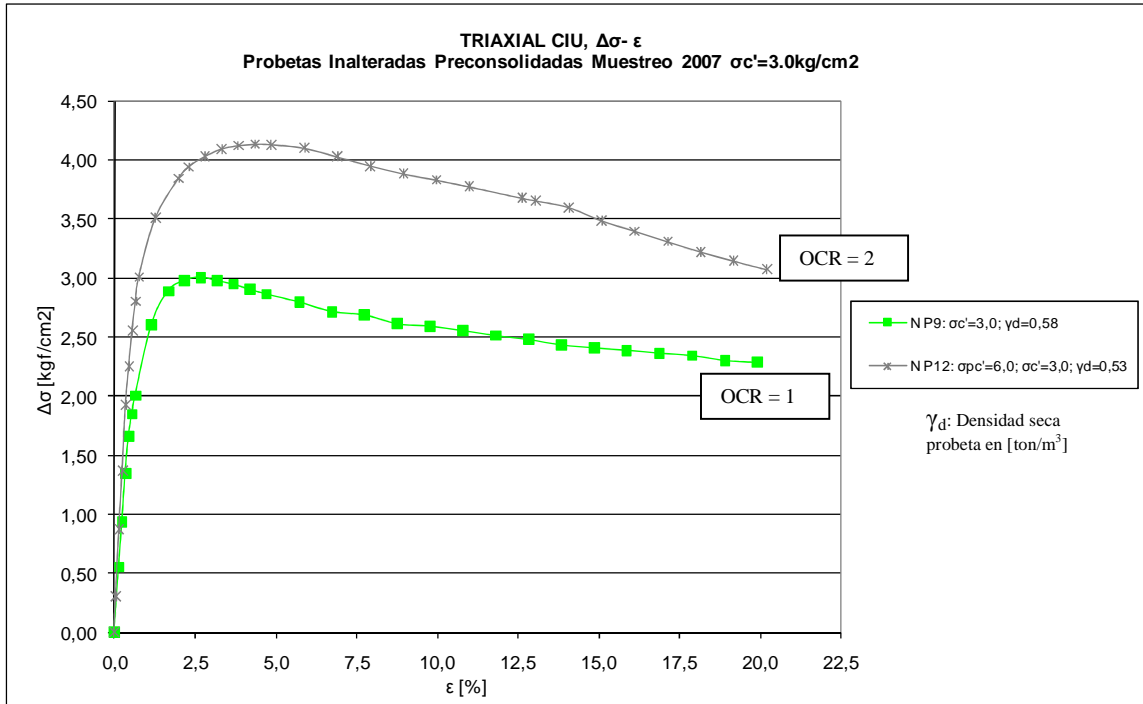


Figura N° 56: Triaxial CIU esfuerzo desviador “ $\Delta\sigma$ ” versus deformación unitaria “ ϵ ”.

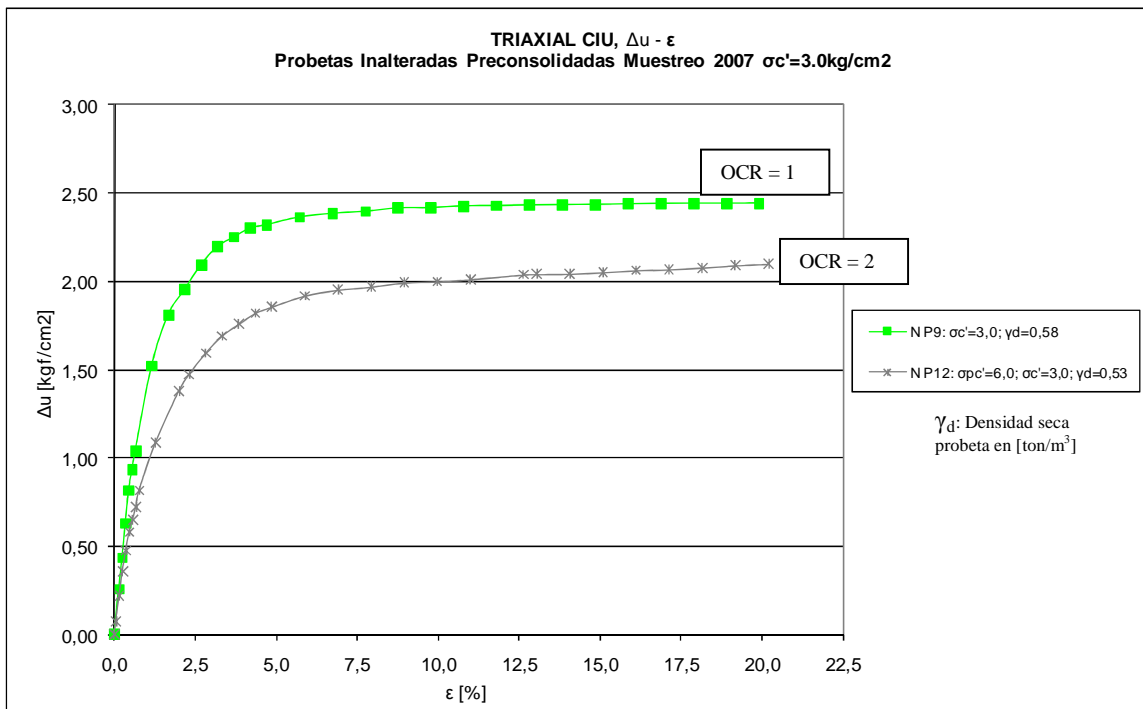


Figura N° 57: Triaxial CIU variación presión de poros “ Δu ” versus deformación unitaria “ ϵ ”.

De estos resultados se desprende que, a pesar que la probeta con OCR de 2 se encontraría preconsolidada, su respuesta fue netamente contractiva, no evidenciando un comportamiento dilatante como se esperaría. Biarez (1994) en su documento “Elementary Mechanics of Soil Behaviour” presenta un estudio en arcillas, para las cuales concluye que en probetas con $OCR < 2$, la respuesta observada fue contractiva; mientras que para probetas preconsolidadas con $OCR > 2$, se observa contractancia seguida por dilatancia.

4.4.2. Probetas Remoldeadas

Por otra parte, se estudió el comportamiento de probetas de trumao remoldeadas sometidas a diferentes estados de preconsolidación isotrópica previo al ensayo (ensayo llevado a cabo a una presión isotrópica de 0.5kg/cm^2). Los resultados de dichas experiencias, se señalan a continuación.

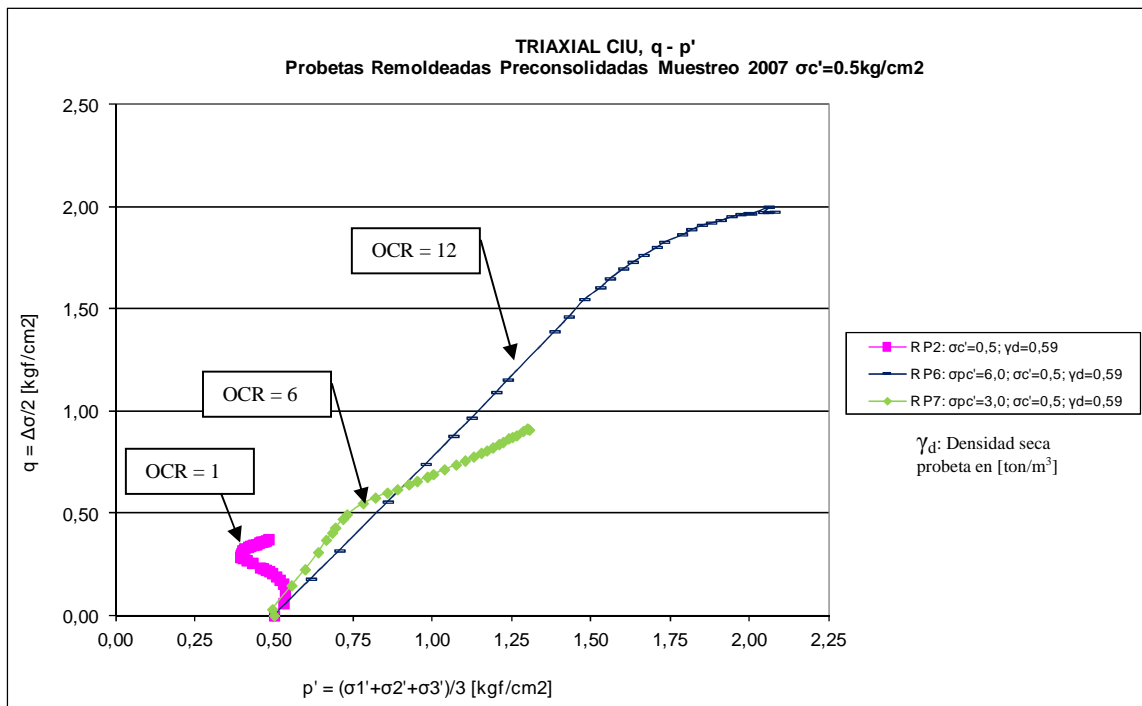


Figura N° 58: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”.

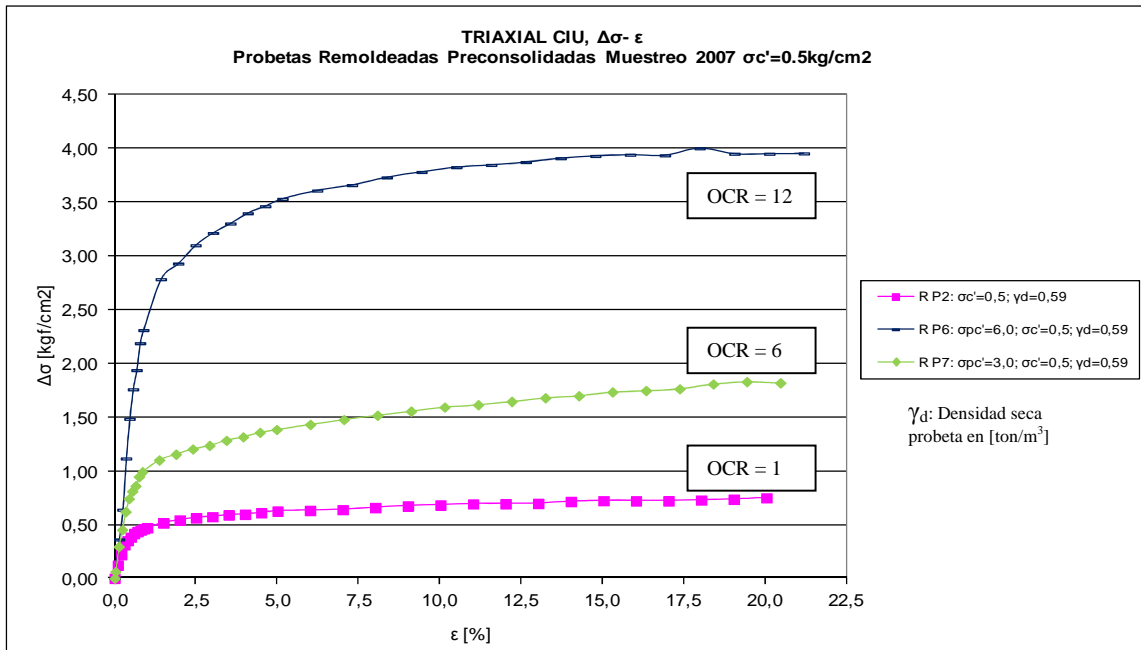


Figura N° 59: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus deformación unitaria “ε”.

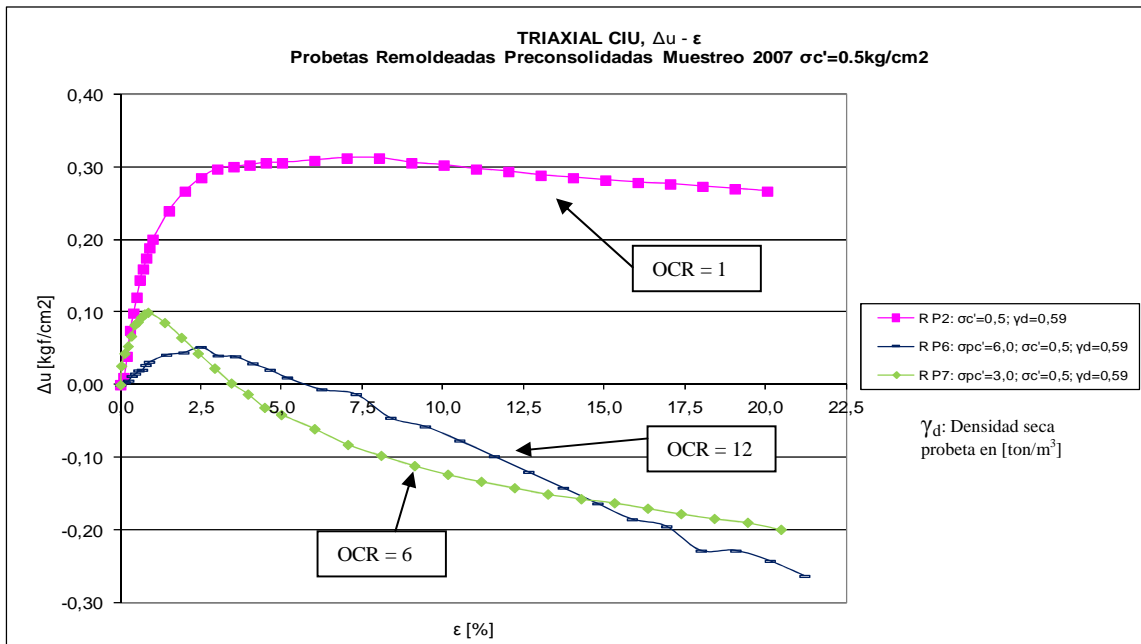


Figura N° 60: Triaxial CIU variación presión de poros “Δu” versus deformación unitaria “ε”.

En este caso se observa claramente el comportamiento preconsolidado de las probetas con $\text{OCR} > 1$, expresado en una respuesta contractiva seguida de dilatancia (ver figura 60)

5. RESULTADOS SERIE DE ENSAYOS 2: TRUMAO DE CHILLÁN

5.1. Ensayos de Clasificación

Se llevaron a cabo ensayos de clasificación completa sobre el suelo extraído en el muestreo de 2009, de tal forma de caracterizarlo y compararlo con el estudiado en los capítulos precedentes.

5.1.1. Análisis Granulométrico

Como fue mencionado en el listado de ensayos y procedimientos, el análisis granulométrico se realizó utilizando material a humedad natural y mediante el método de tamizado para partículas sobre malla ASTM N°200; mientras que para el material bajo malla N° 200, se ejecutó análisis mediante hidrómetro. La curva granulométrica obtenida mediante el primer método mencionado, se presenta en la figura 61.

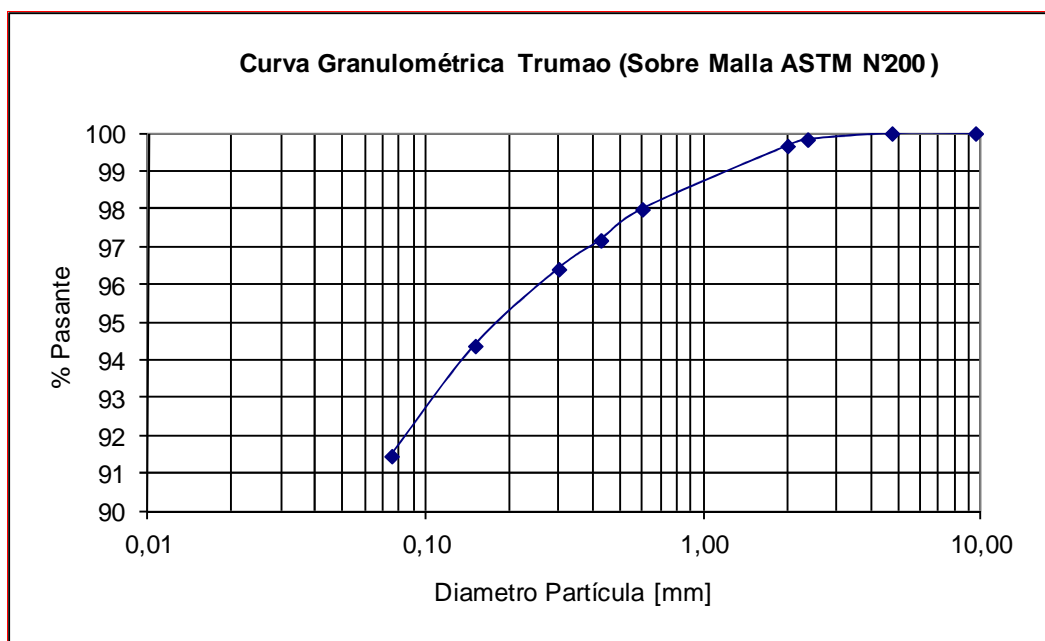


Figura N° 61: Granulometría sobre tamiz ASTM N°200 muestra de trumao en estudio.

De la curva granulométrica anterior, se desprende claramente que el material estudiado posee más del 90% de sus partículas con diámetro menor a 0.075mm. Por lo que el suelo estudiado corresponde principalmente a suelo fino.

Por otra parte, la curva granulométrica obtenida para fracción fina mediante método hidrométrico, es la siguiente.

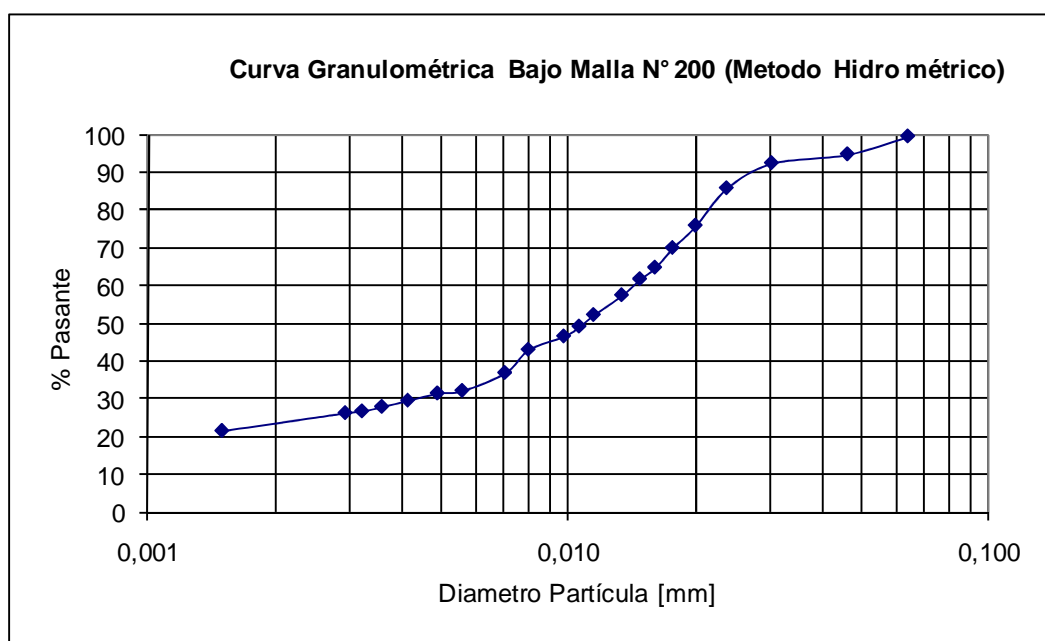


Figura N° 62: Granulometría bajo tamiz ASTM N°200 muestra de trum ao en estudio.

De la figura 62 se desprende que el porcentaje de partículas pertenecientes a fracción arcilla ($\% < 2\mu$) es mayor al 25%, valor mayor al obtenido por Paredes (2005), el cual podría ser un valor más representativo del suelo. Ahora bien, y de acuerdo a lo mencionado por el autor antes citado, este ensayo puede entregar resultados poco precisos debido a la acción del antifloculante utilizado y al proceso de secamiento previo en horno a 60° C en la preparación de la muestra. Por lo que no se puede concluir que verdaderamente el valor de 25% corresponde a la fracción arcilla contenida en el suelo.

De manera referencial debido a las limitaciones del ensayo hidrométrico, en la figura 63 se presenta la curva granulométrica del material integral, resultado de la unión de las dos curvas señaladas anteriormente.

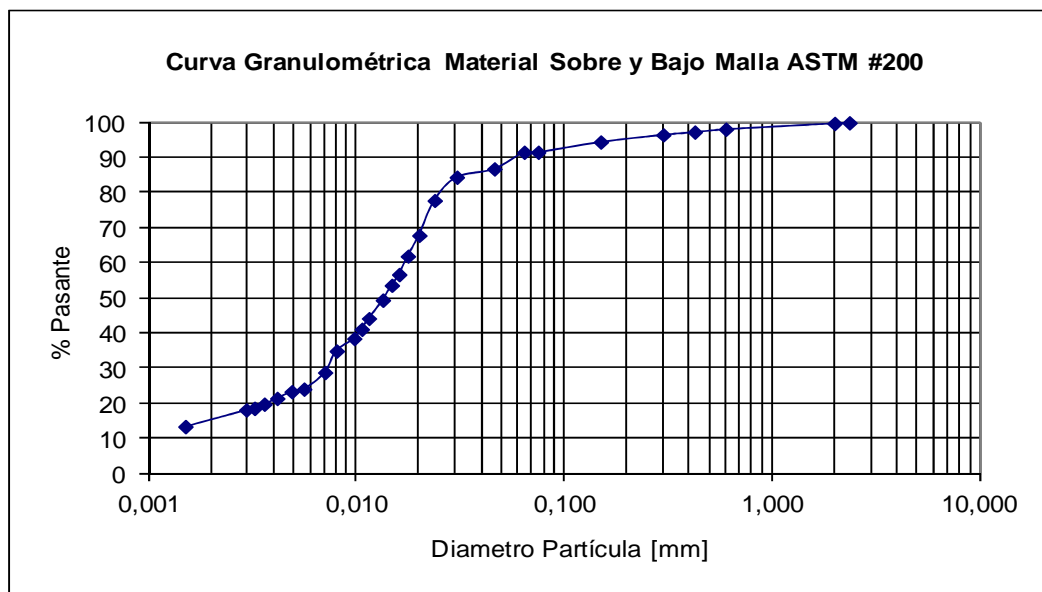


Figura Nº 63: Granulometría sobre y bajo tamiz ASTM N°200 muestra de trumao en estudio.

5.1.2. Límites de Atterberg

La tabla 26 se presentan los resultados de los límites de Atterberg del suelo en estudio, dichos resultados fueron obtenidos a través del método húmedo.

Tabla Nº 26: Listado de Atterberg Trumao de Chillán

Límite Líquido [%]	96
Límite Plástico [%]	70
IP	26

Del análisis granulométrico junto con los resultados señalados anteriormente, se desprende que el suelo en estudio corresponde, de acuerdo al “Sistema Unificado de Clasificación de Suelos”, a “limo de alta plasticidad” (MH). Dicha clasificación concuerda con el suelo trumao estudiado por Paredes (2005) y con gran parte de los suelos alofánicos derivados de cenizas volcánicas.

A continuación se presenta una superposición del resultado anterior, con los resultados determinados por Paredes (2005).

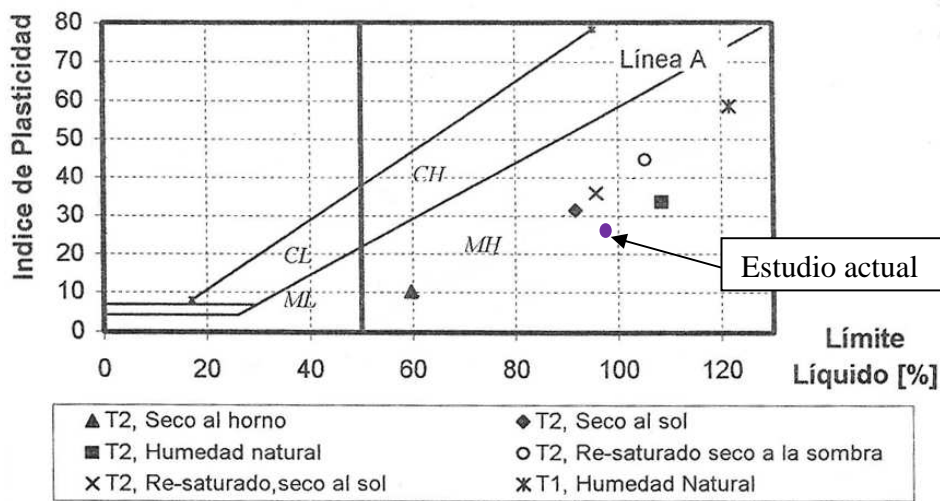


Figura Nº 64: Superposición de los resultados obtenidos para el suelo en estudio con los resultados obtenidos por Paredes (2005).

5.1.3. Gravedad Específica de los Sólidos G_s

El resultado del ensayo de gravedad específica de los sólidos, obtenido para una muestra de trumao preparada mediante secamiento previo en horno a 60°C, se señala en la tabla 27.

Tabla Nº 27: Gravedad Específica de los Sólidos G_s .

Tipo de Ensayo	Gravedad Específica de los Sólidos G_s []
Seco en Horno a 60°	2.61

Dicho valor se encuentra dentro del rango señalado por Paredes (acápite 2.6.3) para muestras secas al horno.

Ahora bien, debido a que el proceso de secado altera las partículas, el valor más representativo de este parámetro para el suelo en estudio, es el señalado en el acápite 4.1 de esta Tesis ($G_s=2,71$), por lo que este último valor es el utilizado en la determinación de índice de huecos de los ensayos.

5.1.4. Peso Unitario

El peso unitario obtenido mediante el método de volumen de agua desplazado utilizando probetas inalteradas, se señala a continuación.

Tabla N° 28: Peso unitario muestras extraídas 2009

Nombre Muestra	Densidad Húmeda γ_h [ton/m ³]	Humedad w [%]	Densidad Seca γ_d [ton/m ³]
Q1_1	1,29	70,6	0,75
Q1_2	1,29	78,1	0,72

Nota: humedades determinadas mediante secado al horno a 60°C

Como se puede observar, el suelo presenta en estado natural una densidad seca cercana a 0.75 ton/cm³. Dichos valores son consistentes con los determinados en estudios anteriores (ver 2.6.3).

5.2. Ensayos de Consolidación Odométrica

Como fue mencionado en el capítulo 3.3.2, se realizaron ensayos de consolidación odométrica en probetas de trumao inalteradas y remoldeadas de 7 cm de diámetro. Los ensayos se llevaron a cabo esperando la estabilización de las deformaciones en cada incremento de carga.

5.2.1. Probeta Inalterada

Se realizó un ensayo utilizando una probeta inalterada con incrementos de carga hasta una tensión máxima vertical de 32 kg/cm² y con la aplicación de un ciclo de descarga-carga a los 16 kg/cm², tal como lo señala la figura 65.

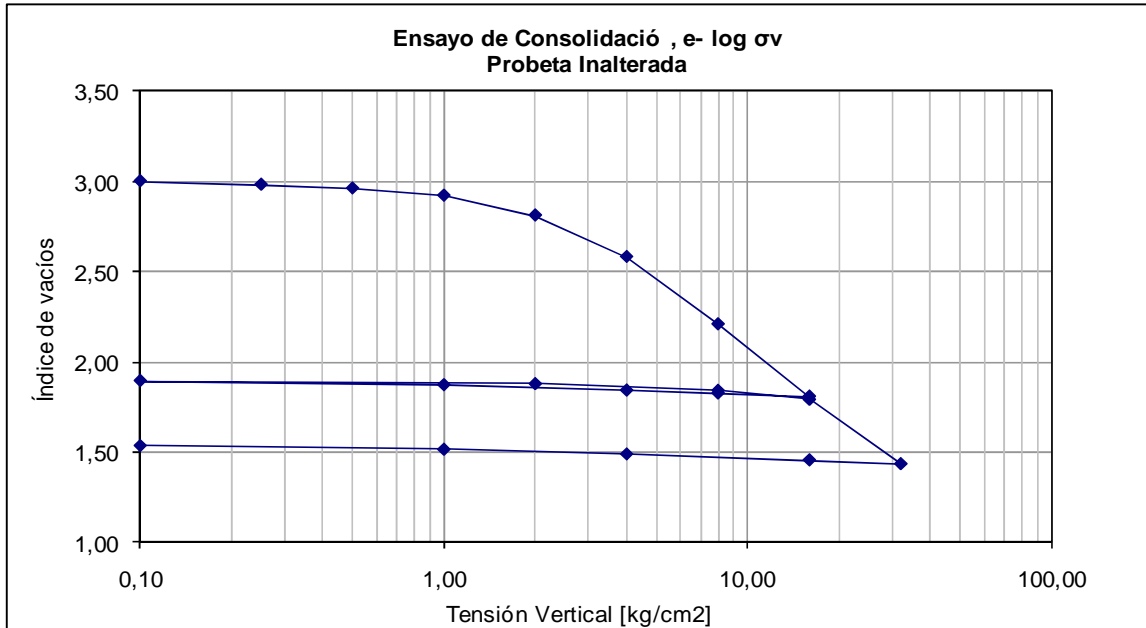


Figura N° 65: Ensaye de consolidación muestra de trumao inalterada, diagrama e-log σ_v .

Adicionalmente, se presenta la variación del índice de huecos “e” en función de la tensión vertical “ σ_v ” en escala logarítmica para los primeros incrementos de carga, indicando la presión de preconsolidación resultante.

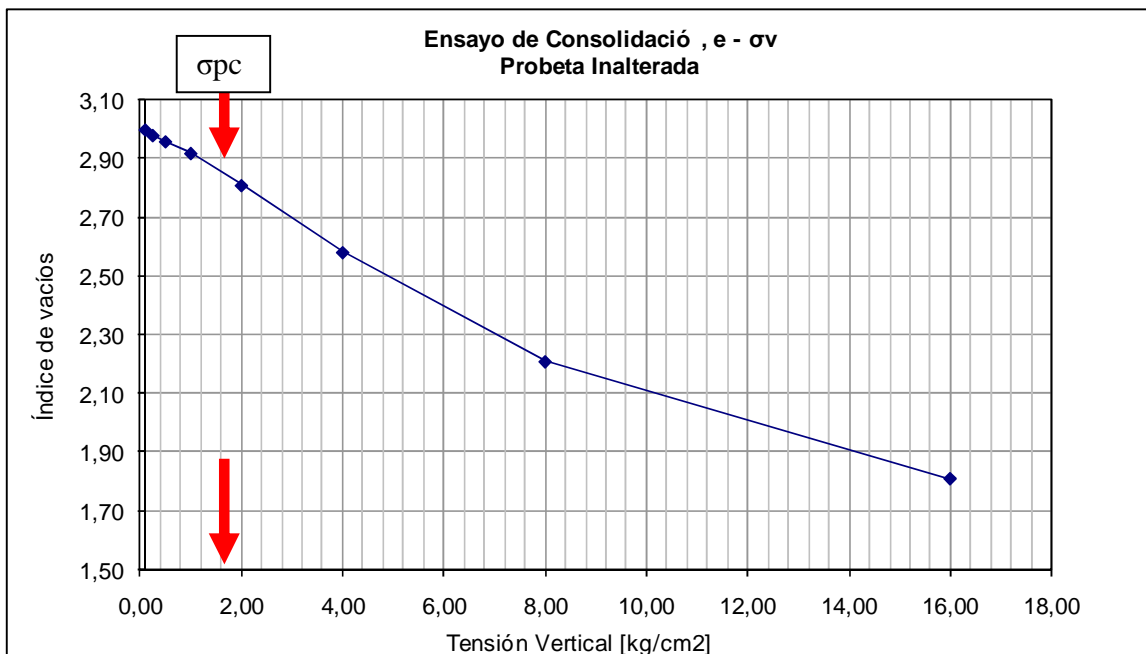


Figura N° 66: Ensaye de consolidación muestra de trumao inalterada, diagrama e- σ_v , primeras cargas.

De los resultados señalados en las figuras 65 y 66, se desprenden los siguientes parámetros de consolidación para el suelo en estudio:

$\sigma_{pc}' = 1,8 \text{ kg/cm}^2$ Presión de Preconsolidación

$C_c = 1,28$ Índice de Compresibilidad en Carga Virgen

$C_r = 0,08$ Índice de Compresibilidad en Recarga

Dichos valores son similares a los resultados obtenidos para las muestras de trumao presentados en el capítulo 4.2, con excepción del índice de compresibilidad en carga, que en este caso es algo menor que el expuesto en el capítulo antes mencionado. Cabe destacar que la preconsolidación de estos suelos no se debe a una precarga geológica, sino más bien a un fenómeno físico-químico ocurrido en las partículas que conforman la microestructura del suelo (ver 2.6.3).

5.2.2. Probeta Remoldeada

En este ensayo se confeccionó una probeta con material remoldeado mediante amasado, utilizando la densidad de terreno y humedad natural sin aplicar secamiento a la probeta. El ensayo se llevó a cabo aplicando incrementos de carga hasta una tensión vertical máxima de 8 kg/cm^2 , esperando la estabilización de deformaciones en cada incremento. A continuación se presentan los diagramas “ $e-\log \sigma_v$ ” y “ $e-\sigma_v$ ” resultantes del ensayo.

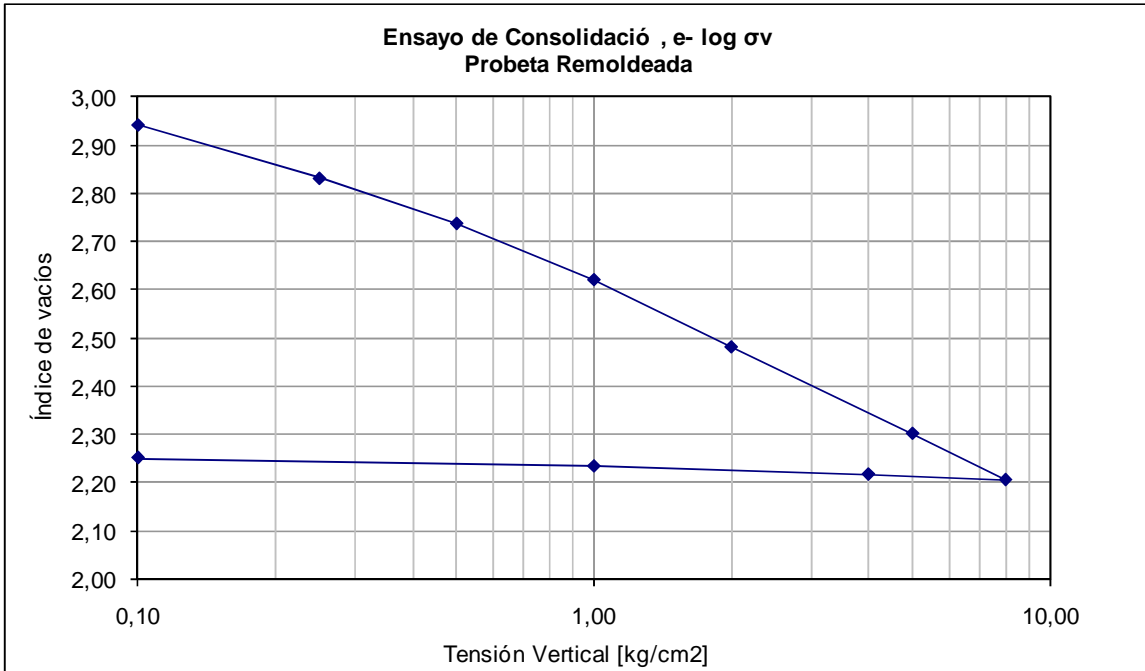


Figura Nº 67: Ensayo de consolidación muestra de trumao remoldeada, diagrama $e - \log \sigma_v$.

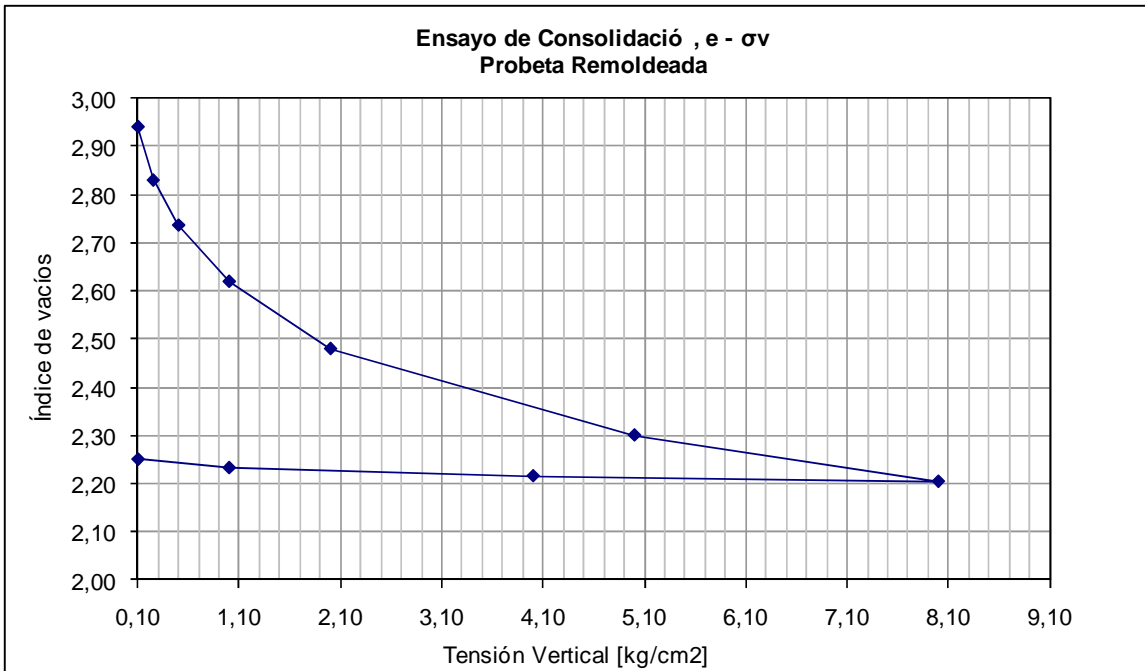


Figura Nº 68: Ensayo de consolidación muestra de trumao remoldeada, diagrama $e - \sigma_v$.

De las figuras anteriores se desprende que para la condición remoldeada, la muestra de trumao solo exhibe un comportamiento normalmente consolidado, por ende no presenta

presión de preconsolidación como la muestra inalterada, determinándose de esta manera, que la influencia de la estructura interna que posee el suelo en la consolidación, es destruida por el remodelo.

De este ensayo se obtuvo un índice de compresibilidad en carga virgen de:

$$C_c = 0,45 \text{ Índice de Compresibilidad en Carga Virgen,}$$

Este valor es considerablemente menor que el obtenido en las probetas inalteradas. Consecuentemente se concluye que en estado normalmente consolidado, la compresibilidad del suelo con estructura inalterada es mucho mayor que la del suelo en estado remodelado. Ahora bien, para presiones normales inferiores a la de preconsolidación para probetas inalteradas ($1,8 \text{ kg/cm}^2$), la compresibilidad o deformabilidad que pueden sufrir estas es mucho menor que la de muestras remodeladas, tal como se observa a continuación.

Presiones Normales menores a $\sigma_v = 1,8 \text{ kg/cm}^2$

$$\frac{C_r}{1 + e_0} \approx 0,02, \text{ para probetas inalteradas.}$$

$$\frac{C_c}{1 + e_0} \approx 0,11, \text{ para probetas remodeladas.}$$

Presiones Normales mayores a $\sigma_v = 1,8 \text{ kg/cm}^2$

$$\frac{C_c}{1 + e_0} \approx 0,32, \text{ para probetas inalteradas.}$$

$$\frac{C_c}{1 + e_0} \approx 0,11, \text{ para probetas remodeladas.}$$

Nota: para los resultados anteriores se utilizó un índice de huecos $e_0=2,94$.

5.3. Ensayos de Compresión No Confinada

Ensayos de compresión no confinada fueron realizados sobre muestras inalteradas y remoldeadas de trumao, utilizando probetas de 5cm de diámetro por 10cm de alto. Las curvas tensión-deformación obtenidas, se señalan en la figura 69.

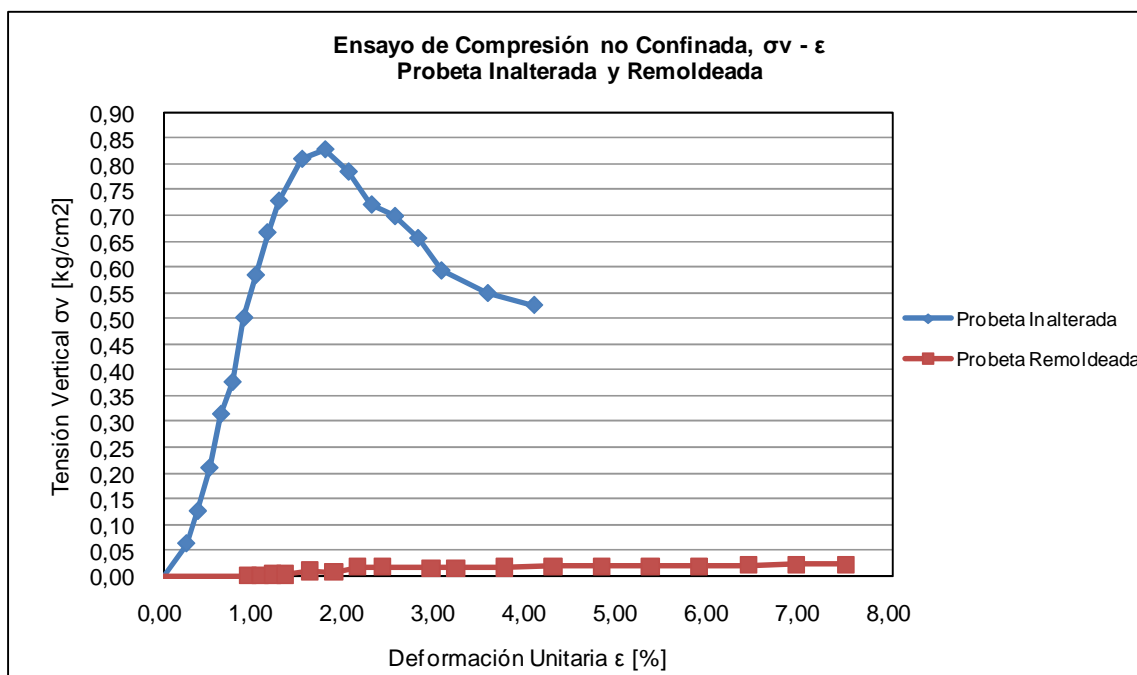


Figura Nº 69: Compresión no Confinada, muestras de trumao inalterada y remoldeada

Del gráfico anterior se desprende una alta sensibilidad frente al remoldeo, obteniéndose como relación entre las resistencias de probetas inalteradas y remoldeadas:

$$S_t = \frac{q_{inait}}{q_{remold}} = 42$$

Como ha sido expuesto, los suelos de origen volcánico poseen alta sensibilidad al remoldeo en el ensaye de compresión no confinada. Característica que queda reflejada en la fuerte caída en resistencia que sufre el suelo al ser perturbado.

5.4. Triaxiales Consolidados No Drenados (CIU)

Los resultados de los ensayos triaxiales CIU realizados en probetas inalteradas de 5 cm de diámetro por 10 cm de alto, utilizando muestras de trumao extraídas el año 2009 se señalan a continuación.

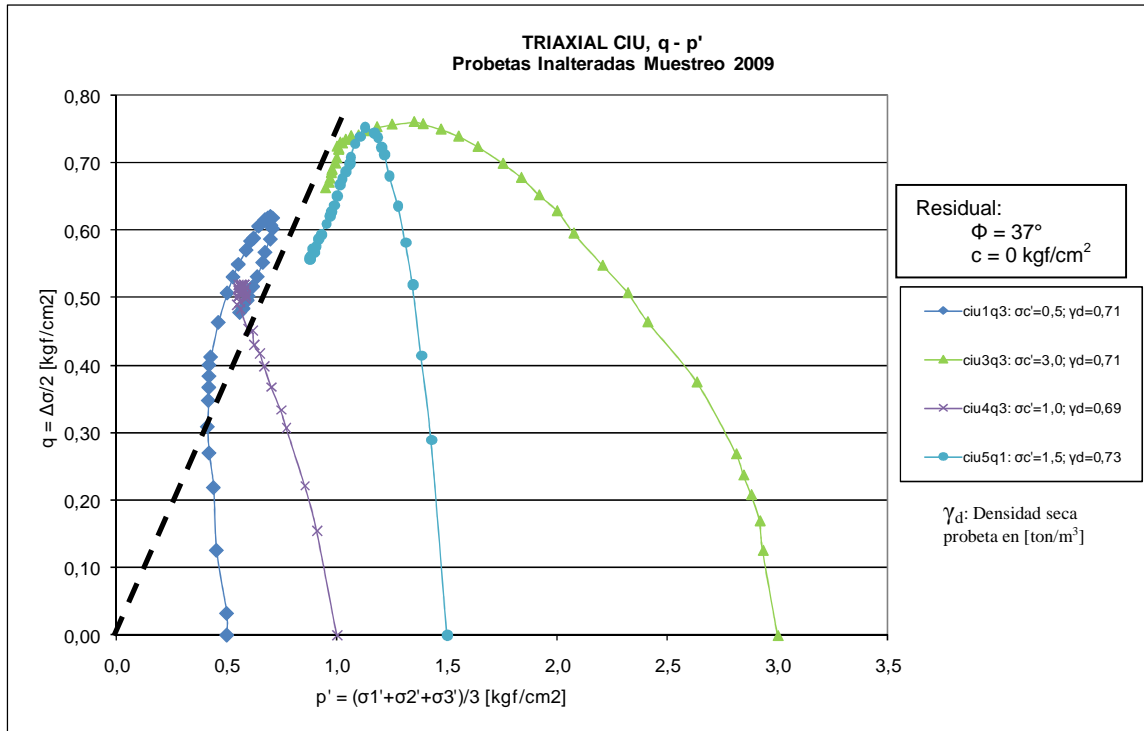


Figura Nº 70: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, muestreo 2009.

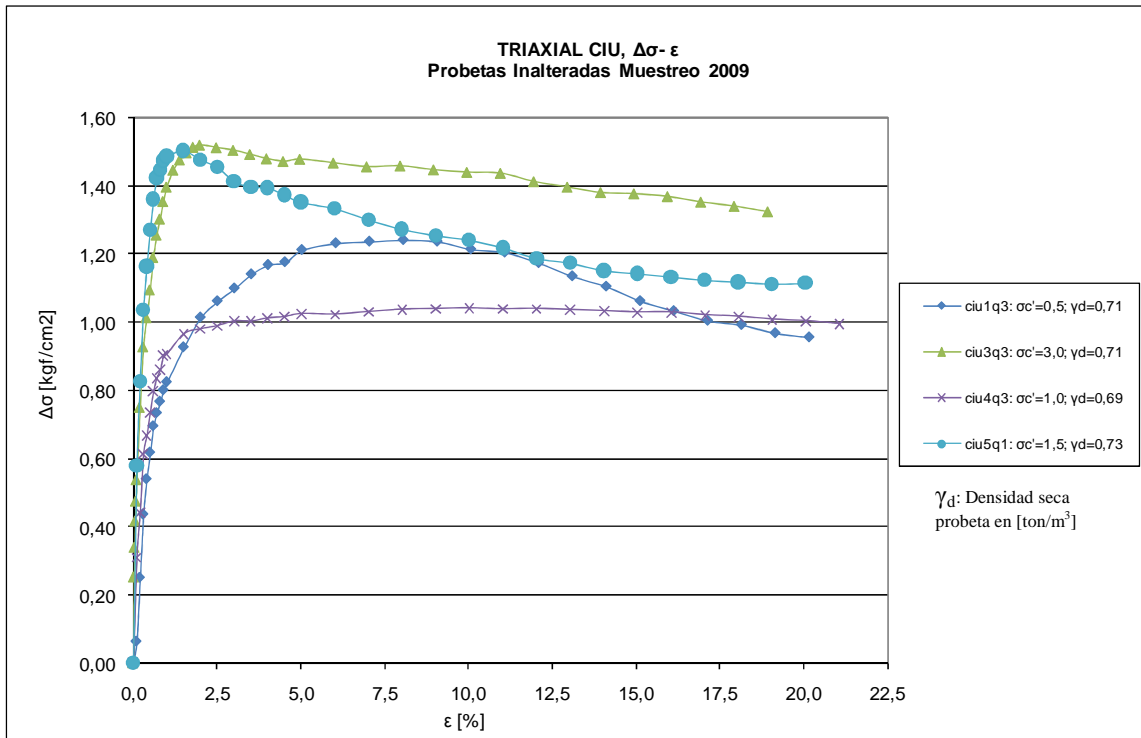


Figura N° 71: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus deformación unitaria “ε”, muestreo 2009.

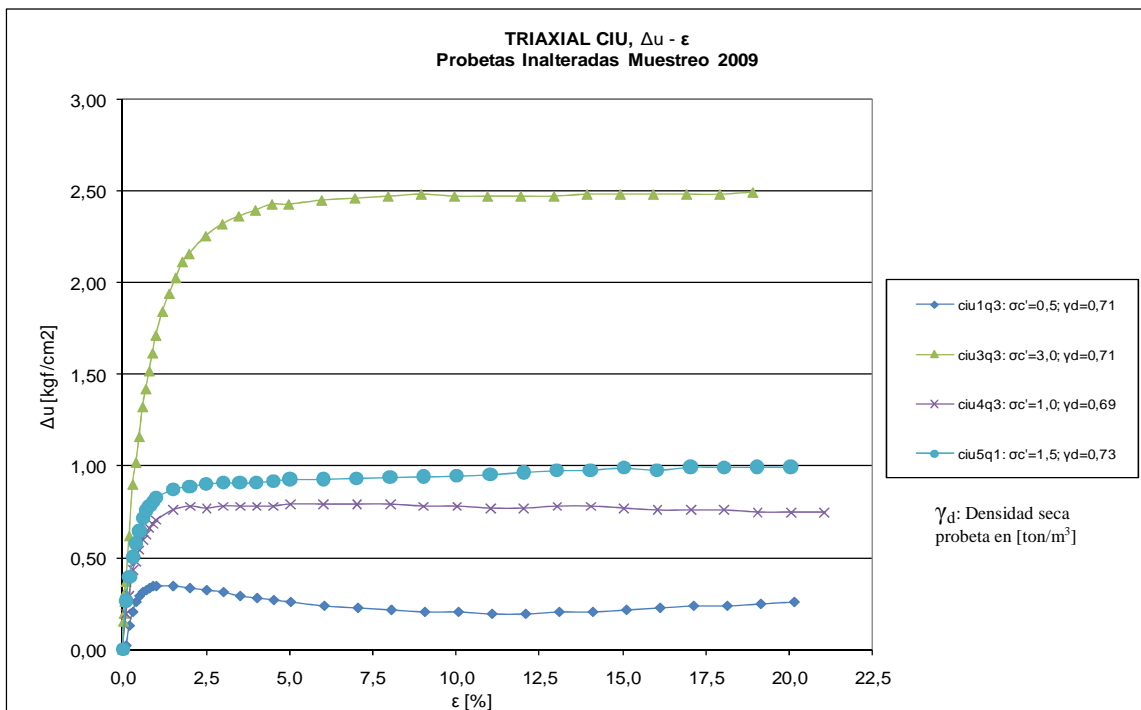


Figura N° 72: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria “ε”, muestreo 2009.

De los resultados anteriores, se desprende que el suelo posee una presión de preconsolidación isotrópica entre 1.0 kg/cm^2 y 1.5 kg/cm^2 . Mientras que los parámetros de resistencia al corte residuales aproximados que se obtienen corresponden a un ángulo de fricción interna de $\Phi=37^\circ$, y una cohesión nula. Estos valores se acercan a los obtenidos de los ensayos realizados con muestras extraídas de los años anteriores (ver capítulo 4.3).

5.5. Triaxiales Cíclicos No Drenados Consolidados Isotrópicamente

Como fue mencionado en el capítulo 3.3.2, se realizaron ensayos triaxiales cíclicos no drenados en probetas de trumao inalteradas y remodeladas de 5cm de diámetro y 10cm de altura, consolidados isotrópicamente.

Para la elaboración de las curvas “razón de tensiones cíclica” “Rc” versus “numero de ciclos que se presentan más adelante, se utilizaran los criterios de falla de deformación y desarrollo de 100% de presión de poros. Para el primero, se determina el número de ciclos para el cual se alcanza el 5% y 10% de deformación en doble amplitud “ ϵ_{da} ”. Mientras que para el segundo, el numero de ciclos para el cual se igual por primera vez la presión de poros interna a la presión de confinamiento isotrópica de ensaye, este estado es denominado por diversos autores como “Licuación”.

5.5.1. Probetas Inalteradas

A continuación se presentan las curvas resistencia cíclica versus número de ciclos, para las probetas de trumao inalterada. Las presiones de confinamiento utilizadas en los ensayos varían entre $0,5 \text{ kg/cm}^2$ y $4,0 \text{ kg/cm}^2$, de tal forma de obtener resultados bajo y sobre la presión de preconsolidación estudiada anteriormente (ver capítulos 4.3 y 5.4).

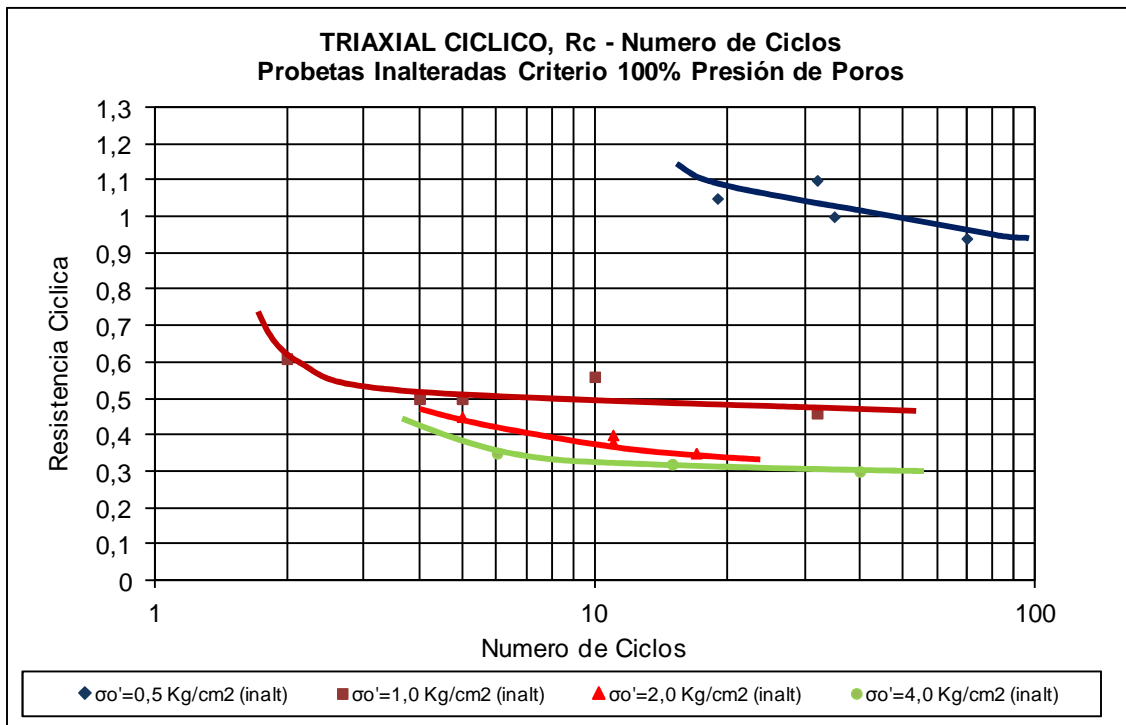


Figura Nº 73: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.

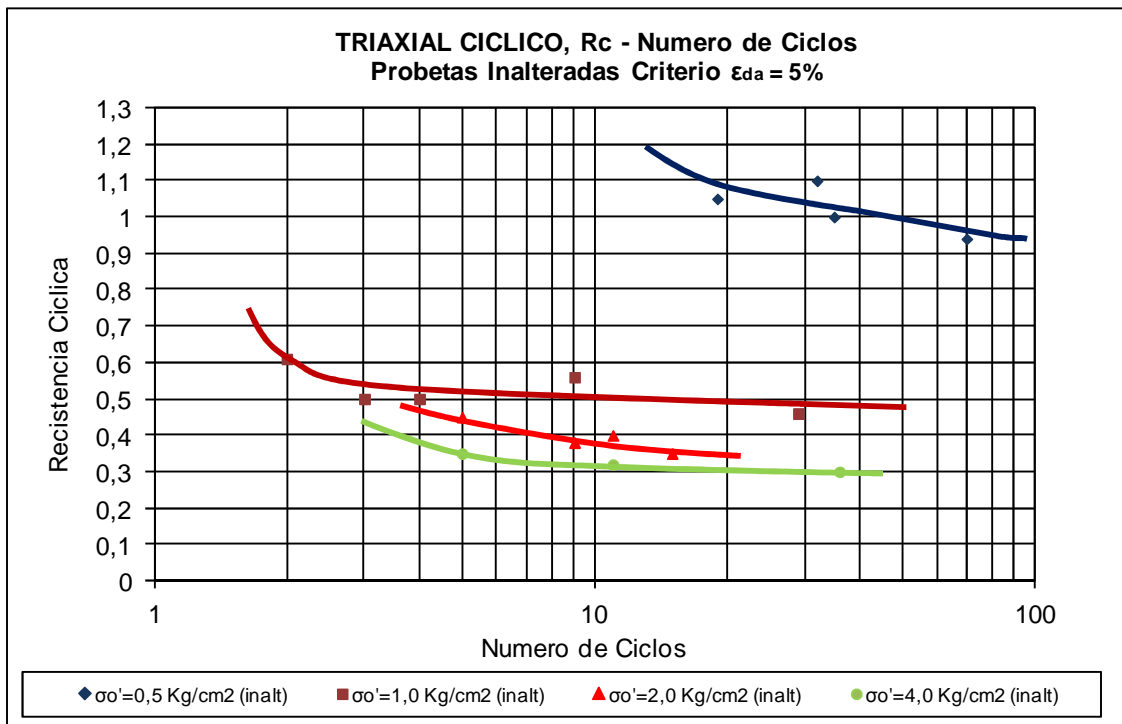


Figura Nº 74: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas, criterio de falla: $\epsilon_{da}=5\%$

Como puede ser observado en las figuras 73 y 74, la razón cíclica disminuye en relación al aumento de la presión de confinamiento, comportamiento de similar tendencia al desarrollado en arenas.

Por otra parte, existe una amplia diferencia de la resistencia cíclica entre la curva a presión de confinamiento de 0.5 kg/cm² con la siguiente a 1.0 kg/cm² para ambos criterios de falla. Al ser todas las probetas montadas en las mismas condiciones de densidad y humedad, y siendo ejecutado el ensayo bajo la misma metodología en todos los casos, es posible inferir que esta gran variación se debe a la existencia de una presión de preconsolidación isotrópica, la cual se encontraría cercana a 1.0kg/cm².

Adicionalmente, de las figuras 73 y 74 se desprende que no existen grandes diferencias entre ambos criterios de falla expuestos, esto debido a que el desarrollo del 100% de presión de poros ocurre a un número de ciclos cercano para el que se alcanza el 5% de deformación en doble amplitud. A modo de ejemplo, en la figura 75 se presentan los gráficos “variación de presión de poros” en el tiempo y “deformación unitaria” en el tiempo

resultantes del ensayo con presión isotrópica de 0.5 kg/cm². Los gráficos resultantes para los demás ensayos se presentan en Anexo A.

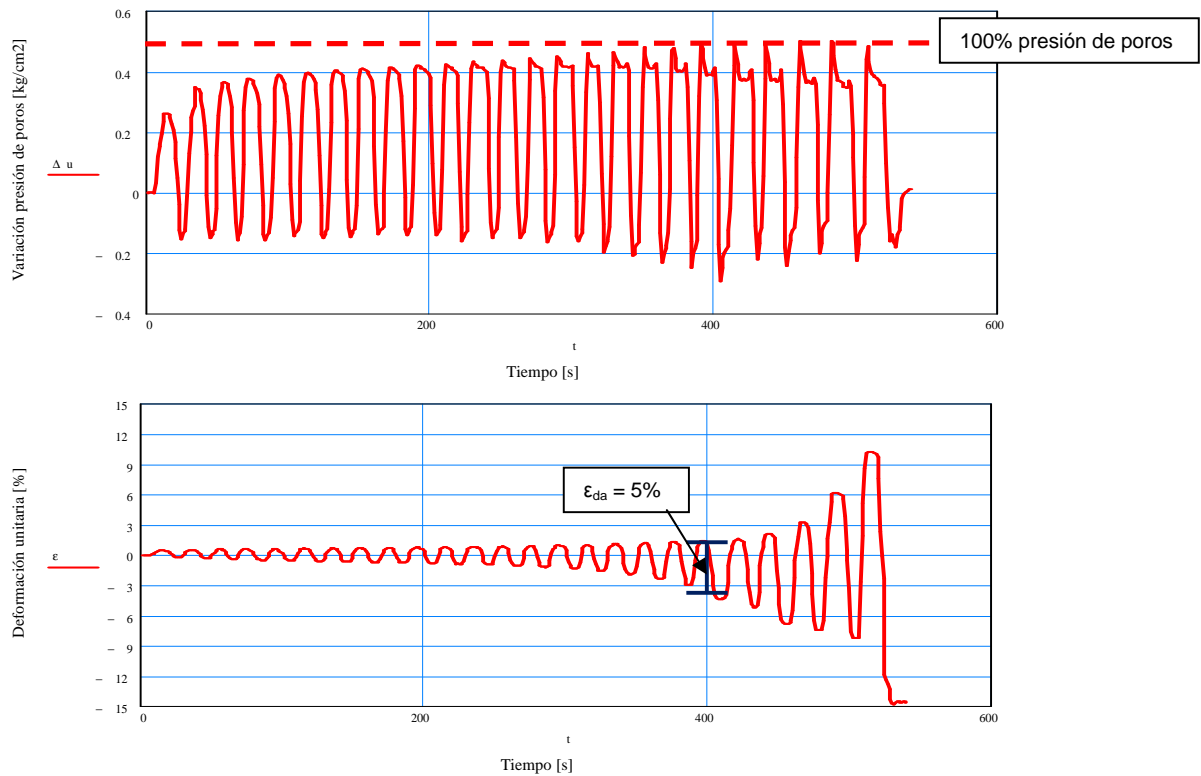


Figura N° 75: Variación de presión de poros en el tiempo y deformación unitaria en el tiempo, ensayo con presión isotrópica 0.5 kg/cm² en probeta inalterada.

En la figura 76 se presenta la curva de variación en función de la presión de confinamiento del coeficiente corrección “Kσ” definido por Seed (1983), para los ensayos realizados. Además, se agregan curvas obtenidas para arenas naturales, entre ellas la descrita por Seed and Harder (1990). En este caso Kσ es determinado para el criterio de desarrollo de 100% de presión de poros y se define como:

$$K\sigma = \frac{CRR_{\sigma\sigma', N=20}}{CRR_{\sigma\sigma'=1.0\text{kg/cm}^2, N=20}}$$

En donde, CRR: Resistencia cíclica
 σσ': Presión de confinamiento efectiva
 N: Numero de ciclos

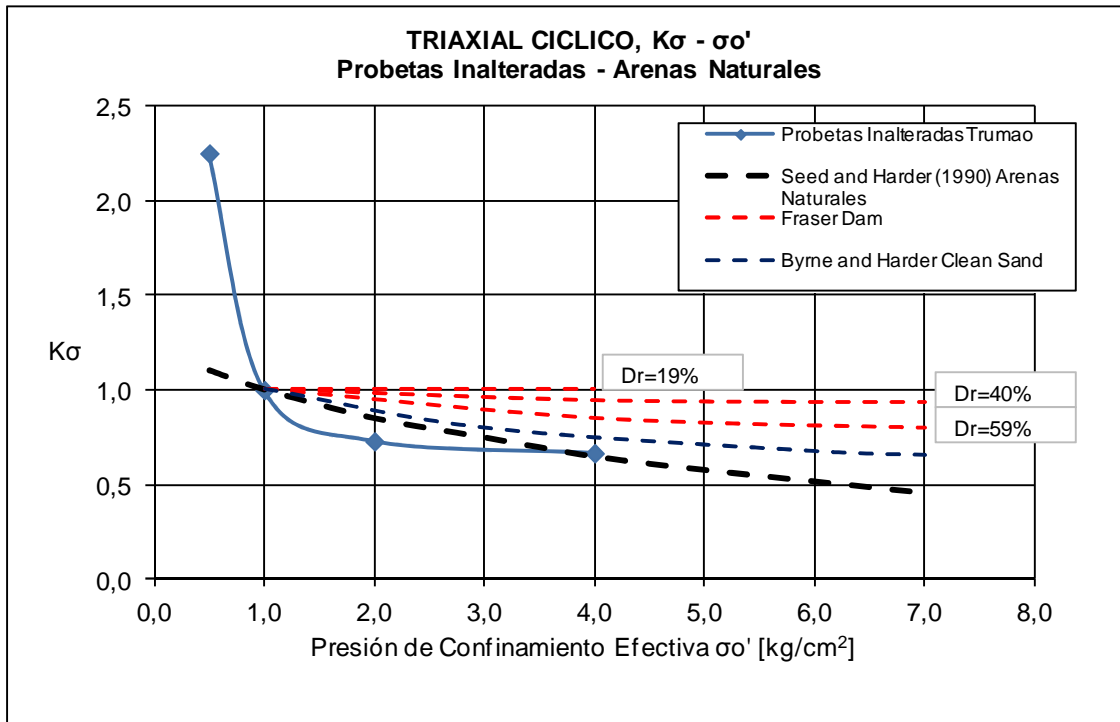


Figura Nº 76: Comparación del factor de corrección K_σ obtenido para trumao con arenas naturales.

De este resultado se desprende que para presiones de confinamiento mayores a la preconsolidación, el suelo en estudio tendría una variación de K_σ que se acerca a la curva descrita por Seed and Harder (1990).

5.5.2. Probetas Remoldeadas

En el caso de probetas remoldeadas, se realizaron ensayos a presiones de consolidación isotrópica entre 0,5 kg/cm² y 3,0kg/cm². A continuación se presentan los resultados considerando los criterios asociados a 100% de presión de poros, deformación unitaria en doble amplitud de $\epsilon_{da} = 5\%$ y $\epsilon_{da} = 10\%$.

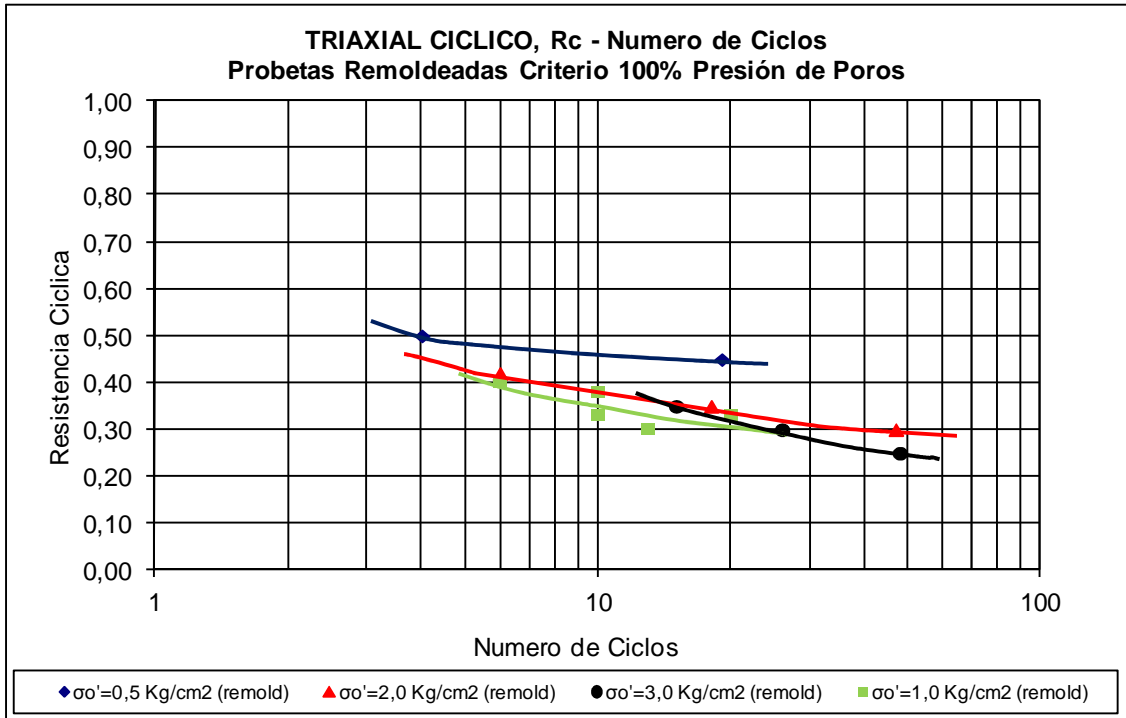


Figura N° 77: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.

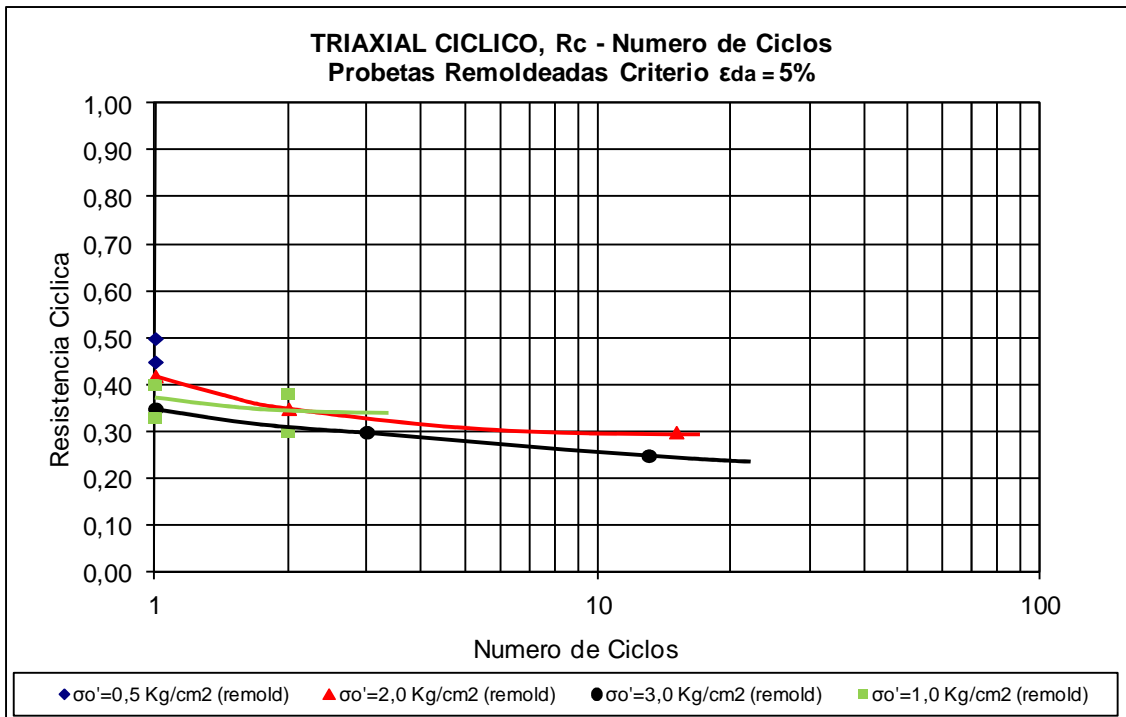


Figura N° 78: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas, criterio de falla: $\epsilon_{da} = 5\%$

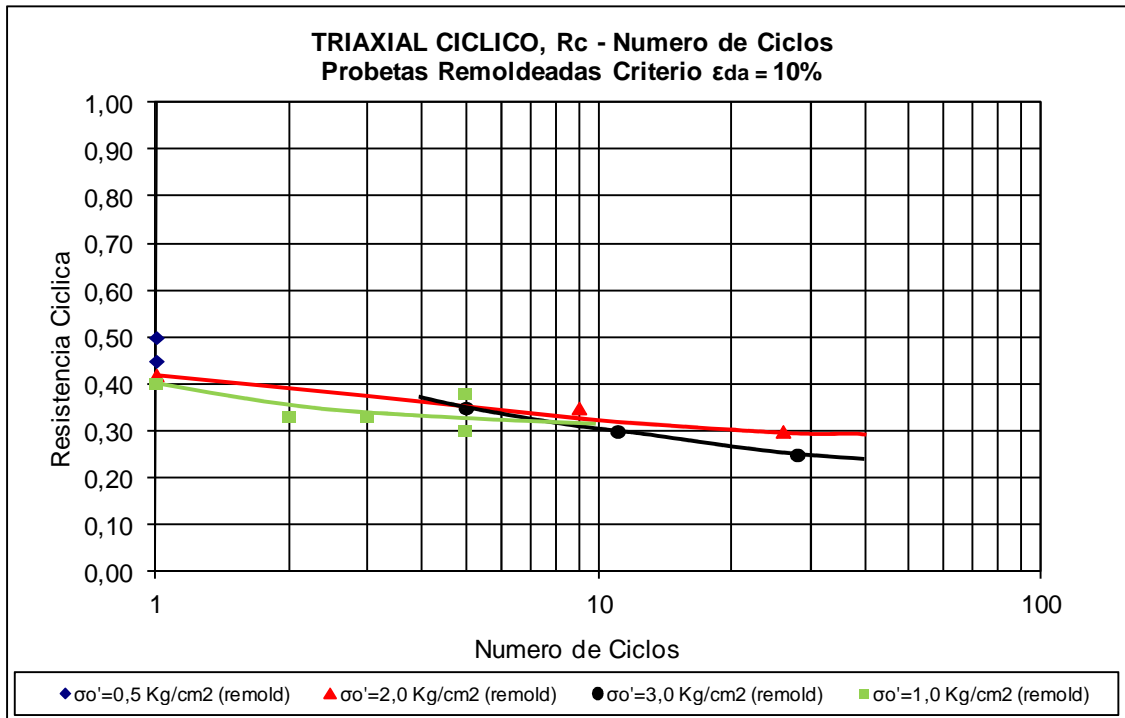


Figura N° 79: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas, criterio de falla: $\epsilon_{da}=10\%$

A diferencia de las probetas inalteradas, en este caso se observa que las curvas correspondientes a presiones de confinamiento mayores a $0,5 \text{ kg/cm}^2$ tienden a aproximarse a una sola curva, no existiendo un efecto de la presión de confinamiento. Además, en la figura 77 se distingue una diferencia entre la curva a $0,5 \text{ kg/cm}^2$ con respecto a las otras, lo cual, es posible que se deba a la existencia del fenómeno de preconsolidación en probetas remoldeadas, tal como se menciona en el capítulo 4.3.

Como se desprende de las figuras 77, 78 y 79, en probetas remoldeadas el desarrollo del 100% de presión de poros ocurre a grandes deformaciones, mayores al 10% en doble amplitud, lo cual difiere significativamente con probetas inalteradas, en las que ocurre al 5% de deformación en doble amplitud. Por otra parte, el número de ciclos necesarios para alcanzar el 5% de deformación en este tipo de probetas es relativamente bajo, lo cual dificulta el criterio de comparación entre probetas inalteradas y remoldeadas bajo un criterio de deformaciones.

En la figura 80 se presenta la curva de variación en función de la presión de confinamiento del coeficiente corrección “ $K\sigma$ ” para los ensayos realizados. Además, se agregan curvas obtenidas para arenas naturales, entre ellas la descrita por Seed and Harder (1990). En este caso $K\sigma$ es determinado para el criterio 100% de presión de poros y se define como:

$$K\sigma = \frac{CRR_{\sigma\sigma', N=20}}{CRR_{\sigma\sigma'=1.0\text{kg/cm}^2, N=20}}$$

En donde, CRR: Resistencia cíclica
 $\sigma\sigma'$: Presión de confinamiento efectiva
 N: Numero de ciclos

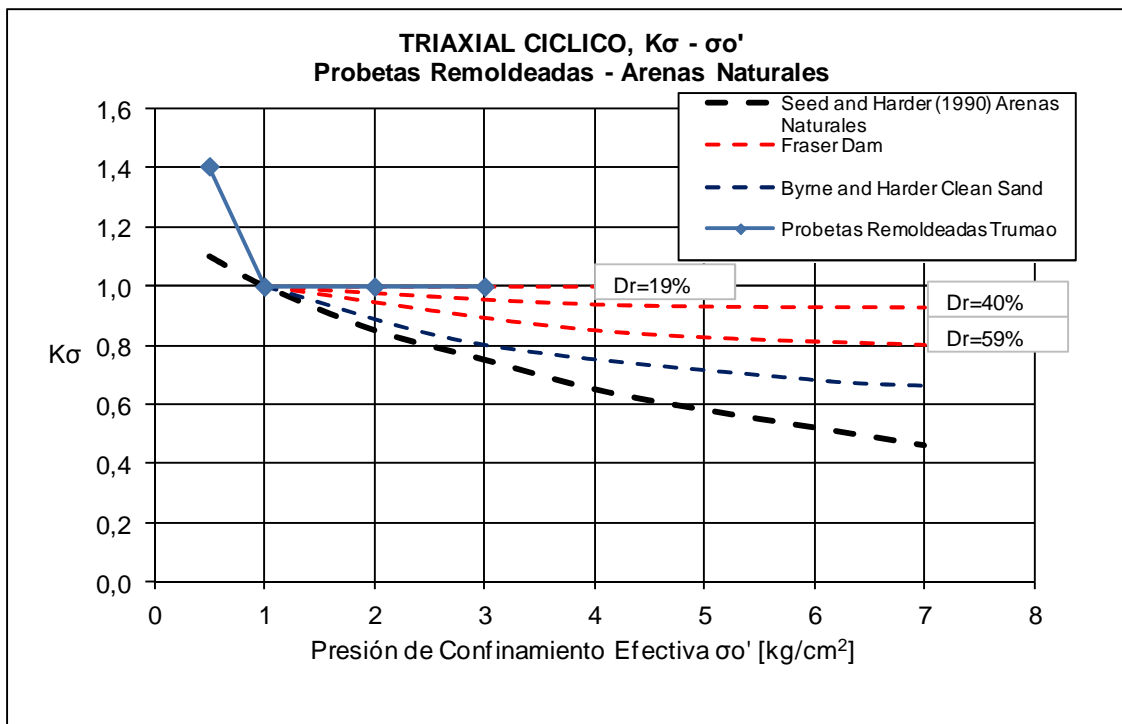


Figura Nº 80: Comparación del factor de corrección $K\sigma$ obtenido para probetas de trumao remoldeadas con arenas naturales.

En este caso, la variación del factor $K\sigma$ se escapa a la tendencia seguida por arenas naturales a de probetas inalteradas.

5.5.3. Resumen Probetas Inalteradas y Remoldeadas

En la figura 81 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las probetas inalteradas y remoldeadas señaladas anteriormente. El criterio de falla utilizado corresponde al desarrollo del 100% de presión de poros en ambos tipos de suelo.

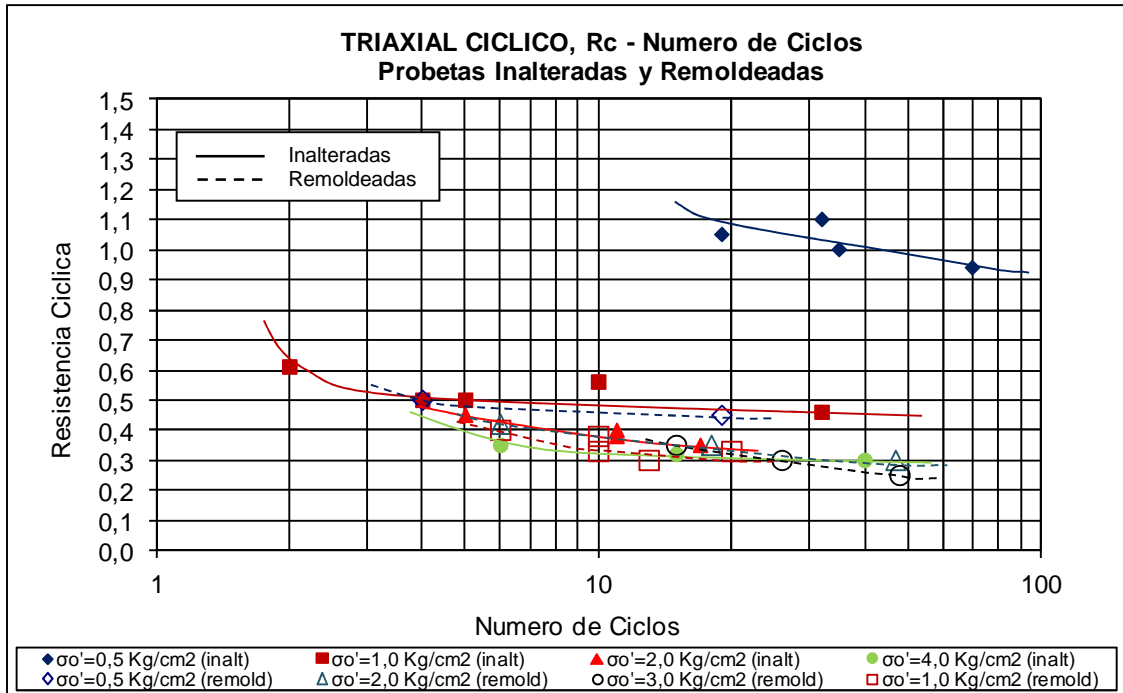


Figura Nº 81: Rc-número de ciclos probetas de trumao inalteradas y remoldeadas

En general, los resultados de probetas remoldeadas e inalteradas se encuentran dentro de un rango de valores de razón cíclica similar en ambos casos, con excepción de la curva para 0,5kg/cm² en probetas inalteradas, los cuales escapan de dicho rango. Por lo cual, de manera cuantitativa es posible mencionar, que no existe diferencia significativa entre ambos tipos de probetas para presiones mayores a la de preconsolidación del suelo. En otras palabras, la resistencia cíclica en probetas remoldeadas no caería drásticamente con respecto a las inalteradas a presiones mayores a la de preconsolidación. Esto también queda ejemplificado en la figura 82, en la cual se presenta la variación de la resistencia cíclica en función de la presión de confinamiento para 20ciclos, considerando como criterio de falla el desarrollo del 100% de presión de poros.

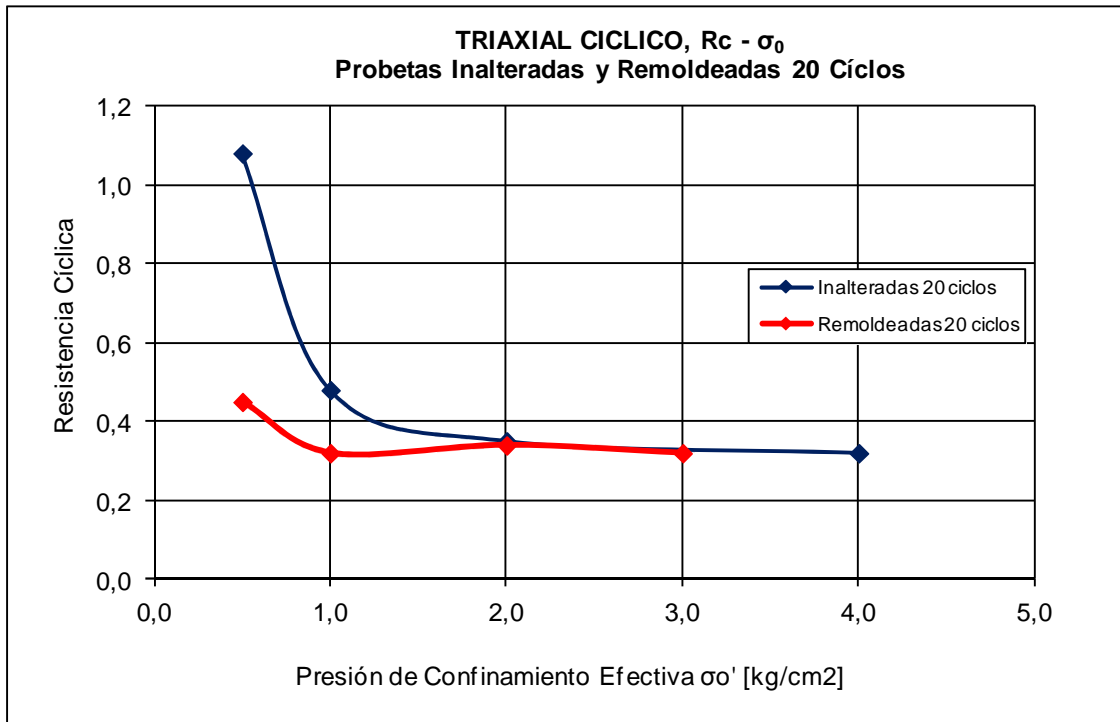


Figura Nº 82: Resistencia cíclica – presión de confinamientos para 20 ciclos probetas de trumao, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.

5.6. Triaxiales Cíclicos No Drenados Pre-Consolidados Isotrópicamente

Como forma de analizar el efecto de la preconsolidación en la respuesta cíclica del suelo, se realizaron ensayo triaxiales cíclicos no drenados, en probetas de trumao inalteradas y remoldeadas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura; aplicando una presión de preconsolidación isotrópica previo a cada ensayo. La metodología utilizada, consiste básicamente en la aplicación de presión de consolidación isotrópica a cada probeta ensayada, luego de la cual se descarga isotrópicamente a la presión de confinamiento de ensaye, y posteriormente se ejecuta el ensayo a la razón cíclica que corresponda. En el capítulo 3.3.2 se detalla el procedimiento utilizado, y se entregan los antecedentes correspondientes al montaje de cada probeta.

5.6.1. Probetas Inalteradas

A continuación se presentan las curvas resistencia cíclica versus número de ciclos, para las probetas de trumao inalteradas ensayadas. Los ensayos se realizaron a una presión de confinamiento de 1.0 kg/cm², posterior a la aplicación de la preconsolidación isotrópica, utilizando razones de preconsolidación de OCR=2 y OCR=4. En cuanto a los criterios de falla utilizados para la elaboración de las curvas, se considera el 100% de desarrollo de presión de poros y el 5% de deformación en doble amplitud.

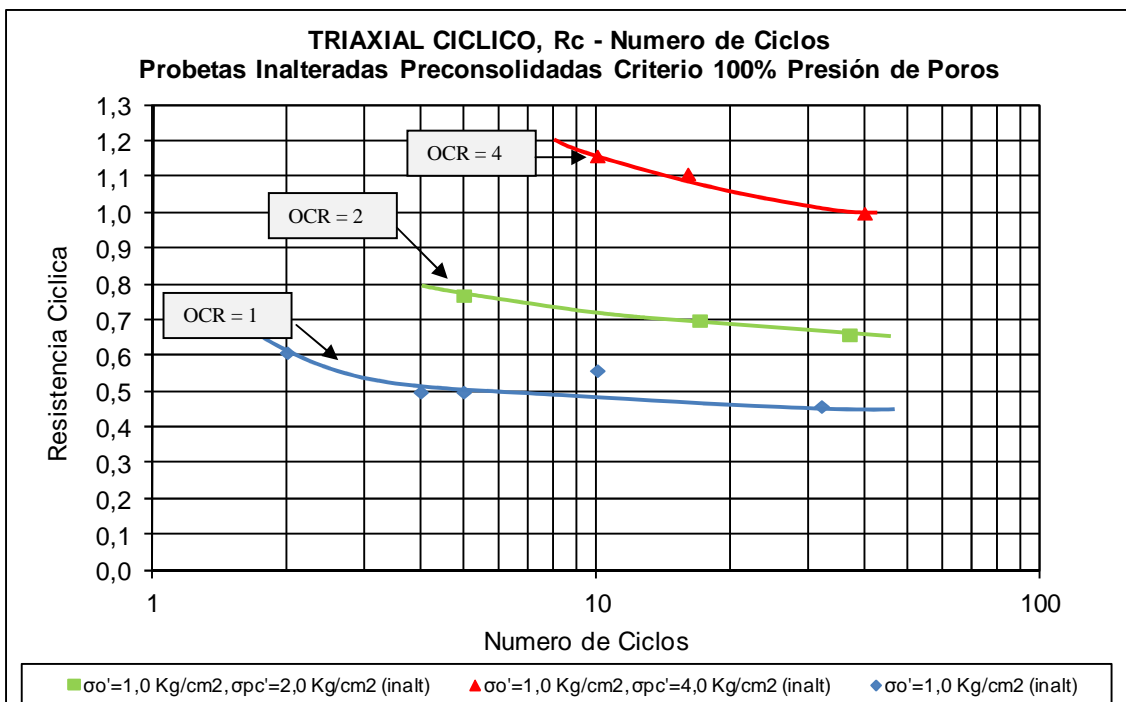


Figura Nº 83: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas con diferente OCR, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.

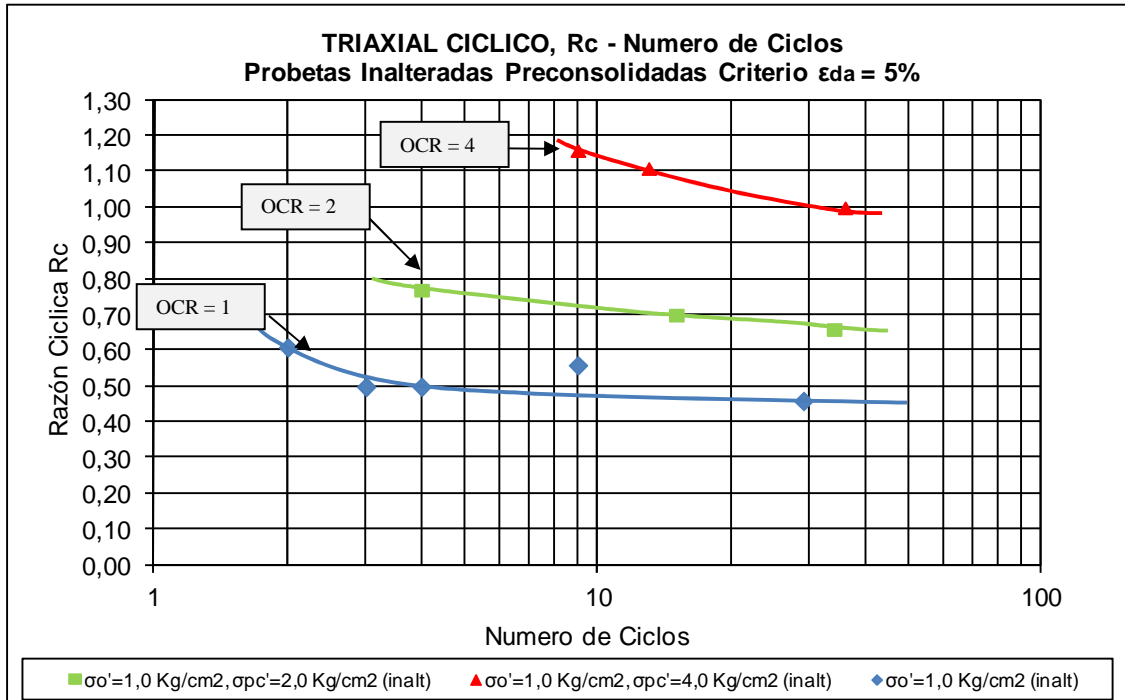


Figura Nº 84: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas con diferente OCR, criterio de falla: $\epsilon_{da}=5\%$.

Tal como se observa en las figuras 83 y 84, en probetas inalteradas existe una dependencia de la resistencia cíclica con la razón de preconsolidación con la cual se encuentra el suelo. Se desprende que el aumento de la razón de preconsolidación va acompañado del aumento de la razón cíclica.

En la figura 85 se presenta la variación de la resistencia cíclica en función de la razón de preconsolidación para 20 ciclos, considerando como criterio de falla el desarrollo del 100% de la presión de poros. En ella es posible observa un tendencia lineal en el aumento de la resistencia en función del OCR para las presiones de ensaye.

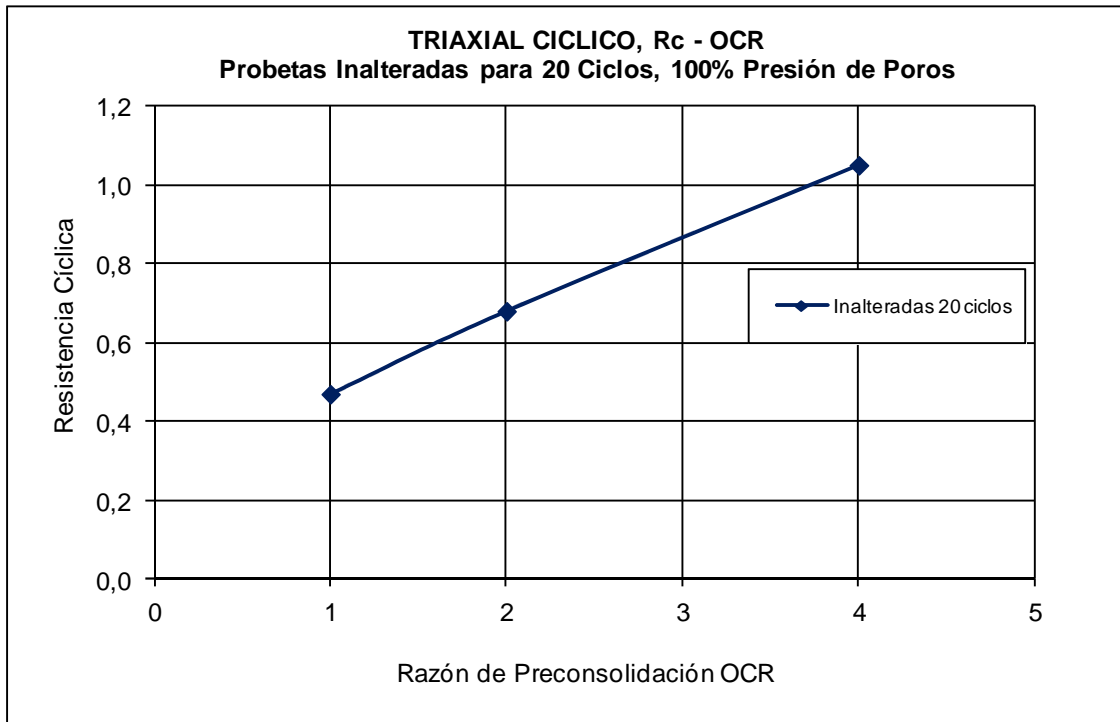


Figura Nº 85: Resistencia cíclica - OCR para 20 ciclos probetas de trumao inalteradas, criterio de falla: 100% presión de poros.

5.6.2. Probetas Remoldeadas

En probetas remoldeada, también se realizaron ensayos triaxiales cíclicos a una presión de confinamiento de 1.0 kg/cm^2 , posterior a la aplicación de una presión de preconsolidación isotrópica de 2.0 kg/cm^2 , esto es, con una razón de preconsolidación $\text{OCR}=2$. En cuanto a los criterios de falla utilizados para la elaboración de las curvas, se considera el 100% de desarrollo de presión de poros, el 5% y 10% de deformación en doble amplitud.

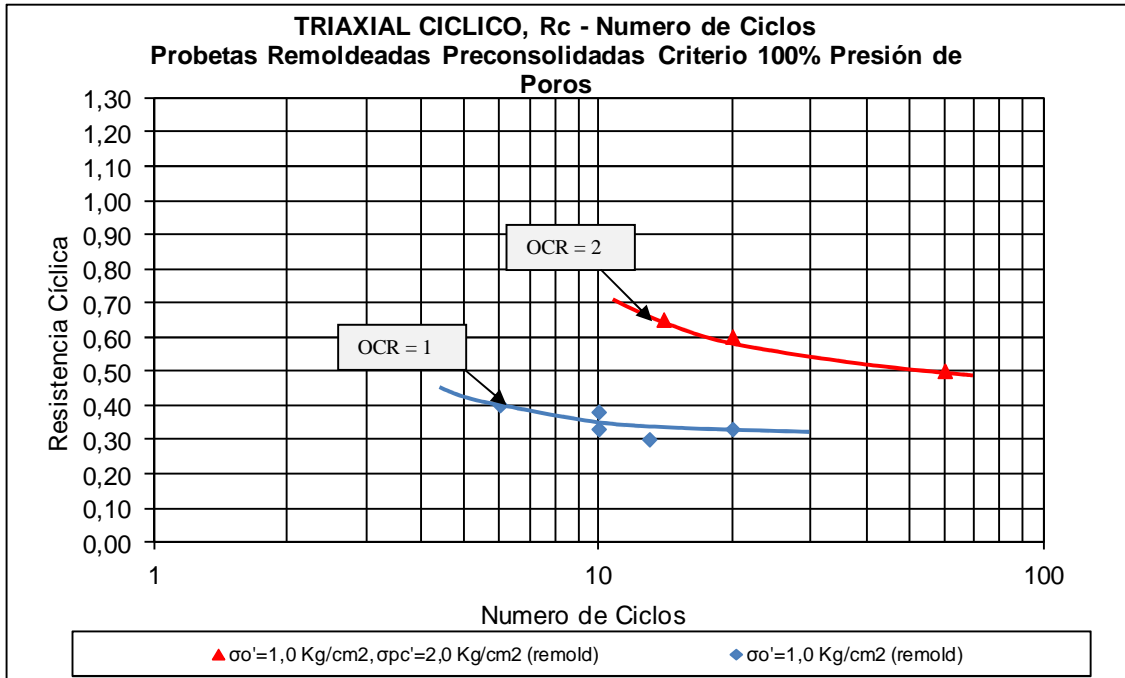


Figura Nº 86: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas con diferente OCR, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.

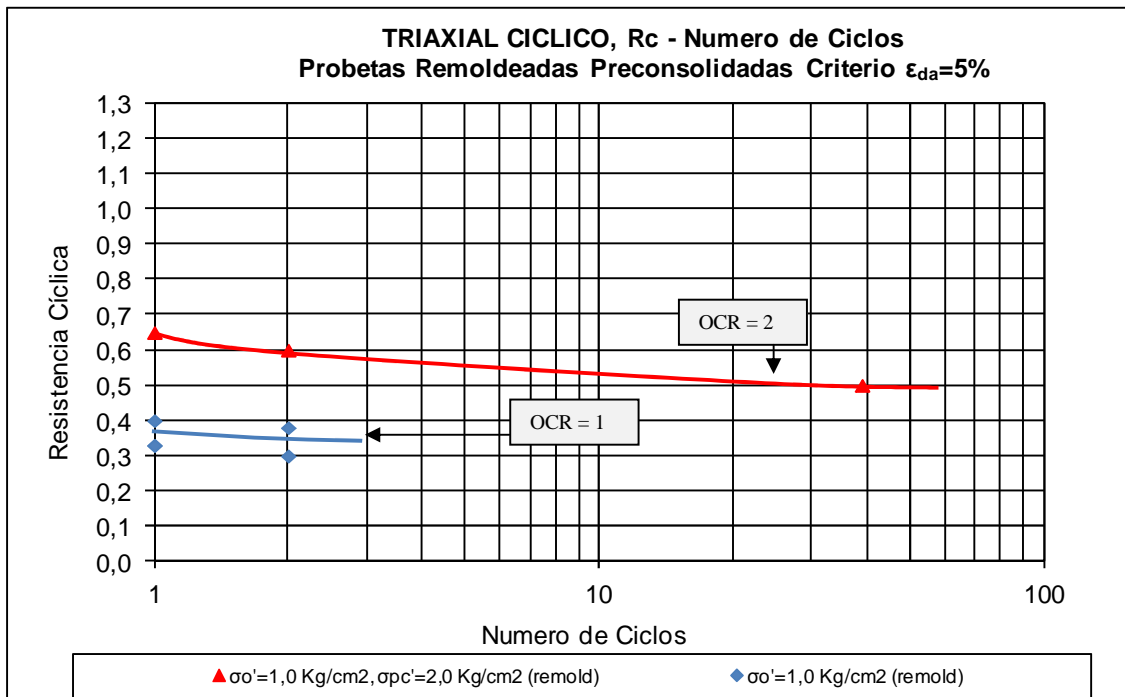


Figura Nº 87: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas con diferente OCR, criterio de falla: $\epsilon_{da}=5\%$.

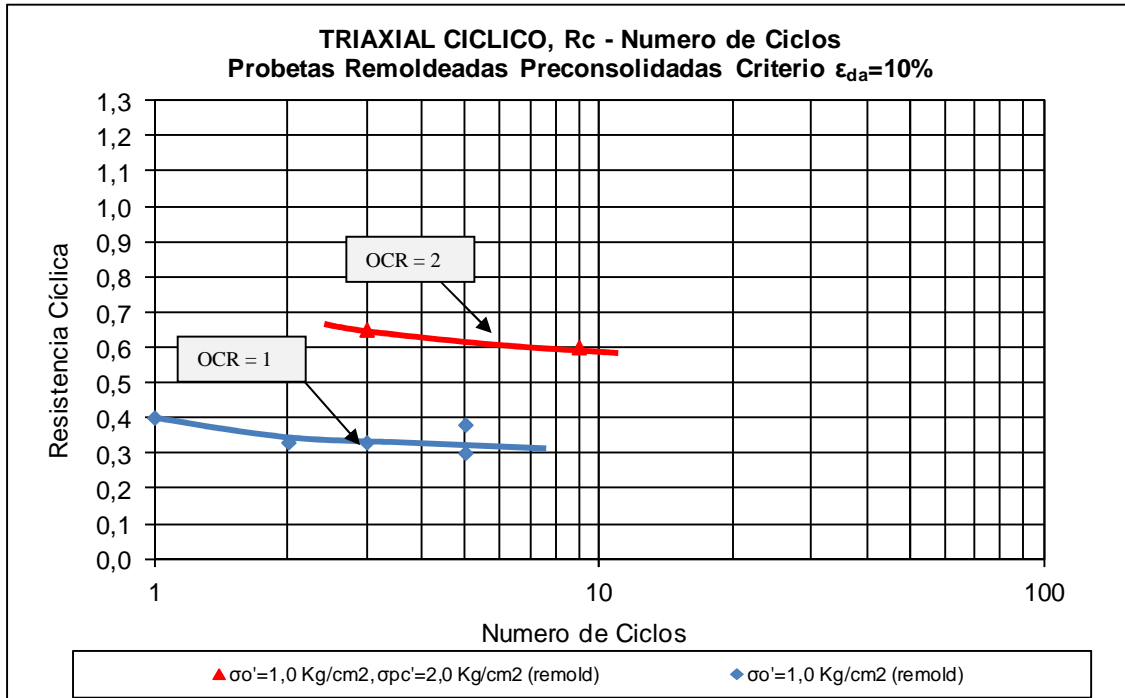


Figura Nº 88: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao remoldeadas con diferente OCR, criterio de falla: $\epsilon_{da}=10\%$.

De acuerdo a los resultados expuestos, al igual que en probetas inalteradas la resistencia cíclica se incrementa con el aumento de la razón de preconsolidación, demostrando una clara dependencia.

5.6.3. Resumen Probetas Inalteradas y Remoldeadas

En la figura 89 se presenta un gráfico resumen con los resultados de los ensayos realizados en probetas inalteradas y remoldeadas preconsolidadas ya señalados, considerando como criterio de falla para una mejor comparación, el desarrollo del 100% de presión de poros.

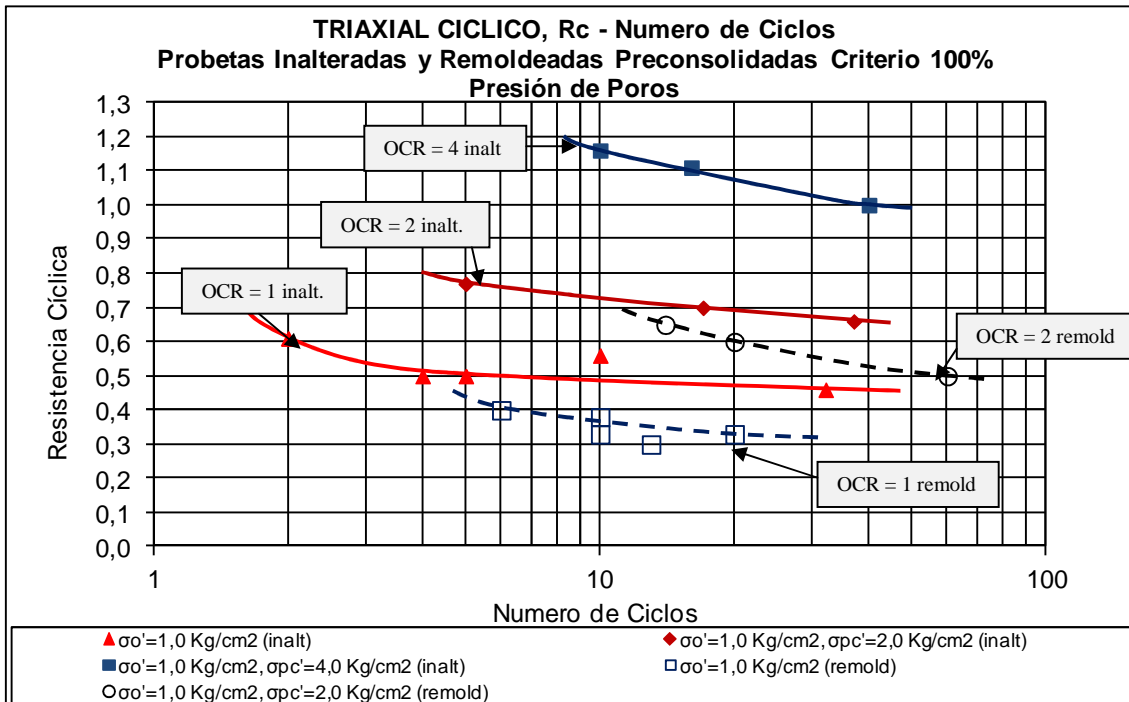


Figura N° 89: Resistencia cíclica - número de ciclos probetas de trumao inalteradas y remoldeadas con diferente OCR, criterio de falla: 100% presión de poros.

Es interesante mencionar que la diferencia o incremento en la resistencia cíclica entre las curvas OCR=1 y OCR=2, es similar en condiciones inalteradas y remoldeadas.

5.7. Resumen Triaxiales Cíclicos No Drenados con Medición de Presión de Poros

Los resultados de los triaxiales cíclicos realizados señalados anteriormente, se resumen en la figura 90. El criterio de falla utilizado corresponde al desarrollo de 100% de Presión de Poros.

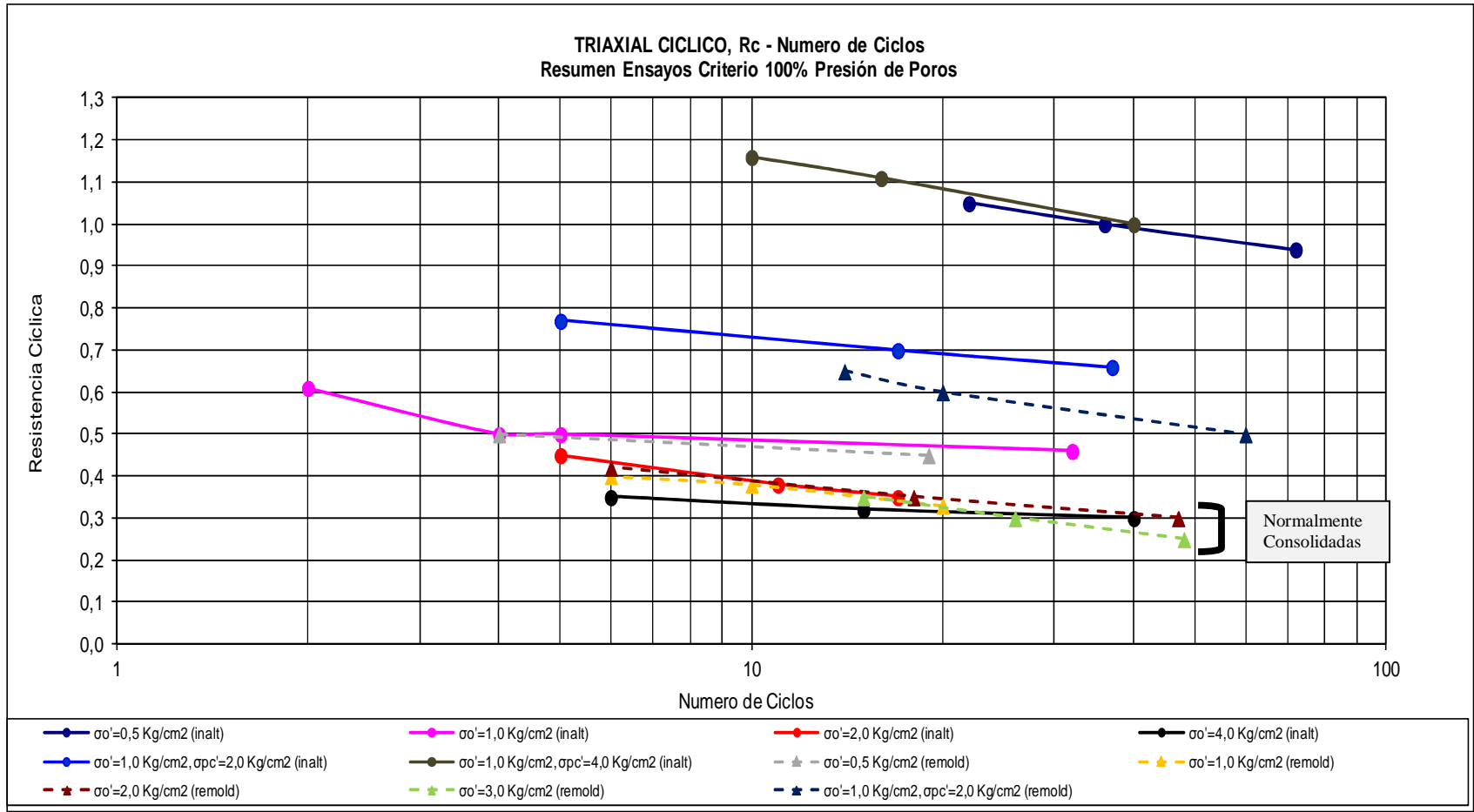


Figura Nº 90: Resistencia cíclica - número de ciclos resumen probetas de trumao, criterio de falla: desarrollo 100% presión de poros.

Considerando que la presión de preconsolidación isotrópica en probetas inalteradas se encuentra cercano a 1.0 kg/cm^2 (ver capítulos 4.3 y 5.4) y que en probetas remoldeadas existen indicios de preconsolidación a 0.5 kg/cm^2 (ver capítulo 4.3), es posible observar en la figura 90, que las curvas de presiones de confinamiento mayores a la presión de preconsolidación (probetas normalmente consolidadas), en ambos casos tienden a confundirse o estar juntas para la *escala utilizada*. Para presiones menores a la de preconsolidación, las curvas se distancian. Esto también fue ejemplificado en la figura 82.

Tal como fue mencionado anteriormente, la resistencia cíclica aumenta con el aumento del grado de preconsolidación en ambos tipos de probetas. Por otra parte, las probetas inalteradas ensayadas a un confinamiento bajo la presión de preconsolidación, desarrollan resistencia cíclica mayor que las probetas remoldeadas.

Por último, en condiciones remoldeadas, el suelo responde con deformaciones de mucha mayor magnitud que en condiciones inalteradas para el mismo nivel de carga, pero pueden generar mayor resistencia antes de llegar al 100% de presión de poros.

6. RESULTADOS SERIE DE ENSAYOS: POMEZ PLINIANAS

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados en muestras de Pómez Plinianas del Volcán Mocho-Choshuenco, los cuales fueron facilitados por la empresa Ingendesa S.A. para el desarrollo de este estudio (ver capítulo 3.1 y 3.3.3)

6.1. Clasificaciones y Curvas Granulométricas

Los resultados de los Límites de Atterberg y clasificación USCS, así también las curvas granulométricas del suelo estudiado, se presenta a continuación.

Tabla N° 29: Resultados ensayos de Clasificación Pómez Plinianas

Muestra	Cota [m]	Limite Liquido LL [%]	Limite Plástico LP [%]	Índice de Plasticidad IP [%]	Clasificación USCS
CPM-1	(2,80-3,10)	143	113	30	MH
CPM-1	(4,20-4,50)	-	-	NP	GM
CPM-3	(3,20-3,50)	-	-	NP	SM
CMLR-3B	(3,35-3,65)	-	-	NP	SM
CMLR-3B	(4,50-4,80)	-	-	NP	GM
CCE-5B	(4,50)	147	77	70	GM

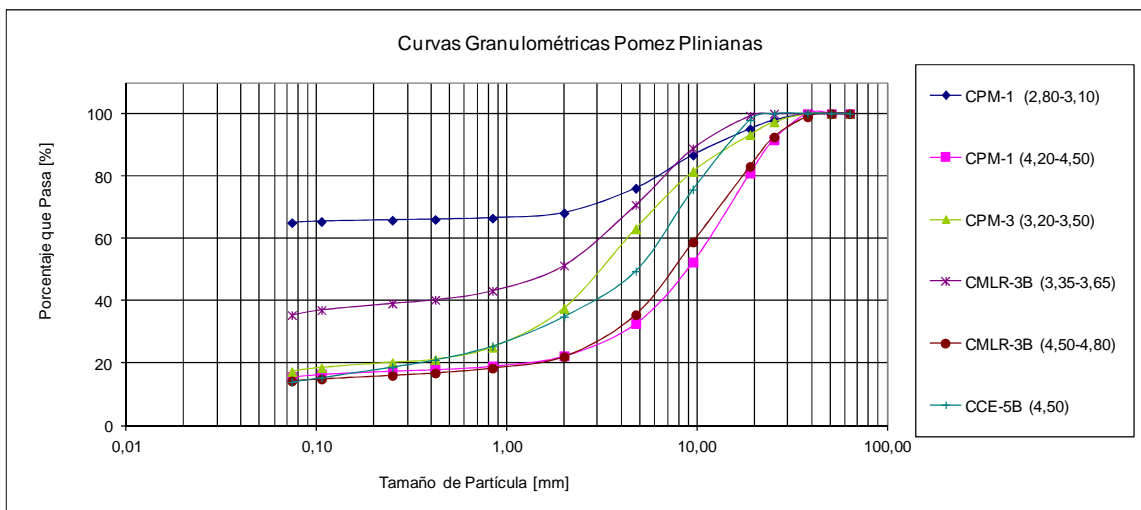


Figura N° 91: Curvas granulométricas muestras de pómez plinianas analizadas.

En la tabla 29 y figura 91, se desprende que el suelo correspondiente a la depositación de pómez plinianas en estudio posee una amplia variabilidad en su clasificación USCS y granulometría, correspondiendo a gravas limosas, arenas limosas y limos alta plasticidad.

La gran variabilidad de estos resultados estaría asociada a la diferencia de resistencia entre partículas, lo que produce una importante condición de borde en el ensayo de granulometría, que induciría el cambio de tamaño de partícula debido a la existencia de pómez altamente deleznable. A lo anterior, se suma el proceso natural de depositación, el que induce a la colocación de partículas más pesadas y de mayor diámetro en las partes más bajas de la capa de pómez, mientras que las más livianas en superficie.

Por lo tanto, de los ensayos realizados es posible concluir que dentro la composición mineralógica, las pómez poseen minerales arcillosos y que los altos valores de límite líquido y plástico, son un indicio de la alta capacidad de retener agua de su fracción fina.

6.2. Determinación de Humedad.

En la tabla 30 indica las humedades naturales que poseen las muestras analizadas.

Tabla N° 30: Humedad Natural

Muestra	Cota [m]	Humedad [%]
CCE-5B	(4,50)	157,71
CIF-15	(3,50)	271,54
CPM-1	(2,80-3,10)	138,51
CPM-1	(4,20-4,50)	165,43
CPM-3	(3,20-3,50)	167,12
CMLR-3B	(3,35-3,65)	181,61
CMLR-3B	(4,50-4,80)	152,98

Los resultados anteriores demuestran la gran capacidad que poseen estos suelos de retener agua, propiedad que se atribuye directamente a la alta porosidad que poseen las partículas que los componen. Esta característica es común en la mayoría de los suelos de origen volcánico, y particularmente es compartida con el suelo tipo trumao estudiado en capítulos anteriores.

6.3. Determinación de Densidad In situ.

En las calicatas o pozos de exploración se realizaron mediciones de la densidad natural húmeda del suelo mediante sonda de agua. Mientras que la densidad seca se obtiene utilizando la humedad determinada mediante secado de las muestras en horno a 60°C. La tabla 31, indica los resultados obtenidos.

Tabla Nº 31: Densidades In-situ húmeda y seca.

Muestra	Calicata	Cota [m]	Densidad Húmeda [t/m ³]	Humedad [%]	Densidad Seca [t/m ³]
CPM-1 DENSIDAD	CPM-1	(2,60 - 2,90)	0,96	82,0	0,52
CPM-1 DENSIDAD	CPM-1	(5,60 - 5,83)	0,90	139,1	0,38
CPM-3 DENSIDAD	CPM-3	(2,05 - 2,35)	1,18	109,2	0,56
CPM-3 DENSIDAD	CPM-3	(2,65 - 2,95)	1,15	90,8	0,60
CPM-3 DENSIDAD	CPM-3	(5,60 - 5,90)	0,85	137,5	0,36
CMLR-3B DENSIDAD	CMLR-3B	(5,00 - 5,31)	0,96	137,8	0,40
CMLR-3B DENSIDAD	CMLR-3B	(6,10 - 6,38)	1,17	147,6	0,47
CIF-15	CIF-15	(3,50)	1,19	271,5	0,32

De los resultados anteriores, se desprende que en estado natural el suelo se caracteriza por poseer baja densidad seca, inferior a 0,60 t/m³. La densidad húmeda de terreno es cercana, e incluso inferior en algunos casos, a la densidad del agua. La baja densidad seca es explicada por la alta porosidad que poseen las partículas constituyentes del suelo.

6.4. Ensayo Triaxial CIU

Los resultados de los ensayos triaxiales CIU realizados en probetas de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, son representados a través de los diagramas: “presión media p’-desviador q” (p’-q), “deformación unitaria ϵ – desviador q” (ϵ -q), y “deformación unitaria – variación de presión de poros Δu ” (ϵ - Δu); los cuales se presentan en las figuras 92, 93 y 94 respectivamente.

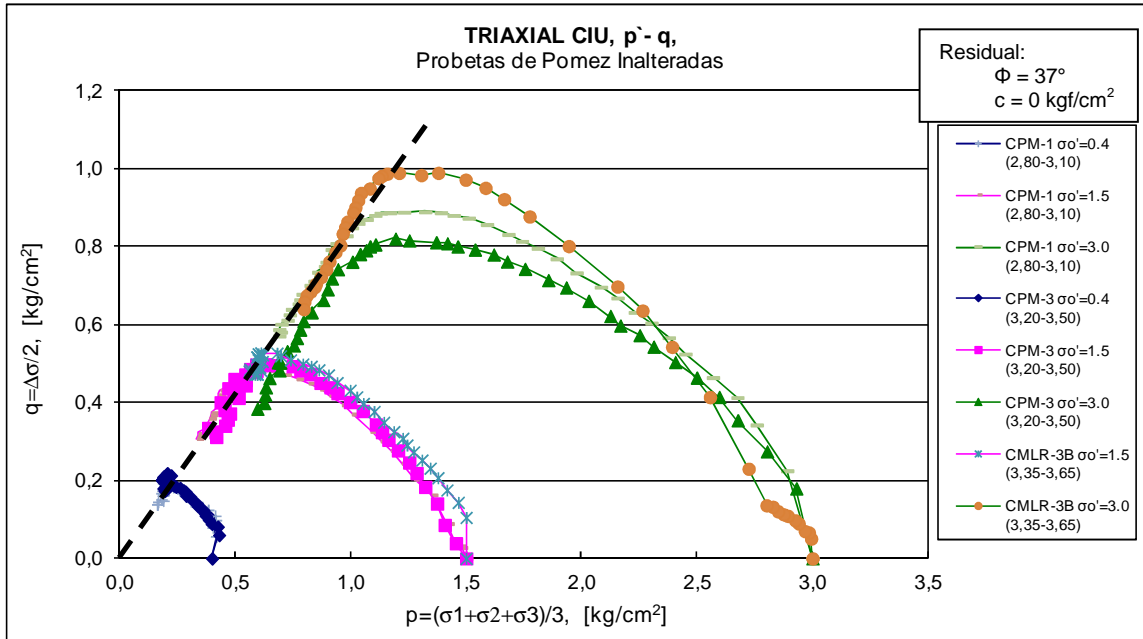


Figura Nº 92: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, probetas inalteradas pómez.

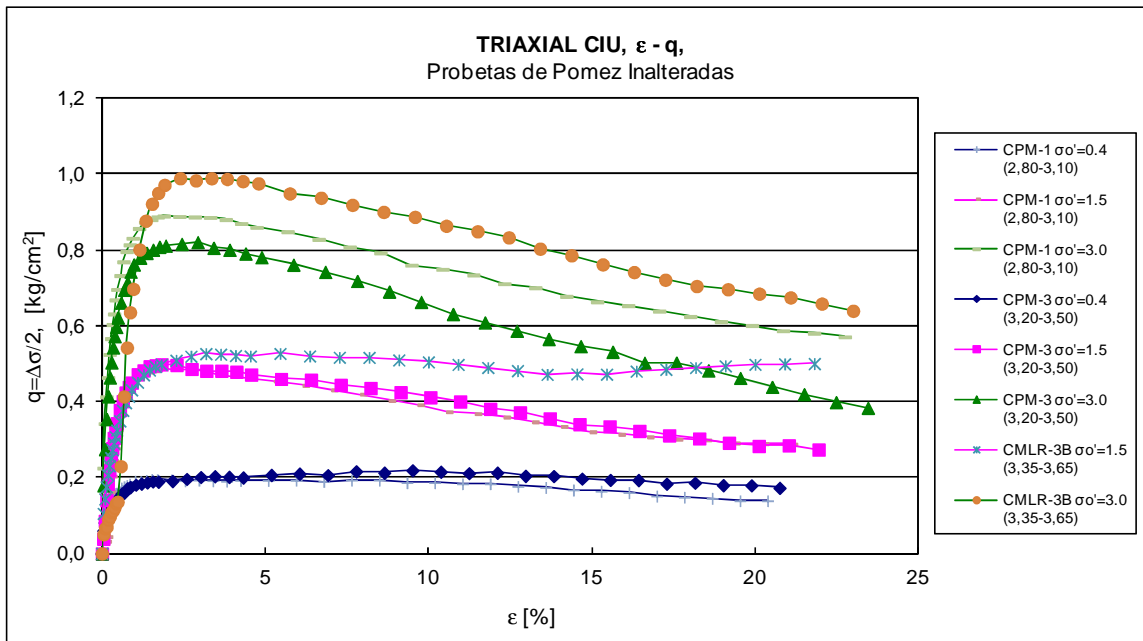


Figura Nº 93: Triaxial CIU esfuerzo desviador “q” versus deformación unitaria “ε”, probetas inalteradas pómez.

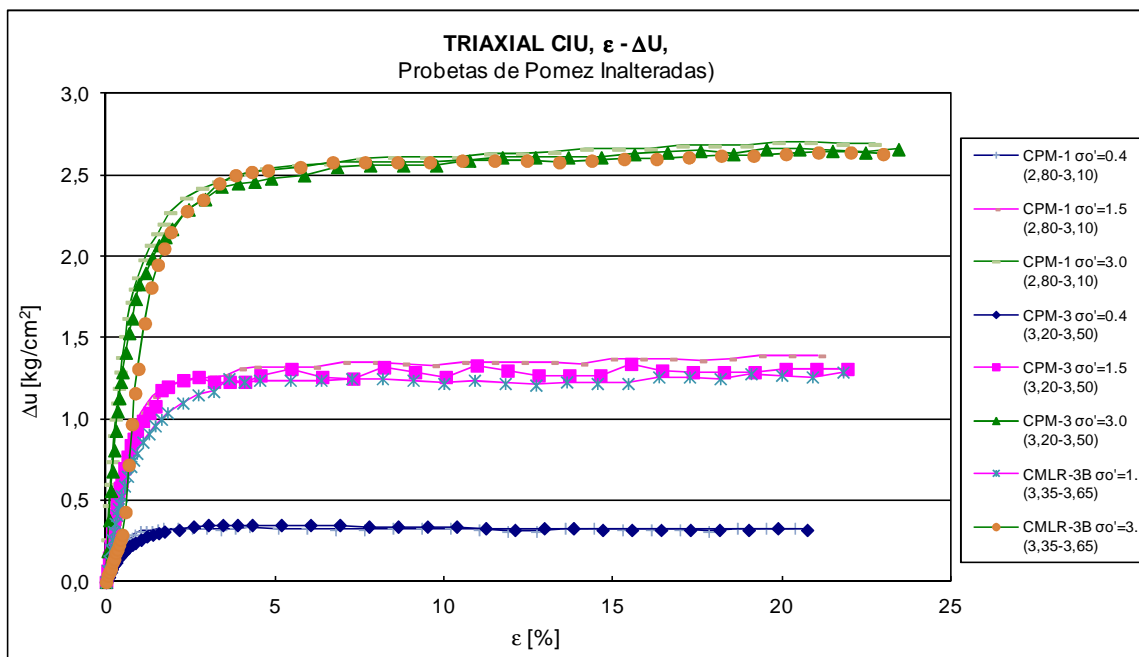


Figura N° 94: Triaxial CIU variación presión de poros Δu versus deformación unitaria “ ε ”, probetas inalteradas pómez.

En general, a pesar que las probetas ensayadas fueron obtenidas de distintos sectores, el comportamiento desarrollado por éstas es similar, confirmando el hecho que corresponden a la misma depositación.

En la figura 93 se observa que el suelo posee un esqueleto granular muy compresible, incluso no logrando estabilizar el esfuerzo desviador a grandes deformaciones (20% de deformación unitaria), en la mayoría de los casos. Adicionalmente, se desprende que las resistencias no drenadas últimas son considerablemente bajas, con una importante diferencia entre éstas con la resistencia peak.

En cuanto a los parámetros de resistencia al corte, del diagrama “p'-q” se desprende que la cohesión alcanzada por las probetas es nula o cercana a cero, mientras que el ángulo de resistencia al corte “ Φ ” es elevado, cercano a 47°.

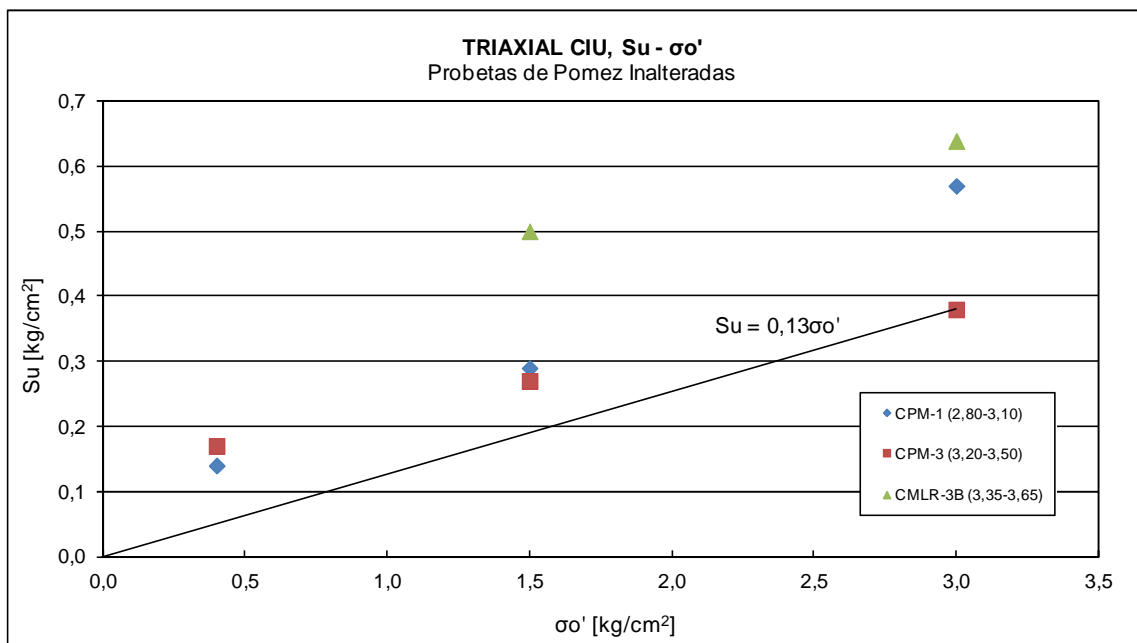


Figura Nº 95: Triaxial CIU resistencia última no drenada “Su” versus presión de confinamiento efectiva σ'_0 , pómez pliniana.

De los resultados se desprende un comportamiento principalmente contractivo, no observándose con claridad una presión de preconsolidación. No obstante, en la figura 95 se observa una variación de la resistencia última “Su” en función de la presión de confinamiento no esperada para un suelo normalmente consolidado, esto probablemente se deba a que no se desarrolla completamente la resistencia última.

6.5. Ensayo Triaxial CID

Los resultados de los ensayos triaxiales “CID” drenados al aire y parcialmente saturados, en probetas inalteradas de pómez de 15cm de diámetro y 30cm de altura, se presentan a continuación.

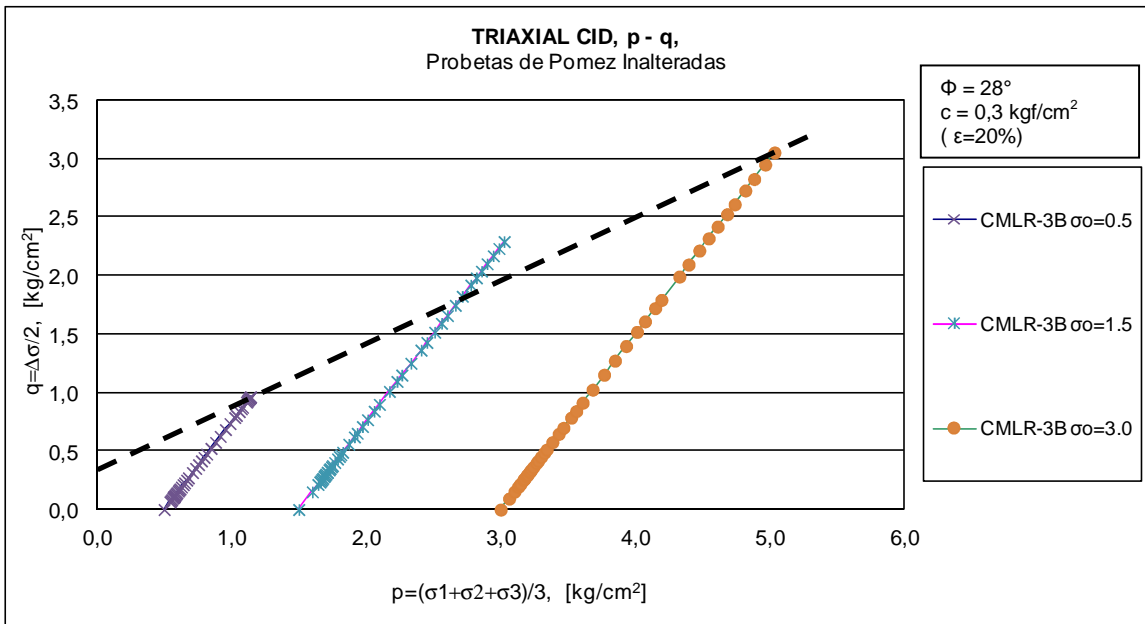
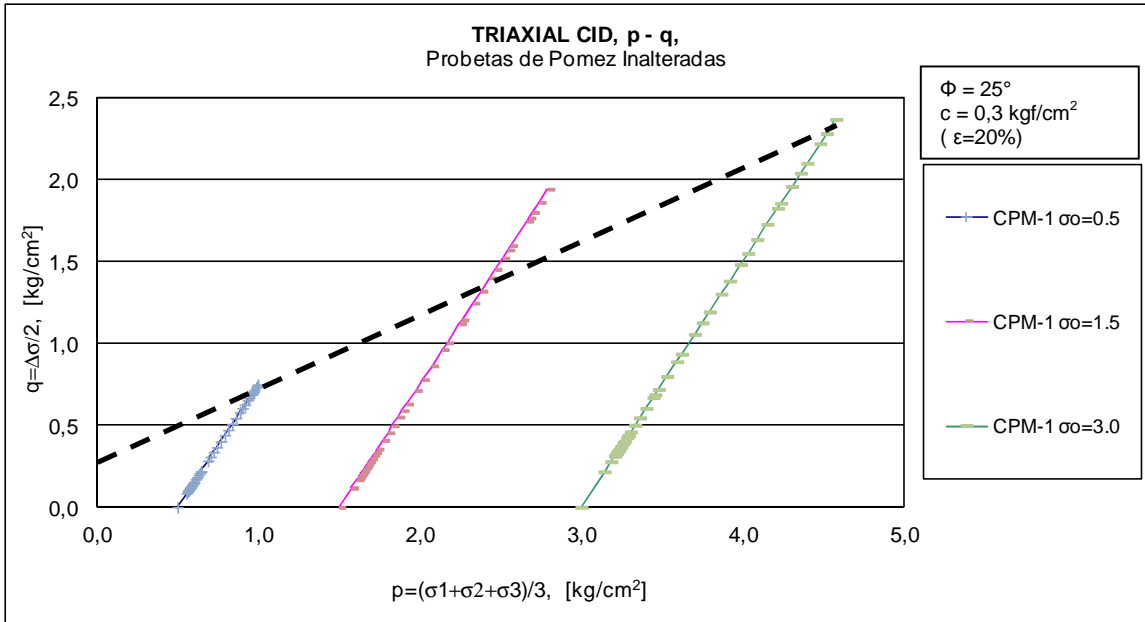


Figura Nº 96: Triaxial CID esfuerzo desviador “q” versus presión media “p”, probetas inalteradas pómez.

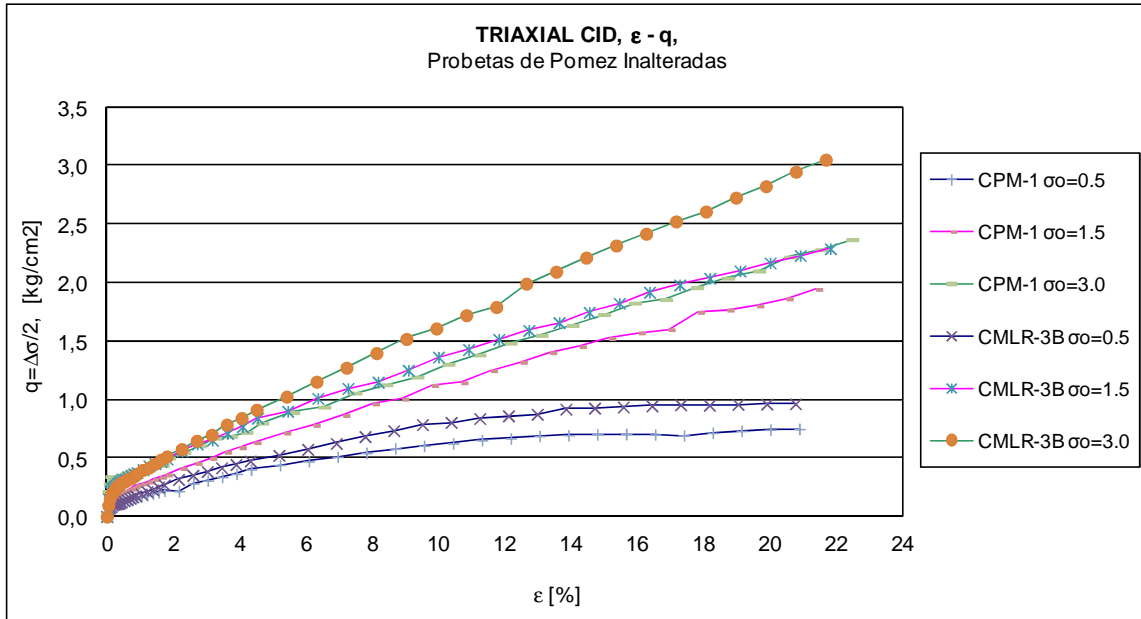


Figura N° 97: Triaxial CID esfuerzo desviador “q” versus deformación unitaria “ ϵ ”, probetas inalteradas pómez.

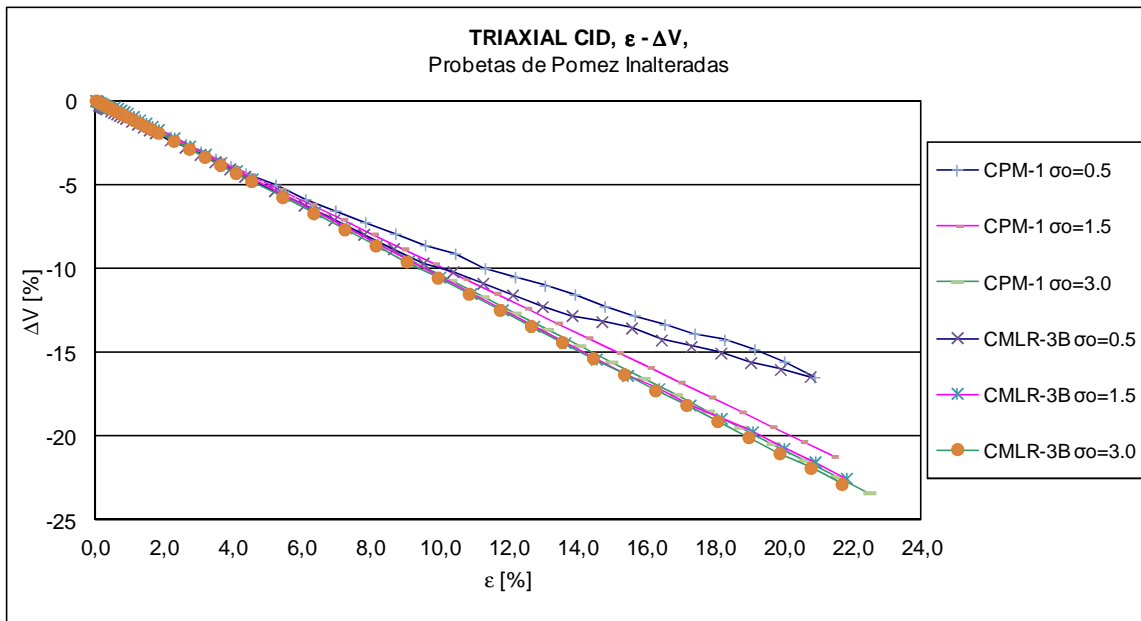


Figura N° 98: Triaxial CID variación volumétrica ΔV versus deformación unitaria “ ϵ ”, probetas inalteradas pómez.

De los resultados anteriores, y al igual que en los triaxiales CIU, se desprende que el suelo posee un esqueleto granular altamente compresible, generando grandes cambios volumétricos para las presiones de ensaye. Adicionalmente se aprecia la no estabilización del desviador de tensiones a la deformación máxima de ensaye (sobre 20%), por lo que no se evidencia una clara línea de estado último.

Debido a que no se alcanzó una condición residual, los parámetros de resistencia al corte se obtienen para una condición movilizada al 20% de deformación unitaria, resultando una cohesión $c \approx 0.3 \text{ kg/cm}^2$ y un ángulo de fricción interna entre 25° y 28° , es tos últimos considerablemente menor que los obtenidos para la condición no drenada. Es posible que la diferencia en los parámetros de resistencia al corte entre las dos condiciones ensayadas, se deba en gran parte a que no se alcanzó la condición última en los últimos resultados expuestos.

Es importante mencionar que para la obtención de los parámetros de resistencia al corte, se excluyeron los resultados para las probetas CPM-1 ensayada a una presión de confinamiento de 1.5 kg/cm^2 y CML3B ensayada a 1.5 kg/cm^2 por no corresponder a la tendencia de las otras probetas, esto probablemente se deba a la ejecución de un ensayo de consolidación isotrópica previo al ensayo en ellas, cuyos resultados no se encuentran disponibles.

6.6. Consolidación Odométrica

Los resultados del ensayo de consolidación odométrica efectuado sobre una probeta de pómez inalterada de dimensiones 19 cm de diámetro por 12 cm de altura, se presentan en las figuras 99 y 100. El ensayo fue realizado aplicando incrementos de cargas verticales hasta una tensión máxima vertical de $\sigma_v = 7.0 \text{ kg/cm}^2$.

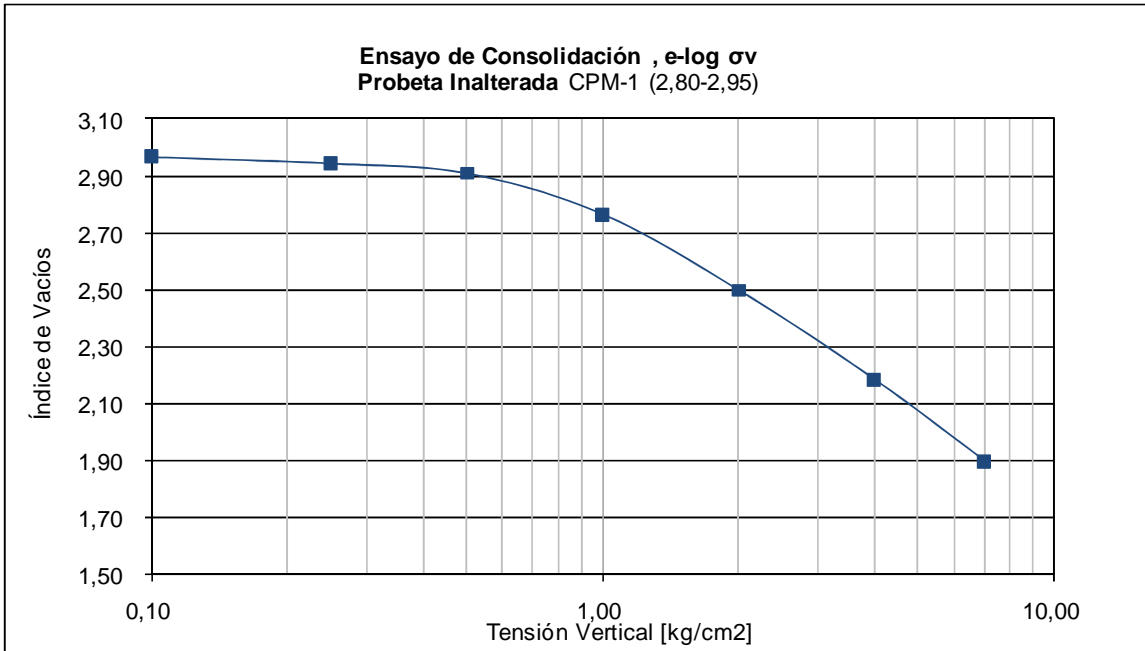


Figura Nº 99: Ensayo de consolidación muestra de pomez inalterada, diagrama e-log σ_v .

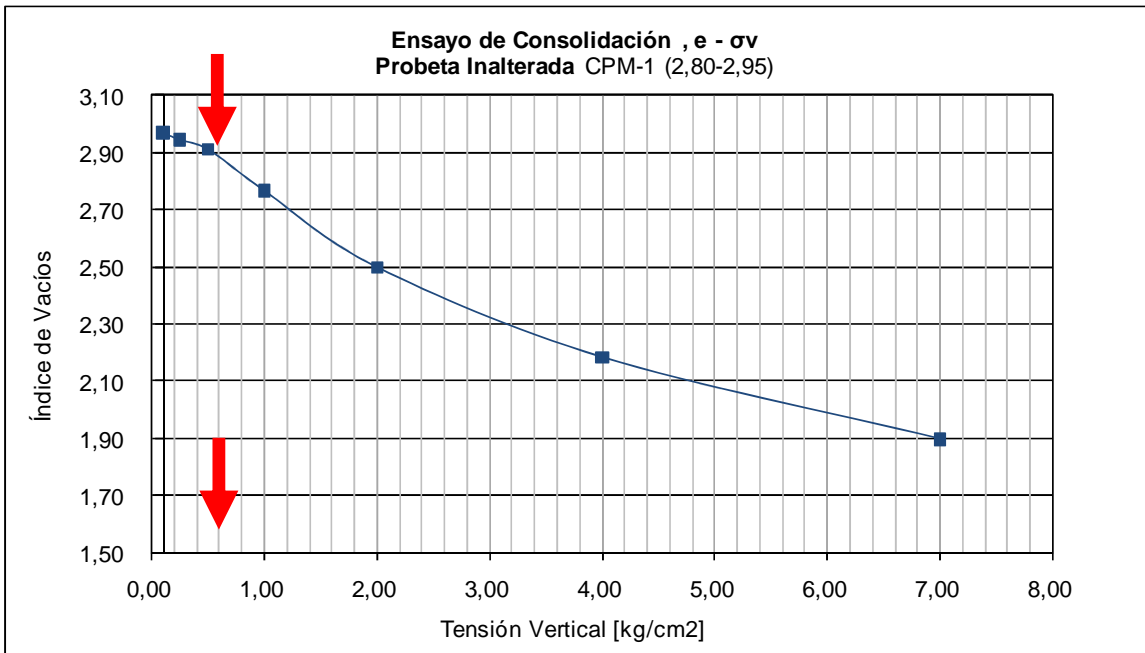


Figura Nº 100: Ensayo de consolidación muestra de pomez inalterada, diagrama e- σ_v , primeras cargas.

Del los resultados expuestos en las figuras 99 y 100 se desprenden los siguientes parámetros de consolidación para el suelo en estudio:

$\sigma_{pc}' = 0,6 \text{ kg/cm}^2$ Presión de Preconsolidación

$C_c = 1,17$ Índice de Compresibilidad en Carga Virgen

$C_r = 0,05$ Índice de Compresibilidad en Recarga

Ahora bien, la información anterior no concuerda con lo observado en los triaxiales (ver capítulo 6.4), ya que el comportamiento demostrado en ellos indica que el suelo a las presiones isotrópicas ensayadas se encuentra normalmente consolidado; mientras que la consolidación odométrica señalada anteriormente evidencia la existencia de una presión de preconsolidación. Es probable que esto se deba a la diferencia en la aplicación de la carga en los dos tipos de consolidaciones (isotrópica y odométrica), o que la aplicación de presión isotrópica en la etapa de consolidación en los ensayo triaxiales haya generado rotura de partículas, alterando la estructura interna del suelo y cambiando las propiedades del material.

Adicionalmente, es posible comparar la compresibilidad en recarga y en carga virgen de este suelo, considerando un índice de hueco inicial de $e_0=2,94$, tal como sigue.

$\frac{C_r}{1 + e_0} \approx 0,01$, para presiones verticales menores a la presión de preconsolidación.

$\frac{C_c}{1 + e_0} \approx 0,30$, para presiones verticales mayores a la presión de preconsolidación.

Quedando demostrado, la gran compresibilidad que pueden desarrollar estos suelos al superar la presión de preconsolidación.

6.7. Permeabilidad

Se realizaron ensayos de permeabilidad a carga constante en celda triaxial, utilizando probetas de pómez Plinianas inalteradas de 15cm de diámetro y 30cm de altura. En la tabla 32 se presentan los resultados de la permeabilidad "k" y la presión de confinamiento aplicada a la probeta al momento de realizado el ensaye.

Tabla N° 32: Resultados ensayos de Permeabilidad Pómez Plinianas

Nombre Muestra	Presión de Confinamiento ensaye σ_c' [kg/cm ²]	Permeabilidad k [cm/s]
CPM-1 (2.80-3.10)	0,25	3,00E-03
CPM-1 (2.80-3.10)	0,50	2,80E-03
CPM-1 (2.80-3.10)	1,00	2,70E-03
CPM-3 (3.20-3.50)	0,25	2,00E-03
CPM-3 (3.20-3.50)	0,50	2,90E-03
CPM-3 (3.20-3.50)	1,00	4,40E-03
CMLR-3B (3.35-3.65)	0,25	3,10E-03
CMLR-3B (3.35-3.65)	0,50	2,90E-03
CMLR-3B (3.35-3.65)	1,00	4,40E-03

Es importante mencionar que el equipo utilizado en la medición de la permeabilidad, posee en su calibración valores del orden de $k_{\text{equipo}} \approx 10^{-3}$ cm/s, similar a los valores resultantes de las probetas de pómez ensayadas señaladas en la tabla 32. Es por ello, que no es posible entregar en este caso, resultados certeros de la permeabilidad para el suelo estudiado. Ahora bien, es posible concluir que la permeabilidad de este suelo podría ser al menos o más de 10^{-3} cm/s.

6.8. Disolución Selectiva (contenido de alofán)

Se realizó un análisis químico para la determinación del contenido de alofán presente en dos muestras de pómez, utilizando dos procedimientos de secado en la preparación de dichas muestras: secado al aire y secado mediante horno a 105°C, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla N° 33: Disolución Selectiva, determinación del contenido de alofán.

Parámetro	Unidad	Muestra			
		Seco al Aire		Seco en Horno a 105°C	
		CPM-3 (4.00-4.30)	CMLR-3B (4.50-4.80)	CPM-3 (4.00-4.30)	CMLR-3B (4.50-4.80)
Aluminio Oxalato	%	2.94	2.93	4.86	5.01
Silicio Oxalato	%	2.38	2.47	3.95	4.22
Aluminio Pirofosfato	%	0.11	0.12	0.18	0.21
Contenido de Alofán	%	13.75	14.04	22.83	24.01

Como es posible observar en la tabla 33, las muestras de pómez plinianas contienen un importante porcentaje de alofán. Dicho porcentaje, incluso puede llegar a ser mayor que al de los otros suelos alofánicos señalados en este trabajo (ver acápite 2.6.3).

6.9. Fotografía Microscopio de Barrido de Electrones

En fotografías tomadas a partículas de pómez plinianas mediante microscópico de barrido de electrones (SEM), es posible observar la estructura porosa que poseen estas partículas (figura 101 a y b). Adicionalmente, se observa en figura 101 c y d, que están constituidas por un alto porcentaje de vidrio volcánico del tipo “plato” (ver capítulo 2.3 figura 6), el cual es generado por erupciones volcánicas de alta explosividad. Por otra parte, partículas de arcilla se observan adheridas a la superficie del vidrio volcánico, que de acuerdo a lo señalado en el capítulo anterior, es probable que corresponda a arcilla alofánica.

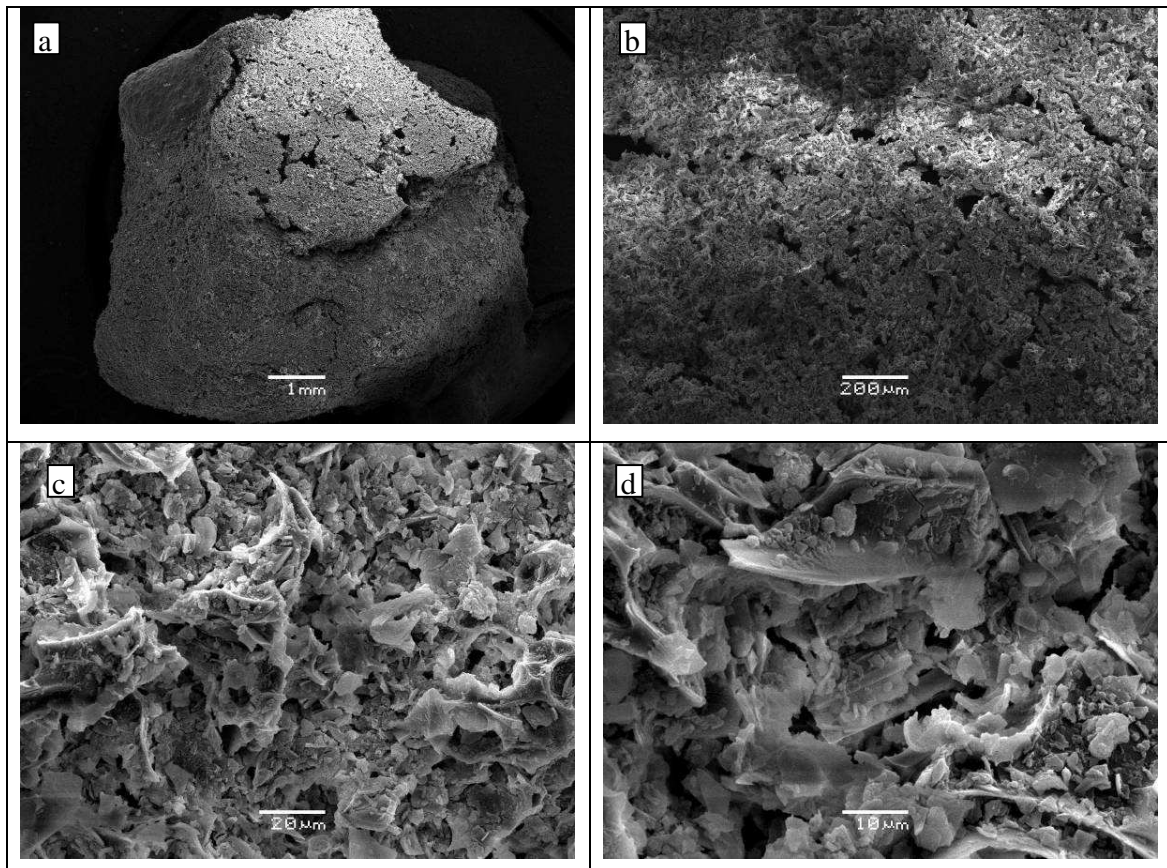


Figura N° 101: Fotografías pómez plinianas mediante microscópico de barrido de electrones.

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Basado en los antecedentes y resultados de ensayos de laboratorio expuestos en los capítulos anteriores, es posible señalar lo siguiente:

Trumao de Chillán, Serie de Ensayos 1:

- De acuerdo al estudio realizado por Paredes (2005), este suelo posee una fracción fina (partículas con diámetro menor a 0,075mm) mayor al 90%, un índice de plasticidad superior a 55 ($IP > 55$) y límite líquido mayor a 100 ($LL > 100$). De acuerdo a dichos parámetros se obtiene como clasificación **MH** de acuerdo a USCS.
- El peso específico de los sólidos G_s obtenido para este suelo es de 2.71. Para su determinación se utilizó una muestra a humedad natural, sin ser sometida a secamiento previo, de tal forma de obtener un valor más representativo. Es importante considerar, que las propiedades de estos suelos son modificadas si son sometidos a procesos de secamiento que apliquen temperatura.
- Del ensayo de consolidación odométrica efectuado en probeta inalterada, se desprende la existencia de una presión de preconsolidación cercana a 1.8 kg/cm^2 , la cual no estaría relacionada a un fenómeno de precarga geológica, sino a una estructura de origen químico. Esta preconsolidación puede ser observada con mayor claridad en los gráficos con escala lineal que en los de escala logarítmica.

De este ensayo, se obtienen un índice de compresibilidad en carga virgen $C_c=1.55$ y en recarga $C_r=0,08$.

- Del ensayo de consolidación odométrica realizado en probeta remoldeada se comprueba un comportamiento normalmente consolidado, no registrándose una presión de preconsolidación.

De este ensayo se obtiene un índice de compresibilidad $C_c=0,7$, valor considerablemente menor que el obtenido para probetas inalteradas.

Adicionalmente, se observó que la curva “e-log σ_v ” para probetas remoldeadas no posee como frontera a la misma desarrollada por muestras inalteradas, como se observa en otros suelos, si no que pueden desarrollar un comportamiento más rígido que probetas inalteradas para presiones mayores a la de preconsolidación.

- De ensayos triaxiales CIU realizados en probetas inalteradas, se desprende que existe una presión de preconsolidación isotrópica entre 1.0 kg/cm² y 2.0 kg/cm², la cual queda demostrada por la diferenciación de comportamientos dilatante y contractivo desarrollado por las probetas, y por la variación lineal de la resistencia no drenada en función del confinamiento para presiones mayores a las antes mencionadas

Los parámetros de resistencia al corte drenados obtenidos a través de estos ensayos se presentan a continuación.

Estado Normalmente Consolidado:

Ángulo de fricción interna, $\Phi \approx 39^\circ$

Cohesión, $c \approx 0 \text{ kg/cm}^2$

Estado Preconsolidado:

Ángulo de fricción interna, $\Phi \approx 37^\circ$

Cohesión, $c \approx 0,2 \text{ kg/cm}^2$

Por otra parte, la resistencia no drenada queda establecida como:

Ángulo de fricción interna, $\Phi = 0^\circ$

Resistencia no drenada,

$$S_u = 0,06\sigma_0' + 0,5, \quad \text{para } \sigma_0' < 2,0 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_u = 0,27\sigma_0', \quad \text{para } \sigma_0' \geq 2,0 \text{ kg/cm}^2$$

En donde:

σ_0' : presión de cámara efectiva

- De ensayos triaxiales CIU realizados en probetas remoldeadas, se determinó que el comportamiento desarrollado por las probetas es contractivo seguido de dilatancia, el cual se desarrolla luego de un estado transiente de cambio de fase (Phase Transformation).

Se observan indicios de preconsolidación a la presión de confinamiento de 0.5 kg/cm² debido a la existencia de un ángulo de fricción movilizado peak y residual. Ahora bien, esto podría ser consecuencia de la densidad seleccionada para el ensayo, la cual replica la de muestras inalteradas.

Para condición drenada, el ángulo de fricción interna alcanzado por probetas remoldeadas es aproximadamente $\Phi \approx 35$; dicho valor es menor al desarrollado en condiciones inalteradas. Por otra parte, la cohesión residual es nula.

En condición no drenada, se obtiene:

$$S_u = 0,42 \sigma_0'$$

En donde:

σ_0' : presión de cámara efectiva

- Los resultados de los triaxiales CIU realizados demostraron que la razón entre las resistencias no drenadas alcanzadas por probetas remoldeadas e inalteradas, varía en función de la presión isotrópica de ensaye y depende de la presión de preconsolidación isotrópica natural del suelo. Bajo la presión de preconsolidación el suelo inalterado presenta mayor resistencia, mientras que sobre la presión de preconsolidación esta situación se invierte.

Trumao de Chillán, Serie de Ensayos 2:

- Del análisis granulométrico utilizando material a humedad natural, se desprende que este suelo posee una fracción fina superior al 90% (partículas con diámetro menor a 0,075mm).

Mediante un análisis hidrométrico, se observa el porcentaje de partículas pertenecientes a la fracción arcilla (tamaño $<2\mu$) es mayor a 25%. No obstante, este ensayo no entregaría un resultado representativo debido a la condición de borde generada por el antifloculante, el cual no separaría la totalidad de las partículas aglomeradas y debido al secamiento en horno al que fue sometida la muestra de suelo en su preparación.

- Los límites de Atterberg obtenidos se caracterizan por poseer un alto límite líquido ($LL>95$) y un índice de plasticidad cercano a 25. Con este resultado y en conjunto con el análisis granulométrico, se desprende que la clasificación USCS del suelo es **MH**. Esta clasificación es característica de suelos alofánicos derivados de cenizas volcánicas.
- Los resultados de los ensayos de peso unitario realizados indican una baja densidad seca para el suelo en estudio, alrededor de $0,75\text{ton/m}^3$, con humedades naturales mayores al 70%. Este resultado está relacionado con la alta capacidad de estos suelos de retener agua en el interior de sus partículas y entre ellas.
- Del ensayo de consolidación odométrica efectuado en probeta inalterada, se desprende la existencia de una presión de preconsolidación cercana a 1.8 kg/cm^2 , la cual no estaría relacionada a un fenómeno de precarga geológica, sino a una estructura de origen químico. Esta preconsolidación puede ser observada con mayor claridad en los gráficos con escala lineal que en los de escala logarítmica.

De este ensayo, se obtienen un índice de compresibilidad en carga virgen $C_c=1.28$ y en recarga $C_r=0,08$.

- Del ensayo de consolidación odométrica realizado en probeta remoldeada se comprueba un comportamiento normalmente consolidado, no registrándose una presión de preconsolidación.

De este ensayo se obtiene un índice de compresibilidad $C_c=0,45$, valor considerablemente menor que el obtenido para probetas inalteradas.

- De los ensayos de consolidación odométrica realizados en probetas inalteradas y remoldeadas, se obtuvo que la compresibilidad o deformabilidad es mayor en estado remoldeado para presiones inferiores a la de preconsolidación. Sobre la presión de preconsolidación, la compresibilidad de probetas remoldeadas es menor que las inalteradas, tal como se observa a continuación:

Presiones Normales menores a $\sigma_v = 1,8\text{kg/cm}^2$

$$\frac{C_r}{1 + e_0} \approx 0,02, \text{ para probetas inalteradas.}$$

$$\frac{C_c}{1 + e_0} \approx 0,11, \text{ para probetas remoldeadas.}$$

Presiones Normales mayores a $\sigma_v = 1,8\text{kg/cm}^2$

$$\frac{C_c}{1 + e_0} \approx 0,32, \text{ para probetas inalteradas.}$$

$$\frac{C_c}{1 + e_0} \approx 0,11, \text{ para probetas remoldeadas.}$$

Nota: utilizando un índice de huecos $e_0=2,94$.

- Del ensayo de compresión no confinada realizado utilizando probetas inalterada y remoldeada se desprende una sensibilidad de 42, demostrando la gran influencia del remoldeo en la resistencia en estos tipos de suelos.
- De ensayos triaxiales CIU realizados en probetas inalteradas, se desprende la existencia de una presión de preconsolidación isotrópica entre 1.0 kg/cm^2 y 1.5 kg/cm^2 , la cual queda demostrada por la diferenciación de comportamientos dilatante y contractivo observado.

Los parámetros de resistencia al corte drenados obtenidos de estos ensayos son:

Ángulo de fricción interna, $\Phi \approx 37^\circ$

Cohesión, $c \approx 0 \text{ kg/cm}^2$

- Resultados de ensayos triaxiales cíclicos no drenados en probetas inalteradas indican que el desarrollo del 100% de presión de poros ocurre cercano al 5% de deformación axial en doble amplitud, mientras que en probetas remoldeadas este fenómeno se sitúa a una deformación en doble amplitud mayor al 10%. En general, se demuestra que la deformación unitaria necesaria para el desarrollo de 100% de presión de poros en probetas remoldeadas es considerablemente más alta que en condiciones inalteradas, incluso a bajo número de ciclos en posible que se generen deformaciones importantes.
- En muestras inalteradas de trumao, la resistencia cíclica disminuye con el aumento de la presión de confinamiento, exhibiendo el mismo comportamiento observado en arenas. Adicionalmente, se observa que la variación del factor de corrección K_σ en función de la presión de confinamiento en este tipo de probetas, se aproxima al descrito por Seed and Harder (1990) para arenas naturales. Por otra parte, se desprende que la resistencia cíclica depende de la presión de preconsolidación del suelo. Probetas ensayadas a presiones de confinamiento menores a la presión de preconsolidación desarrollan resistencias cíclicas elevadas, mientras que si se supera dicha presión (probetas normalmente consolidadas) la resistencia cíclica disminuye significativamente.

- Los resultados de triaxiales cíclicos no drenados realizados en probetas remoldeadas, indican que para presiones de confinamiento mayores a $0,5 \text{ kg/cm}^2$, las curvas resistencia cíclica versus número de ciclos tienden a confundirse en una sola. Mientras que la curva correspondiente a $0,5 \text{ kg/cm}^2$ no sigue dicha tendencia. Esto posiblemente tenga relación con el fenómeno de preconsolidación observado en triaxiales CIU con probetas remoldeadas, y esté asociado a la densidad de preparación adoptada.

La variación del parámetro $K\sigma$ en función de la presión de confinamiento, escapa a la tendencia descrita por Seed and Harder (1990) para arenas naturales. Observándose un comportamiento distinto que para probetas inalteradas.

- La resistencia cíclica para probetas inalteradas y remoldeadas posee un rango de valores similar, con excepción de probetas ensayadas a presiones menores a la de preconsolidación, las cuales presentan resistencias mayores. Por lo tanto, es posible mencionar que no existe diferencia significativa entre ambos tipos de probetas para presiones mayores a la de preconsolidación del suelo. En otras palabras, la resistencia cíclica en probetas remoldeadas no caería drásticamente con respecto a las inalteradas a presiones mayores a la de preconsolidación (ver figura 82).
- Los resultados de ensayos triaxiales cíclicos no drenados preconsolidados isotrópicamente, obtenidos para ambos tipos de probetas, indican que la resistencia cíclica se incrementa con el aumento de la razón de preconsolidación.
- Los resultados de ensayos triaxiales cíclicos indican que, en condiciones remoldeadas, el suelo responde con deformaciones de mayor magnitud que en condiciones inalteradas para el mismo nivel de carga.

Pómez Plinianas del Sector Neltume:

- De los ensayos de granulometría, límites de Atterberg y clasificación USCS, realizados sobre muestras extraídas de la misma depositación de pómez plinianas originada por el grupo volcánico Mocho-Choshuenco, se desprende que los materiales constituyentes del depósito van desde gravas limosas a limos de alta plasticidad. La variabilidad de estos resultados estaría asociado a la diferencia de resistencia o disgregabilidad de las partículas, lo que produce una importante condición de borde en el ensayo de granulometría, induciendo el cambio de tamaño de partícula. A lo anterior se suma el proceso natural de depositación, el que induce la colocación de partículas más pesadas y de mayor diámetro en las partes más bajas de la capa de pómez, mientras que las más livianas en superficie.

Al poseer finos de alta plasticidad, es posible concluir que dentro la composición mineralógica, las pómez poseen minerales arcillosos. Por otra parte, los altos valores de límite líquido y plástico son un indicio de la alta capacidad de retener agua que poseen estos suelos.

- Las humedades naturales medidas en el suelo estudiado van desde 130% a 180%, demostrando la gran capacidad de retener agua.
- De los ensayos de peso unitario realizados, se desprenden valores de densidad seca menores a $0,6 \text{ ton/m}^3$.
- De ensayos triaxiales CIU realizados en probetas inalteradas de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, a presiones de confinamiento de entre $0,4 \text{ kg/cm}^2$ y $3,0 \text{ kg/cm}^2$, se desprende que el suelo desarrolla un comportamiento netamente contractivo. Las resistencias no drenadas últimas son considerablemente bajas, con una importante diferencia entre éstas y la resistencia peak.

Adicionalmente, se observa que el suelo posee un esqueleto granular muy compresible, incluso no logrando estabilizar el esfuerzo desviador a grandes deformaciones (20% de deformación unitaria) en la mayoría de los casos. Dicha compresibilidad estaría relacionada con rotura de partículas.

En cuanto a los parámetros de resistencia al corte drenados, se obtienen los siguientes valores:

Ángulo de fricción interna, $\Phi \approx 37^\circ$

Cohesión, $c \approx 0 \text{ kg/cm}^2$

Ahora bien, a pesar que se observa un comportamiento netamente contractivo, la variación de la resistencia no drenada S_u en función de la presión de confinamiento no es común para comportamiento normalmente consolidado, esto probablemente se deba a que no se desarrolla completamente la resistencia última a la deformación unitaria máxima estudiada.

La resistencia no drenada queda establecida conservadoramente como:

Ángulo de fricción interna, $\Phi = 0^\circ$

Resistencia no drenada,

$$S_u = 0,13\sigma_0'$$

En donde:

σ_0' : presión de cámara efectiva

- En los ensayos triaxiales CID realizados en probetas inalteradas parcialmente saturadas de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, se observó la gran compresibilidad del esqueleto granular de estos suelos, expresado en la alta variación volumétrica sufrida y a la no estabilización del desviador de tensiones a la deformación unitaria máxima de ensaye ($\epsilon=22\%$), no alcanzando un línea de estado último.

Los parámetros de resistencia al corte obtenidos para una deformación unitaria movilizada a $\epsilon=20\%$, son los siguientes:

Ángulo de fricción interna, $\Phi \approx 25^\circ$ a 28°

Cohesión, $c \approx 0.3 \text{ kg/cm}^2$

- De los ensayos de consolidación odométrica realizados, en probetas inalteradas de 19cm de diámetro por 12cm de alto, se desprende la existencia de una presión de preconsolidación situada alrededor de $0,6 \text{ kg/cm}^2$, observada con mayor claridad en gráfico con escala logarítmica. Dicha presión no pudo ser observada en los ensayos triaxiales realizados.

Adicionalmente, se obtiene un índice de compresibilidad en carga virgen $C_c=1.17$, mientras que en recarga $C_r=0,05$.

- Mediante ensayos de disolución selectiva se determinó que el porcentaje de alofán presente en estos suelos puede llegar a ser mayor al 20%, siendo incluso más alto que el determinado en los trumaos estudiados en este trabajo.
- Resultados de ensayos de permeabilidad a carga constante realizados en celda triaxial, utilizando presiones de confinamiento entre $0,25\text{kg/cm}^2$ a $1,0\text{kg/cm}^2$, indican que la permeabilidad de éste suelo es de al menos o mayor que $k \approx 10^{-3} \text{ cm/s}$.
- En fotografías obtenidas mediante un Microscopio de Barrido de Electrones (SEM), se observó que estos suelos poseen una estructura altamente porosa y que la morfología del vidrio volcánico corresponde al tipo "plato", característico de erupciones de alta explosividad. Adicionalmente, se pueden apreciar partículas de arcilla adheridas a la superficie del vidrio volcánico, que de acuerdo a lo señalado anteriormente, puedan corresponder a arcilla alofánica.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los suelos analizados en esta tesis, trumao de Chillán y pómez plinianas del sector de Neltume, corresponden a dos tipos de suelos provenientes de la alteración de depósitos piroclásticos de edad Holocena, los cuales fueron lanzados en eventos eruptivos diferentes.

Como resultado de la alteración del material parental, ambos suelos han generado porcentajes considerables de arcilla alofánica, muestra de ello lo entregan los resultados ensayos de disolución selectiva, mediante los cuales se ha determinado que dichos suelos poseen un contenido de alofán mayor al 18%.

Como es común en suelos de origen volcánico, ambos poseen densidades secas bajas, menores a 0.8 ton/m^3 y humedades naturales considerablemente altas (cerca al 70% en el trumao y sobre 130% en las pómez).

Ensayos de granulometría y clasificación del trumao de Chillán, indican que se trata de un suelo principalmente fino, con más de un 90% de partículas bajo malla ASTM N°200, correspondiendo a un limo de alta plasticidad MH de acuerdo a USCS. Mientras que las pómez plinianas resultan poseer granulometrías diversas, que van desde gravas (GM) a limos de alta plasticidad (MH), lo que se explica por el proceso físico de depositación y a la disgregabilidad de algunas partículas, las cuales sufren ruptura al momento del ensayo.

Ambos suelos demostraron poseer un comportamiento preconsolidado en los resultados de ensayos odométricos, cuya presión de preconsolidación se observa con mayor claridad utilizando escala lineal. En el trumao, ésta preconsolidación se explicaría por la existencia de procesos fisicoquímicos desarrollado entre sus partículas y no por un fenómeno de precarga geológica. En cuanto a las pómez, el origen del fenómeno de preconsolidación podría tener similares características.

En ambos suelos se observó que mientras no se supere la presión de preconsolidación, la respuesta del suelo es de baja compresibilidad y que al superar dicha presión, la compresibilidad aumenta considerablemente.

Conclusiones Particulares Trumao de Chillán

En el trumao de Chillán, se demostró que la relación entre las resistencias últimas en condiciones remoldeadas e inalteradas depende de la presión de confinamiento y de la presión de preconsolidación de la muestra. Para presiones de confinamiento menores que la de preconsolidación, probetas inalteradas desarrollan una resistencia considerablemente mayor que las remoldeadas, mientras que sobre dicha presión la situación se invierte.

Se determinó que la curva “e-log σ_v ” para probetas remoldeadas determinada mediante ensayos odométricos, no posee como frontera a la misma desarrollada por muestras inalteradas, tal como se observa en otros suelos, si no que pueden desarrollar un comportamiento más rígido que probetas inalteradas para presiones mayores a la de preconsolidación.

La resistencia cíclica del Trumao en muestras inalteradas depende de la presión de confinamiento y del estado de preconsolidación. Muestras preconsolidadas poseen resistencias cíclicas muy elevadas, mientras que para muestras ensayadas a presiones de confinamientos mayores a la de preconsolidación, la resistencia cíclica disminuye considerablemente y es comparable a la de un suelo arenoso con densidad relativa media.

Adicionalmente, se determinó para probetas inalteradas que la resistencia cíclica disminuye con el aumento de la presión de confinamiento, tal como se determina para arenas limpias. Así también, la variación del factor de corrección K_σ se aproxima desarrollado por dichas arenas.

Por otra parte, se concluye que en probetas remoldeadas, las curvas de resistencia cíclica tienden a confundirse en una sola para presiones de confinamiento mayores a $0,5 \text{ kg/cm}^2$, no existiendo un comportamiento semejante al obtenido en probetas inalteradas. Así también, la variación del factor de corrección K_σ determinado para este tipo de probetas, se escapa a la tendencia desarrollada por arenas limpias.

Por último, es posible concluir que para presiones de confinamiento mayores a la presión de preconsolidación, la resistencia cíclica obtenidas para probetas remodeladas no varía significativamente en comparación con las obtenidas en probetas inalteradas. No obstante frente a sollicitaciones cíclicas en condiciones remodeladas, el suelo responde con deformaciones de mayor magnitud que en condiciones inalteradas para el mismo nivel de carga.

Conclusiones Particulares Pómez Plinianas

Las pómez plinianas analizadas en este estudio demostraron poseer un esqueleto granular altamente compresible y frágil, probablemente debido a la alta porosidad y a la facilidad con que se disgregan sus partículas. Esta última característica sería también una condición de borde que modificaría los resultados en ensayos de granulometría, ya que existiría rotura de partículas en el proceso de tamizado.

La obtención de los parámetros de resistencia al corte mediante ensayos de laboratorio depende del tipo de ensayo. Para el estudio de este suelo, fueron realizados dos tipos de ensayos triaxiales, ensayos CIU y ensayos CID, éste último utilizando probetas parcialmente saturadas y drenadas al aire. De estas pruebas se concluye lo siguiente: ensayos triaxiales CIU entregan un ángulo de fricción considerablemente mayor que triaxiales CID utilizando probetas parcialmente saturadas, esto probablemente debido a la no estabilización del desviador de tensiones a grandes deformaciones ($\epsilon \approx 20\%$). Por otra parte, de los ensayos CIU obtienen una cohesión nula, mientras que los CID una cohesión aproximada de $0,3 \text{ kg/cm}^2$. A sí también, de estos dos tipos de ensayos se obtiene que la envolvente de resistencia última determinada mediante condición drenada utilizando suelo parcialmente saturado, se encuentra por sobre la de resistencia no drenada.

Los altos valores humedad natural observados en las pómez plinianas van acompañado de alta permeabilidad. Estos suelos pueden desarrollar permeabilidades similares a los obtenidos en suelos gruesos del tipo gravas o arenas limpias.

La alta permeabilidad que posee este material indicaría que controla su resistencia drenada, la cual es mayor que la no drenada. No obstante, las deformaciones generadas en esta condición son considerablemente mayores que en condición no drenada.

Queda en evidencia la gran explosividad de la erupción que dio origen a las pómez plinianas de grupo volcánico Mocho Choshuenco, debido a la morfología del vidrio volcánico observado mediante microscopía.

Recomendaciones

Debido a que la fábrica natural de los suelos estudiados determina su comportamiento, se recomienda proceder en su estudio principalmente a través de ensayos in situ, tales como: placas de carga, corte directo, presiometros, ensayos down hole, etc.; de tal forma de evaluar parámetros más representativos y eliminar problemas de alteración de las muestras durante su extracción, traslado y preparación, así como evitar las condiciones de borde impuestas por los ensayos de laboratorio.

En el caso de trumao y suelos similares, se recomienda la utilización de tensiones admisibles de diseño inferiores a la presión de preconsolidación para estructuras que requieran apoyarse en este tipo de suelos, de tal forma de evitar grandes deformaciones producto del proceso de consolidación. Adicionalmente, se debe considerar la deformabilidad de estos suelos y pérdida de resistencia, principalmente en condiciones remoldeadas para cargas menores a la de preconsolidación, en particular para su uso como rellenos artificiales o en otros casos en que se altere la fábrica natural de suelo.

En cuanto al comportamiento dinámico del trumao de Chillán, es de interés considerar la similitud en su comportamiento al de arenas naturales para presiones de confinamiento mayores a la de preconsolidación, de tal forma de incluir posibles fallas por cargas cíclicas o grandes deformaciones en los análisis de estabilidad de estructuras.

Adicionalmente, se deben tomar en consideración las alteraciones en los resultados de los ensayos de laboratorio producto de la temperatura de secamiento en la preparación de las muestras de estos suelos, recomendándose la determinación de los límites de Atterberg y ejecución de ensayos Proctor, utilizando material a humedad natural o seco al aire.

Para las pómez plinianas, se recomienda el estudio en profundidad de sus propiedades geotécnicas y geomecánicas, debido a la gran necesidad actual del emplazamiento de obras de ingeniería en las zonas en donde se puedan encontrar este tipo de suelos.

9. BIBLIOGRAFÍA

A.G. Jongmans, L. Denaix, F. van Oort and A. Nieuwenhuyse (1998). *Induration of C Horizons by Allophane and Imogolite in Costa Rican Volcanic Soils*. Soil Science Society of America Journal Vol. 64 No. 1, p. 254-262.

Alcayaga, S., Luzio, W. (1987). *Clasificación Taxonómica de los suelos de las zonas semi-áridas, sub-húmedas y húmedas de la Región Central de Chile. V Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad Católica de Valparaíso. 251-257 más mapas.

Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. p.1205.

Biarez, J. & Hicher, P.Y. (1994). *Elementary Mechanics of Soil Behavior*. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.

Bowles, J. (1992). *Engineering Properties of Soils and their Measurement*, 4th ed. New York.

D. G. A. Whitten y J. R. V. Brooks (1980). *Diccionario de Geología*. Alianza Ed. Madrid, España.

Das, Braja M. (1997). *Advanced Soil Mechanics*. California State University, Sacramento.

Echegaray, J. (2004). *Evolución Geológica y Geoquímica del Centro Volcánico Mocho-Choshuenco, Andes del Sur, 40° S*. Departamento de Geología Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Echegaray, J., Moreno, H. & López, L. (1994). *El Depósito de Pómez Pliniana del Grupo Volcánico Mocho-Choshuenco*. VII Congreso Geológico Chileno, vol.1, p. 269-272.

Farmer, V.C. (1987). *Synthetic and Natural Allophane and Imogolite: a Synergistic Relationship*. Trans. XIII Congress International Soil Science. p. 346-354.

Hishijara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Claredon Press, Oxford.

IDIEM (2010), *Informe de Ensayo de Autocontrol N° 589.062-A de Mecánica de Suelos Proyecto Neltume-Choshuenco*. Santiago, Chile (Uso autorizado por Ingendesa S.A.).

IDIEM (2010), *Informe de Ensayo de Autocontrol N° 589.063-A de Mecánica de Suelos Proyecto Neltume*. Santiago, Chile (Uso autorizado por Ingendesa S.A.).

Idriss I.M. & Boulanger R.W. (2004). *Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes*, Berkeley California USA.

INIA & Tosso, J. (1985). *Suelos Volcánicos de Chile*. Santiago, Chile.

- Kirkman, J.H. & McHardy, W.J. (1980). *A Comparative Study of the Morphology, Chemical Composition and Weathering of Rhyolitic and Andesitic Glass*. Journal: *Clay Minerals* v. 15; no. 2; p. 165-173.
- Luzio, W., Alcayaga, S. (1990). *Mapa de Asociaciones de Grandes Grupos de suelos de Chile*. VI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo y Universidad de la Frontera, Temuco. 285-294.
- Moreno, H. Lara, L. (2007). *Geología del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco, Carta Geológica de Chile Serie Geología Básica N°107*. Subdirección Nacional de Geología, Chile.
- Paredes, M. (2005). *Geotecnia de Suelos Derivados de Ceniza Volcánica*. Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Parfitt, R.L. & Kimble, J.M. (1989). *Condition for Formation of Allophane in Soils*. Soil Science Society American Journal v. 53, p. 971-977.
- Ruxton, B.P. (1988). *Towards a Weathering Model of Mount Lamington Ash, Papua New Guinea*. Earth Science Rev., 25; p.387-397.
- Sanhueza, E. (1999). *Caracterización Geomecánica de los Limos de la Zona Sur de Chile*. Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Sepulveda, F. (2004). *Apuntes del Curso: Geomorfología Dinámica (GL54C)*. Departamento de Geología Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Shoji, S. (1983). *Mineralogical properties of volcanics ash soils*. In. N. Yoshinaga (editor), *Volcanics ash soil – Genesis, Properties, Classification*. Hakuyusha, Tokyo, pp.31-72
- Shoji, S., Nanzyo, M. & Dahlgren, R.A. (1993). *Volcanic Ash Soil*. Developments in Soil Science 21. Elsevier.
- Solans, D. (2010). *Equipo Triaxial Monótono y Cíclico de Altas Presiones y su Aplicación en Arenas de Relaves*. Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Universidad de la Frontera (2009). *Análisis Químico de Suelos N°43782*. Temuco, Chile (Uso autorizado por Ingendesa S.A.).
- Valdés, A. (1969). *Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Chile*. En panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina, Turrialba, Costa Rica.
- Wesley, L. (1998). *Geotechnical Characterization and Behaviour Allophane Clays*. University of Auckland, New Zeland.
- Whitlow, R. (1994). *Fundamentos de Mecánica de Suelos*, 2° ed. Mexico.
- Wright, C.A. (1995). *The Volcanic Ash Soils of Chile. Report to the Government of Chile*. Rep. N°2017.201 FAO, Roma.

Yamada, I. & Shoji, S. (1983). *Properties of Volcanics Glasses and Relationships Between the Properties of Tephra and Volcanics Zones*. Japan J. Soil Science.

Fotografía Volcán Chaiten: <http://tiempopatagonico.com/>

Fotografía Volcan Mayón: CG Newhall 23/9/1984.

Imagen Partícula de Alopán: <http://web.agr.ehime-u.ac.jp>

Imágenes Satelitales y Fotografía del Grupo Volcánico Mocho Choshuenco: Google Earth.

Mapas Geográficos Sector de Neltume: Turiscom

Suelos Volcánicos de Chile: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/06/01/93482>

Tipos de Piroclastos: <http://www.geovirtual.cl>

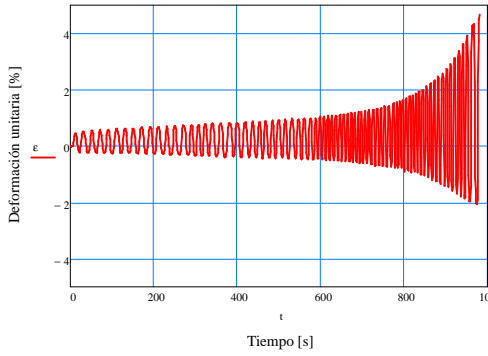
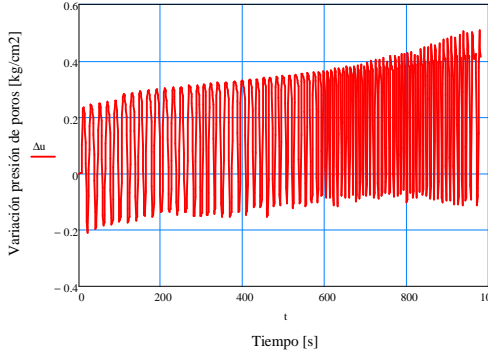
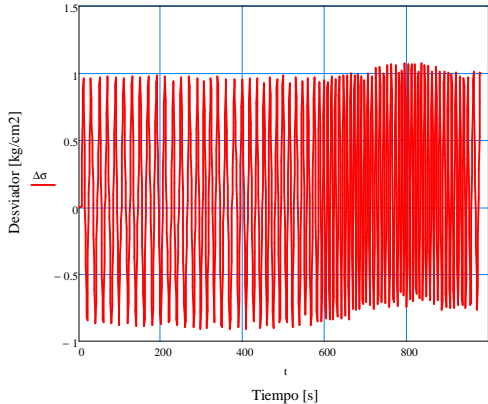
Reseña del Volcán Mocho-Choshuenco: www.sernageomin.cl

10. ANEXOS

ANEXO A: ENSAYES TRIAXIALES CICLICOS

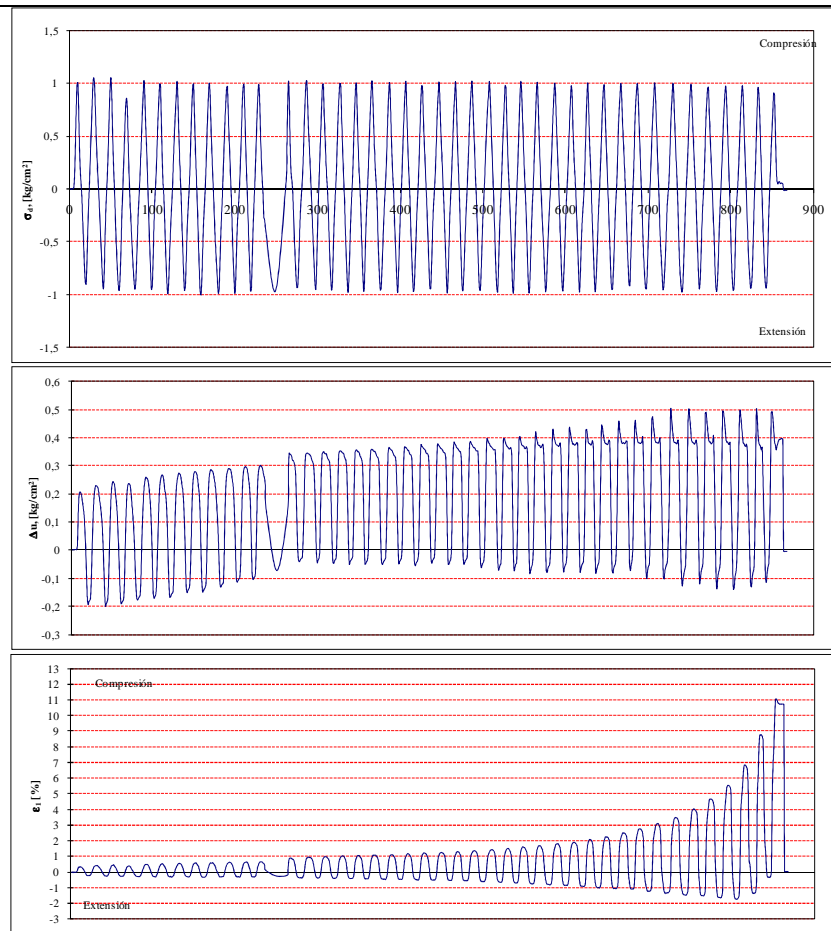
A.1.- Probetas Inalteradas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN = 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp11q2.txt"$		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.97$ cm		Diametro superior
$D_1 := 5.00$ cm		Diametro medio
$D_2 := 4.93$ cm		Diametro inferior
$hm := 10.0$ cm		Altura promedio
$Pw := 260.8$ g		Peso humedo
$w := 89.6$ %		Humedad
Consolidación:		
$t_c := 620$ minutos		Tiempo de consolidación
$V_d := 1.2$ cm ³		Volumen drenado
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 0.3$ kg/cm ²		Presión de camara efectiva
$R_c := 0.94$		Razon de corte ciclico
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 0.94$ kg/cm ²		Desviador
$f_{eq} := 3$ ciclos/min		Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ $nd := 0$		Dial
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$		Celda de carga
$mpp := 2.69$ $npp := 0$		Presión de poros



A.1.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas

Datos de la Probeta Inicial: cgp12q2 rc=1.0		
Diametro Superior 1	5,03	cm
Diametro Medio 1	4,96	cm
Diametro Inferior 1	4,95	cm
Altura Promedio	10,09	cm
Peso Natural	261,77	g
Contenido de Humedad	88,74	%
Diametro Superior promedio	5,03	cm
Diametro Medio promedio	4,96	cm
Diametro Inferior promedio	4,95	cm
Diametro promedio	4,98	cm
Area Promedio	19,48	cm ²
Volumen	196,54	cm ³
Densidad Humeda	1,33	g/cm ³
Densidad Seca	0,71	g/cm ³
Corrección por Consolidación:		
Presión de Poros υ , (disipada)		kg/cm ²
Volumen Inicial	24,0	cm ³
Fecha Lectura Inicial		
Hora Lectura Inicial		
Volumen Final	22,2	cm ³
Fecha Lectura Final		
Hora Lectura Final		
Volumen Drenado	1,8	cm ³
Periodo Condolidación	600,0	min
Diameto Corregido por consolid.	4,96	cm
Altura Corregida por consolid.	10,06	cm
Area Corregida por consolid.	19,36	cm ²
Tensiones de Ensaye:		
Presión de Camara efectiva, σ_3	0,50	kg/cm ²
Tensión Desviadora, σ_d	1,00	kg/cm ²
Razón de Corte Cíclico, Rc	1,00	
Frecuencia de Ciclos	3,00	ciclos/min
Calibraciones:		
	m	n
Dial	27,058	0,000
Celda de Carga	-250,971	-0,568
P. Poros	2,692	0,000



ORIGIN= 0

DATOS DE ENTRADA:

Registro de datos:

F₀ := "cgpp13q2.txt" Archivo de entrada de datos

Datos de la probeta:

D₀ := 4.97 cm Diametro superior

D₁ := 4.89 cm Diametro medio

D₂ := 4.97 cm Diametro inferior

hm := 10.08 cm Altura promedio

Pw := 259.36 g Peso humedo

w := 88.74 % Humedad

Consolidación:

tc := 62.3 minutos Tiempo de consolidación

Vd := 6 cm3 Volumen drenado

Tensiones de ensaye:

σ_{o_ef} := 0.3 kg/cm2 Presión de camara efectiva

Rc := 1.05 Razon de corte ciclico

σ_d := Rc · 2 · σ_{o_ef} = 1.05 kg/cm2 Desviador

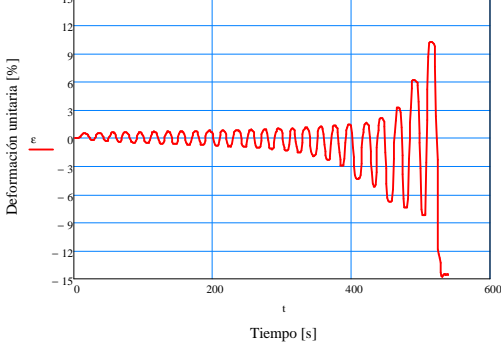
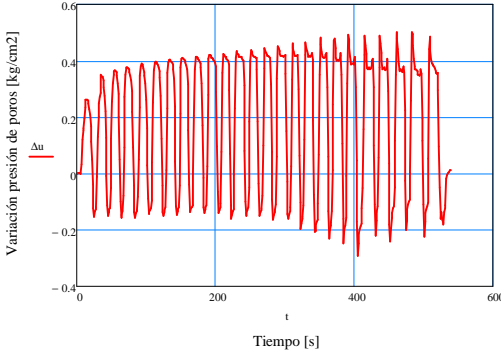
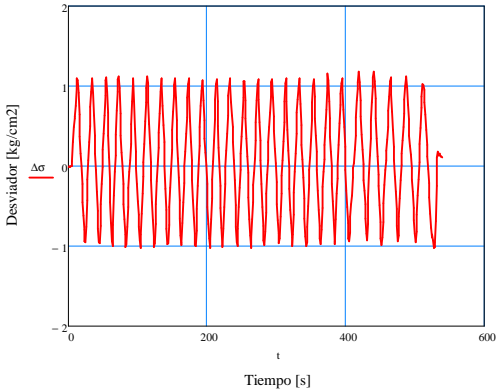
f_{eq} := 3 ciclos/min Frecuencia de ciclos

Calibración de equipos:

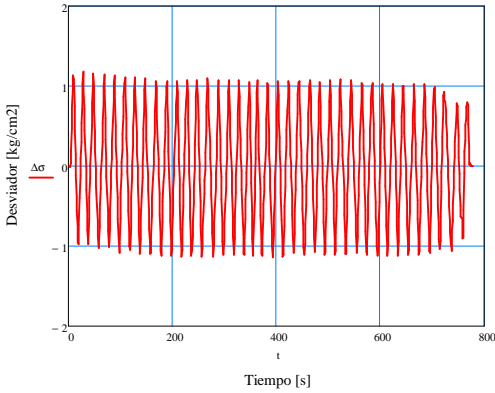
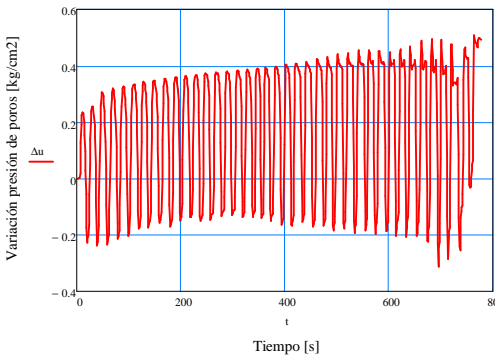
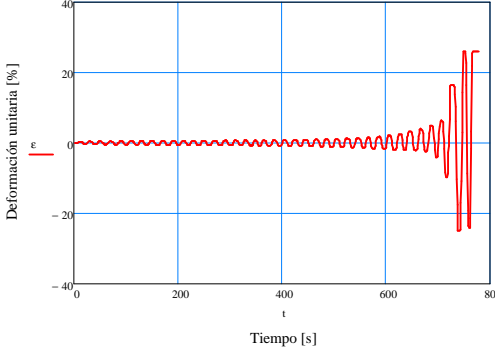
md := 27.05% nd := 0 Dial

mcc := -250.97 ncc := -0.56% Celda de carga

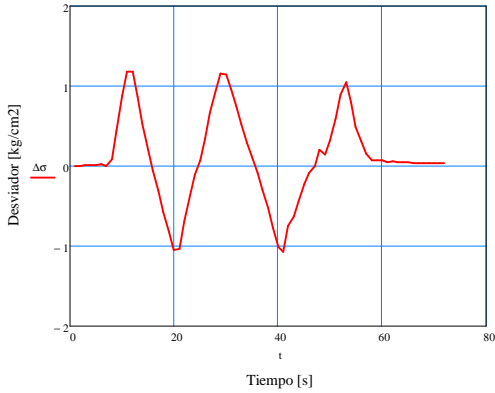
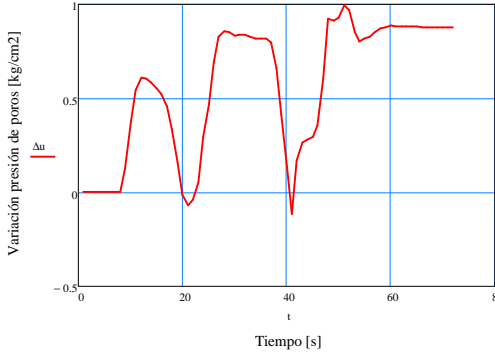
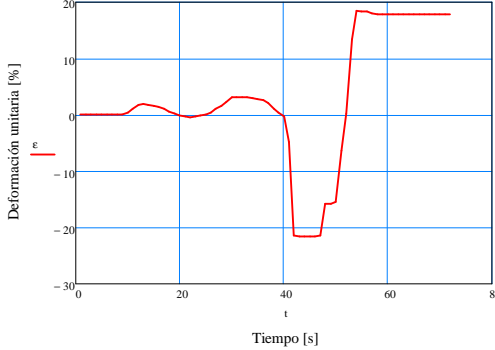
mpp := 2.69% npp := 0 Presión de poros



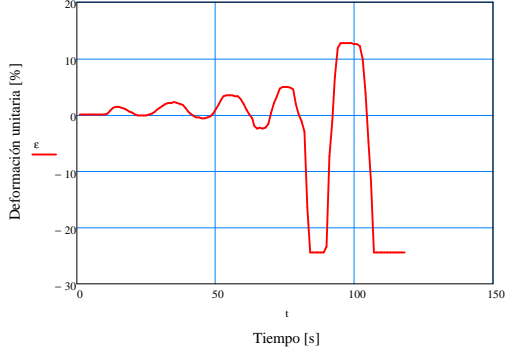
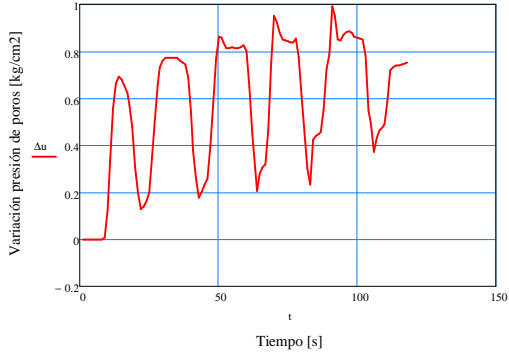
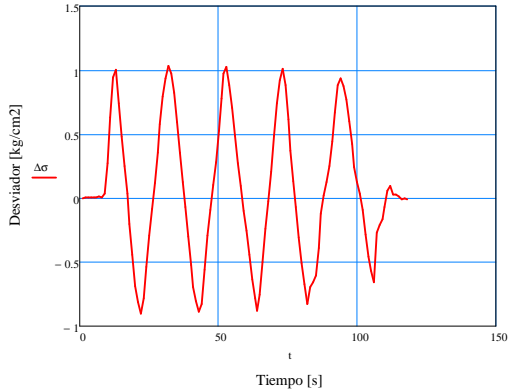
DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp15q2.txt"$		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
$D_0 := 5.00$	cm	Diametro superior
$D_1 := 4.96$	cm	Diametro medio
$D_2 := 4.94$	cm	Diametro inferior
$hm := 10.0$	cm	Altura promedio
$Pw := 260.87$	g	Peso humedo
$w := 100.7$	%	Humedad
Consolidación:		
$t_c := 600$	minutos	Tiempo de consolidación
$V_d := 2.4$	cm ³	Volumen drenado
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 0.3$	kg/cm ²	Presión de camara efectiva
$R_c := 1.1$		Razon de corte ciclico
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.1$	kg/cm ²	Desviador
$f_{eq} := 3$	ciclos/min	Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$	$nd := 0$	Dial
$mcc := -250.97$	$ncc := -0.56$	Celda de carga
$mpp := 2.69$	$npp := 0$	Presión de poros

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN = 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp1q1.txt"$	Archivo de entrada de datos	
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.98$ cm	Diametro superior	
$D_1 := 4.86$ cm	Diametro medio	
$D_2 := 4.97$ cm	Diametro inferior	
$hm := 10.09$ cm	Altura promedio	
$Pw := 230.15$ g	Peso humedo	
$w := 108.77$ %	Humedad	
Consolidación:		
$t_c := 90$ minutos	Tiempo de consolidación	
$V_d := 3.4$ cm ³	Volumen drenado	
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 1.0$ kg/cm ²	Presión de camara efectiva	
$R_c := 0.6$	Razon de corte ciclico	
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.22$ kg/cm ²	Desviador	
$f_{eq} := 3$ ciclos/min	Frecuencia de ciclos	
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ $nd := 0$	Dial	
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$	Celda de carga	
$mpp := 2.69$ $npp := 0$	Presión de poros	

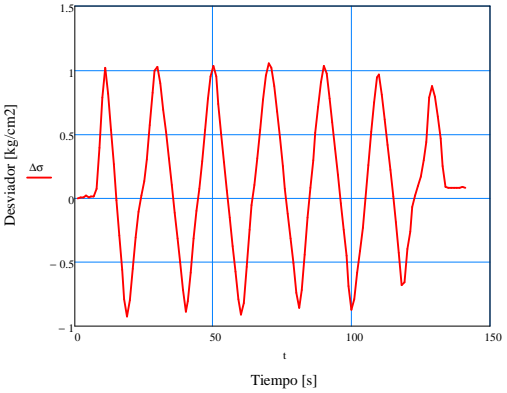
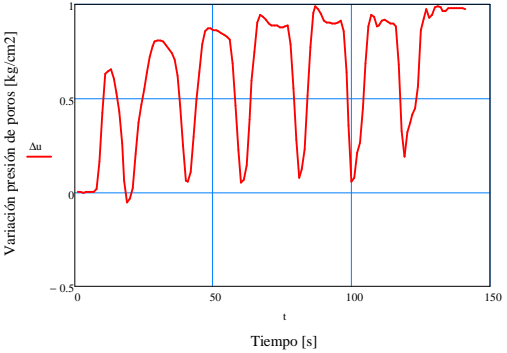
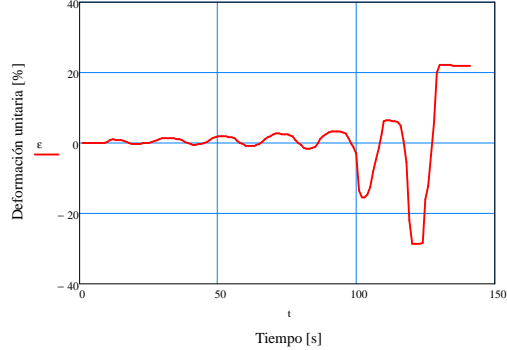




DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp3q1.txt"$		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.96$ cm		Diametro superior
$D_1 := 4.94$ cm		Diametro medio
$D_2 := 4.92$ cm		Diametro inferior
$hm := 10.09$ cm		Altura promedio
$Pw := 251.6$ g		Peso humedo
$w := 85.33$ %		Humedad
Consolidación:		
$t_c := 88.3$ minutos		Tiempo de consolidación
$V_d := 4.9$ cm ³		Volumen drenado
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 1.0$ kg/cm ²		Presión de camara efectiva
$R_c := 0.50$		Razon de corte ciclico
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1$ kg/cm ²		Desviador
$f_{eq} := 3$ ciclos/min		Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ % $nd := 0$		Dial
$mcc := -250.97$ % $ncc := -0.56$ %		Celda de carga
$mpp := 2.69$ % $npp := 0$		Presión de poros

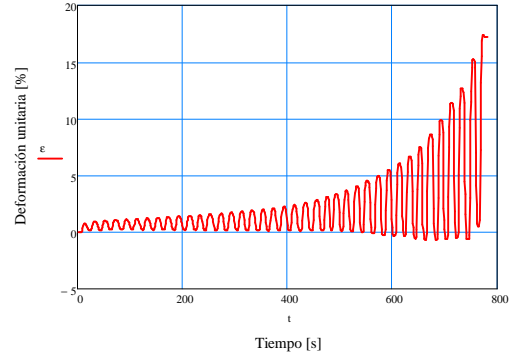
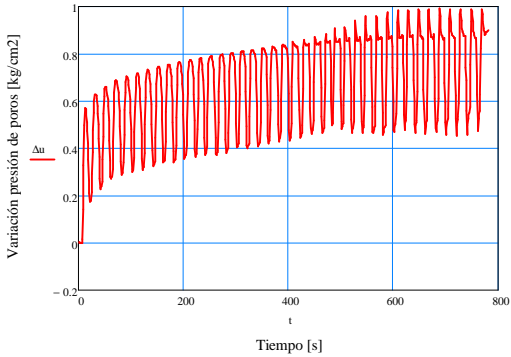
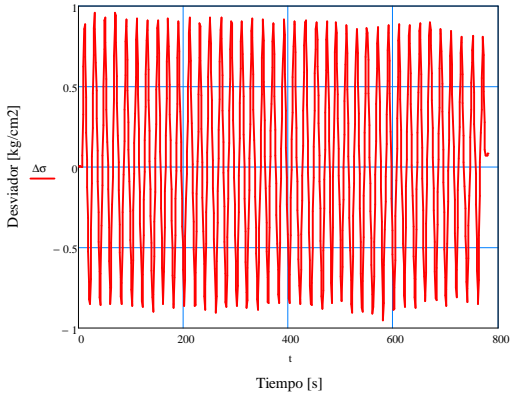


A.1.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
F := "cgpp5q1.txt"		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
D₀ := 4.90	cm	Diametro superior
D₁ := 4.98	cm	Diametro medio
D₂ := 4.94	cm	Diametro inferior
hm := 10.06	cm	Altura promedio
Pw := 254.72	g	Peso humedo
w := 86.7	%	Humedad
Consolidación:		
tc := 720	minutos	Tiempo de consolidación
Vd := 3.6	cm3	Volumen drenado
Tensiones de ensaye:		
σ_{ef} := 1.0	kg/cm2	Presión de camara efectiva
Rc := 0.5		Razon de corte ciclico
$\sigma_d := Rc \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1$	kg/cm2	Desviador
f_{eq} := 3	ciclos/min	Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
md := 27.05	nd := 0	Dial
mcc := -250.97	ncc := -0.56	Celda de carga
mpp := 2.69	npp := 0	Presión de poros

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp4q1.txt"$	Archivo de entrada de datos	
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.97$ cm	Diametro superior	
$D_1 := 4.92$ cm	Diametro medio	
$D_2 := 4.93$ cm	Diametro inferior	
$hm := 10.06$ cm	Altura promedio	
$Pw := 255.89$ g	Peso humedo	
$w := 108.77$ %	Humedad	
Consolidación:		
$t_c := 750$ minutos	Tiempo de consolidación	
$V_d := 5.8$ cm ³	Volumen drenado	
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{o_ef} := 1.0$ kg/cm ²	Presión de camara efectiva	
$R_c := 0.46$	Razon de corte ciclico	
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{o_ef} = 0.92$ kg/cm ²	Desviador	
$f_{eq} := 3$ ciclos/min	Frecuencia de ciclos	
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ $nd := 0$	Dial	
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$	Celda de carga	
$mpp := 2.69$ $npp := 0$	Presión de poros	

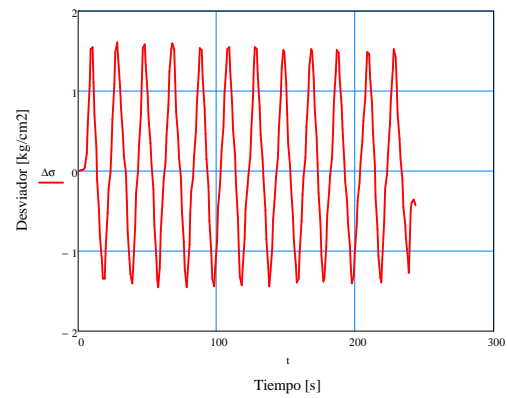
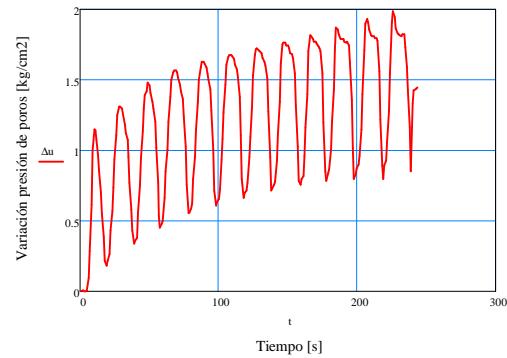
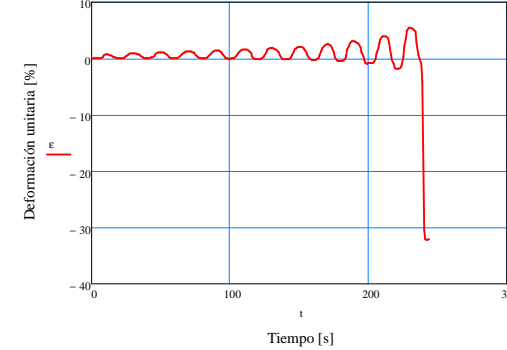


A.1.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas

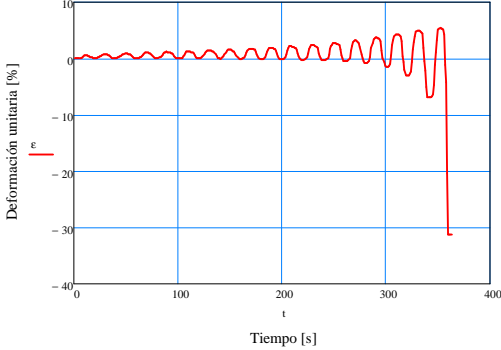
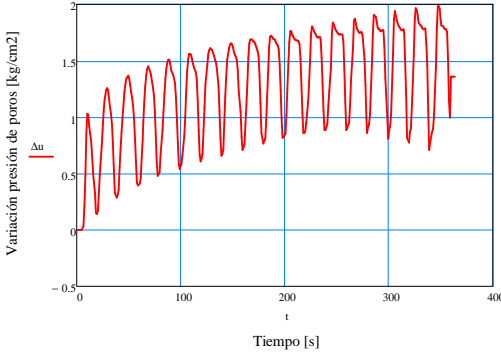
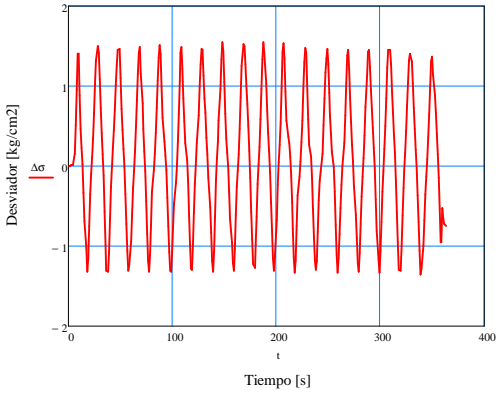
DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp16q2.txt"$	Archivo de entrada de datos	
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.93$ cm	Diametro superior	
$D_1 := 4.99$ cm	Diametro medio	
$D_2 := 4.96$ cm	Diametro inferior	
$hm := 10.09$ cm	Altura promedio	
$Pw := 261.28$ g	Peso humedo	
$w := 89.88$ %	Humedad	
Consolidación:		
$t_c := 61.3$ minutos	Tiempo de consolidación	
$V_d := 3.6$ cm ³	Volumen drenado	
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 2$ kg/cm ²	Presión de camara efectiva	
$R_c := 0.43$	Razon de corte ciclico	
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.8$ kg/cm ²	Desviador	
$f_{eq} := 3$ ciclos/min	Frecuencia de ciclos	
Calibración de equipos:		
$md := 27.058$ $nd := 0$	Dial	
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.568$	Celda de carga	
$mpp := 2.697$ $npp := 0$	Presión de poros	

A.1.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas

	ORIGIN = 0
DATOS DE ENTRADA:	
Registro de datos:	
F_{in} := "cgpp24q3.txt"	Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:	
D₀ := 4.96 cm	Diametro superior
D₁ := 4.99 cm	Diametro medio
D₂ := 5.00 cm	Diametro inferior
hm := 10.09 cm	Altura promedio
Pw := 258.1 g	Peso humedo
w := 97.28 %	Humedad
Consolidación:	
tc := 800 minutos	Tiempo de consolidación
Vd := 9.3 cm ³	Volumen drenado
Tensiones de ensaye:	
σ_{o_ef} := 2.0 kg/cm ²	Presión de camara efectiva
Rc := 0.38	Razon de corte ciclico
$\sigma_d := Rc \cdot 2 \cdot \sigma_{o_ef} = 1.52$ kg/cm ²	Desviador
f_{eq} := 3 ciclos/min	Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:	
md := 27.058 nd := 0	Dial
mcc := -250.97 ncc := -0.568	Celda de carga
mpp := 2.692 npp := 0	Presión de poros

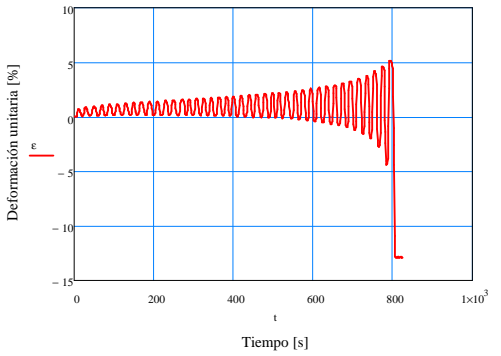
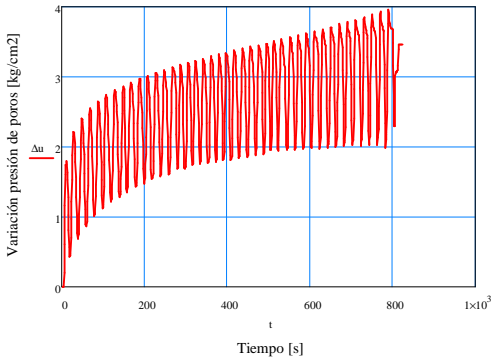
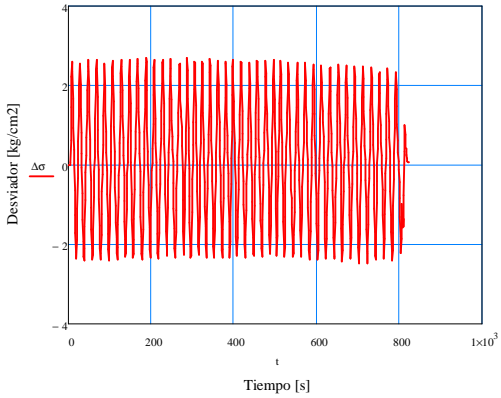




DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp26q3.txt"$		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.96$ cm		Diametro superior
$D_1 := 4.96$ cm		Diametro medio
$D_2 := 4.93$ cm		Diametro inferior
$hm := 10.09$ cm		Altura promedio
$Pw := 264.75$ g		Peso humedo
$w := 93.4$ %		Humedad
Consolidación:		
$tc := 750$ minutos		Tiempo de consolidación
$Vd := 9.2$ cm ³		Volumen drenado
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 2.0$ kg/cm ²		Presión de camara efectiva
$Rc := 0.35$		Razon de corte ciclico
$\sigma_d := Rc \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.4$ kg/cm ²		Desviador
$f_{eq} := 3$ ciclos/min		Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ $nd := 0$		Dial
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$		Celda de carga
$mpp := 2.69$ $npp := 0$		Presión de poros



A.1.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp21q2.txt"$		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.90$ cm		Diametro superior
$D_1 := 4.96$ cm		Diametro medio
$D_2 := 4.97$ cm		Diametro inferior
$hm := 10.06$ cm		Altura promedio
$Pw := 253.64$ g		Peso humedo
$w := 92.1$ %		Humedad
Consolidación:		
$t_c := 550$ minutos		Tiempo de consolidación
$V_d := 20.6$ cm ³		Volumen drenado
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 4.0$ kg/cm ²		Presión de camara efectiva
$R_c := 0.3$		Razon de corte ciclico
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 2.4$ kg/cm ²		Desviador
$f_{eq} := 3$ ciclos/min		Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ % $nd := 0$		Dial
$mcc := -250.97$ % $ncc := -0.56$ %		Celda de carga
$mpp := 2.69$ % $npp := 0$		Presión de poros



ORIGIN= 0

DATOS DE ENTRADA:

Registro de datos:

$F_{in} := "cgpp23q3.txt"$

Archivo de entrada de datos

Datos de la probeta:

$D_0 := 4.96$ cm

Diametro superior

$D_1 := 4.96$ cm

Diametro medio

$D_2 := 4.93$ cm

Diametro inferior

$hm := 10.06$ cm

Altura promedio

$Pw := 254.14$ g

Peso humedo

$w := 97.28$ %

Humedad

Consolidación:

$t_c := 770$ minutos

Tiempo de consolidación

$V_d := 32.3$ cm³

Volumen drenado

Tensiones de ensaye:

$\sigma_{o_ef} := 4.0$ kg/cm²

Presión de camara efectiva

$R_c := 0.34$

Razon de corte ciclico

$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{o_ef} = 2.56$ kg/cm²

Desviador

$f_{eq} := 3$ ciclos/min

Frecuencia de ciclos

Calibración de equipos:

$md := 27.058$ $nd := 0$

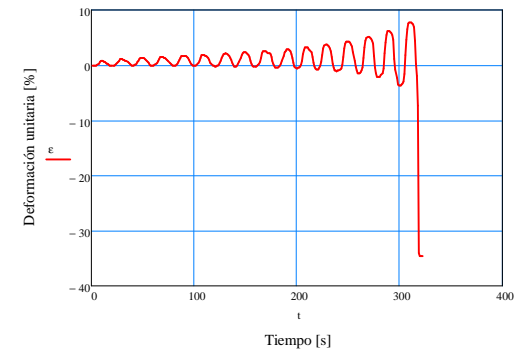
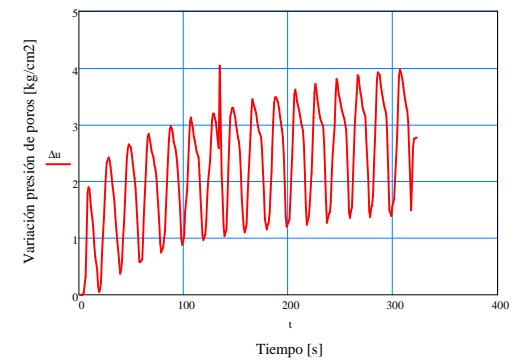
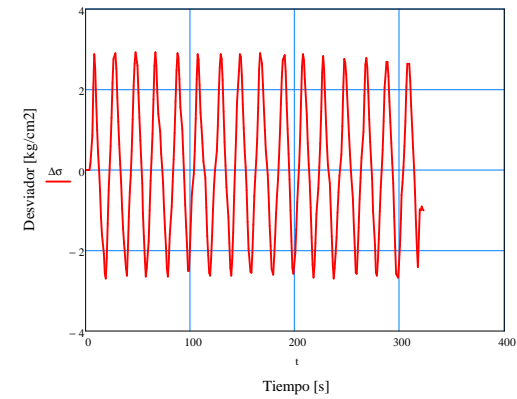
Dial

$mcc := -250.97$ $ncc := -0.568$

Celda de carga

$mpp := 2.697$ $npp := 0$

Presión de poros

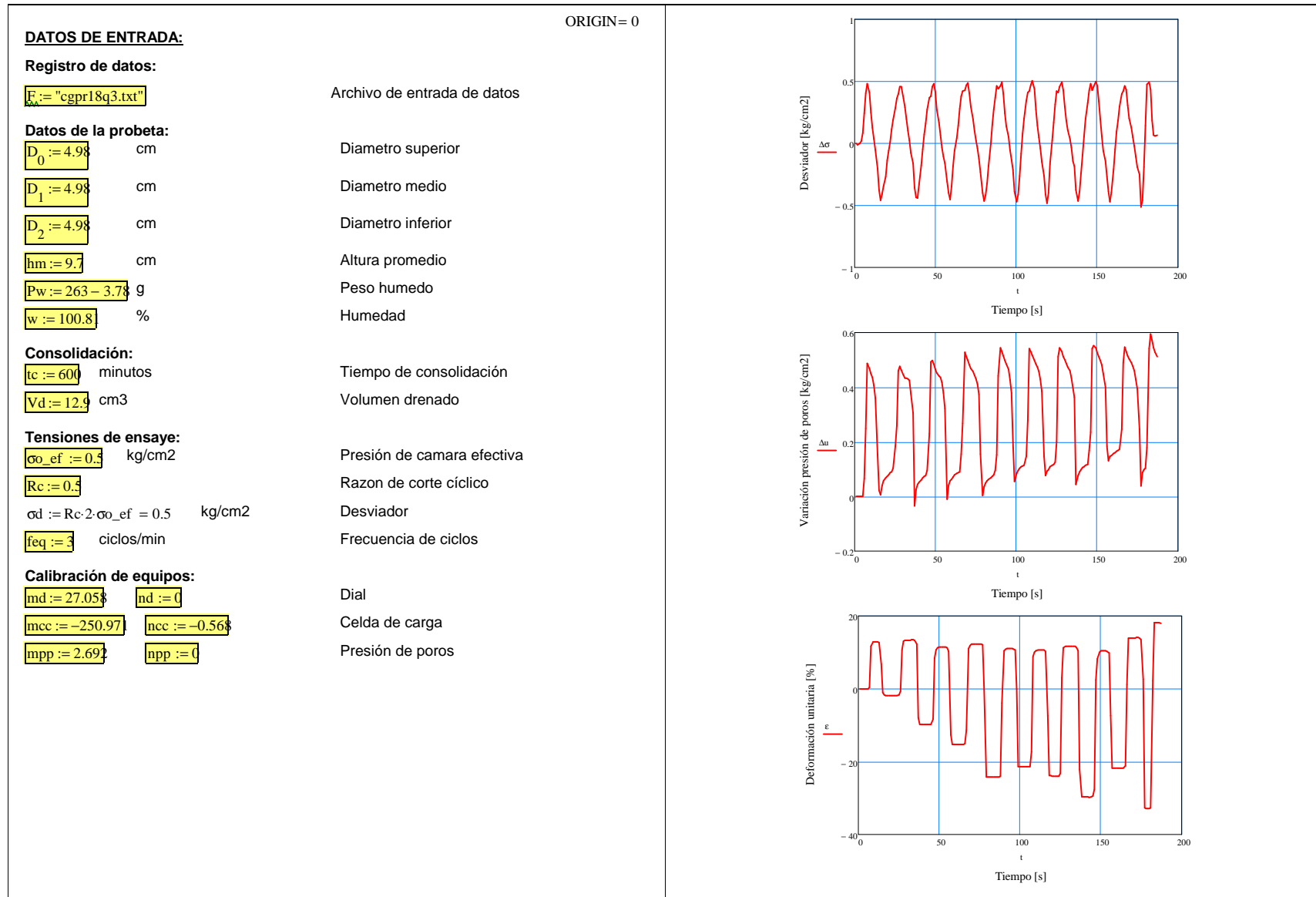


A.1.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas

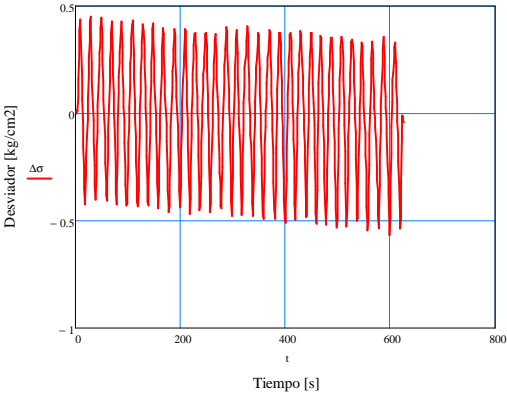
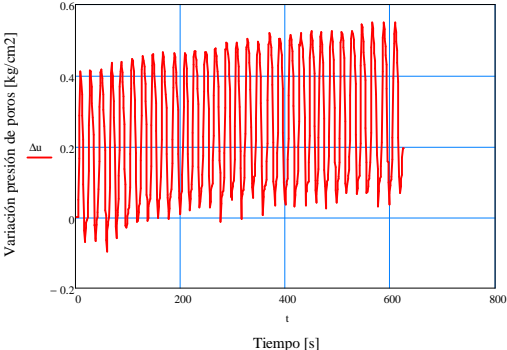
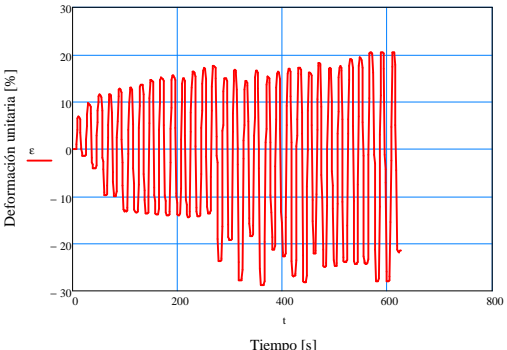
DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpp22q2.txt"$	Archivo de entrada de datos	
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.97$ cm	Diametro superior	
$D_1 := 4.96$ cm	Diametro medio	
$D_2 := 4.98$ cm	Diametro inferior	
$hm := 10.06$ cm	Altura promedio	
$Pw := 255.86$ g	Peso humedo	
$w := 94.13$ %	Humedad	
Consolidación:		
$t_c := 660$ minutos	Tiempo de consolidación	
$V_d := 20.6$ cm ³	Volumen drenado	
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 4.0$ kg/cm ²	Presión de camara efectiva	
$R_c := 0.33$	Razon de corte ciclico	
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 2.8$ kg/cm ²	Desviador	
$f_{eq} := 3$ ciclos/min	Frecuencia de ciclos	
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ $nd := 0$	Dial	
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$	Celda de carga	
$mpp := 2.69$ $npp := 0$	Presión de poros	

A.2.- Probetas Remoldeadas

A.2.- Triaxial Cíclico: Probetas Remoldeadas



DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN = 0
Registro de datos:		
$F_{da} := "cgpr19q3.txt"$	Archivo de entrada de datos	
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.98$ cm	Diametro superior	
$D_1 := 4.98$ cm	Diametro medio	
$D_2 := 4.98$ cm	Diametro inferior	
$hm := 9.7$ cm	Altura promedio	
$Pw := 263 - 1.7$ g	Peso humedo	
$w := 100.8$ %	Humedad	
Consolidación:		
$t_c := 59$ minutos	Tiempo de consolidación	
$V_d := 11.3$ cm ³	Volumen drenado	
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{o_ef} := 0.3$ kg/cm ²	Presión de camara efectiva	
$Rc := 0.43$	Razon de corte ciclico	
$\sigma_d := Rc \cdot 2 \cdot \sigma_{o_ef} = 0.45$ kg/cm ²	Desviador	
$f_{eq} := 3$ ciclos/min	Frecuencia de ciclos	
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ $nd := 0$	Dial	
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$	Celda de carga	
$mpp := 2.69$ $npp := 0$	Presión de poros	

ORIGIN= 0

DATOS DE ENTRADA:

Registro de datos:

$F_{in} := "cgpr4q3.txt"$ Archivo de entrada de datos

Datos de la probeta:

$D_0 := 4.99$ cm Diametro superior

$D_1 := 4.99$ cm Diametro medio

$D_2 := 4.99$ cm Diametro inferior

$hm := 9.7$ cm Altura promedio

$Pw := 260 - 4.1$ g Peso humedo

$w := 92.3$ % Humedad

Consolidación:

$t_c := 58$ minutos Tiempo de consolidación

$V_d := 2$ cm³ Volumen drenado

Tensiones de ensaye:

$\sigma_{ef} := 1.0$ kg/cm² Presión de camara efectiva

$R_c := 0.3$ Razon de corte ciclico

$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 0.66$ kg/cm² Desviador

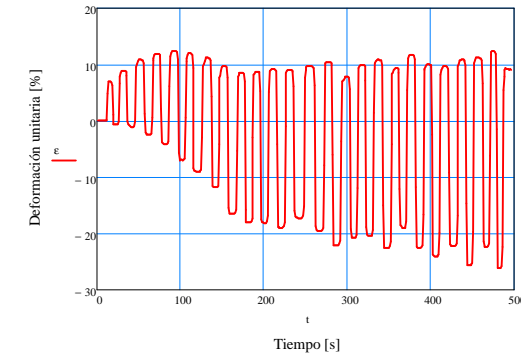
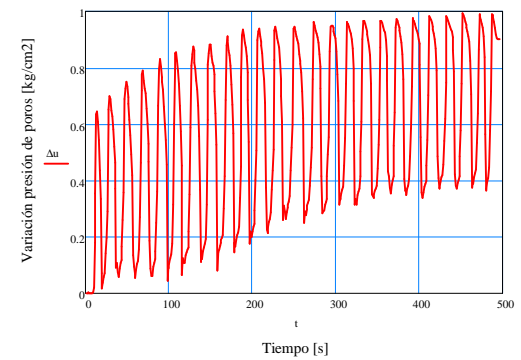
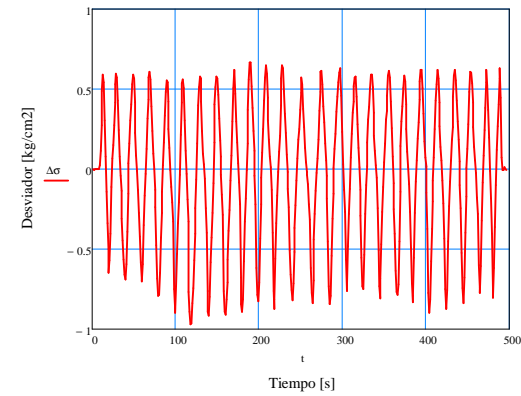
$f_{eq} := 3$ ciclos/min Frecuencia de ciclos

Calibración de equipos:

$md := 27.05$ % $nd := 0$ Dial

$mcc := -250.97$ % $ncc := -0.56$ % Celda de carga

$mpp := 2.69$ % $npp := 0$ % Presión de poros



ORIGIN= 0

DATOS DE ENTRADA:

Registro de datos:

$F_{in} := "cgpr5q3.txt"$

Archivo de entrada de datos

Datos de la probeta:

$D_0 := 4.98$ cm

Diametro superior

$D_1 := 4.98$ cm

Diametro medio

$D_2 := 4.98$ cm

Diametro inferior

$hm := 9.7$ cm

Altura promedio

$Pw := 265 - 4$ g

Peso humedo

$w := 92.36$ %

Humedad

Consolidación:

$t_c := 64$ minutos

Tiempo de consolidación

$V_d := 16.7$ cm³

Volumen drenado

Tensiones de ensaye:

$\sigma_{o_ef} := 1.0$ kg/cm²

Presión de camara efectiva

$R_c := 0.38$

Razon de corte ciclico

$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{o_ef} = 0.76$ kg/cm²

Desviador

$f_{eq} := 3$ ciclos/min

Frecuencia de ciclos

Calibración de equipos:

$md := 27.05$ $nd := 0$

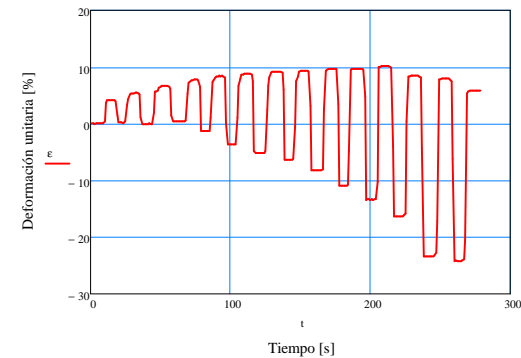
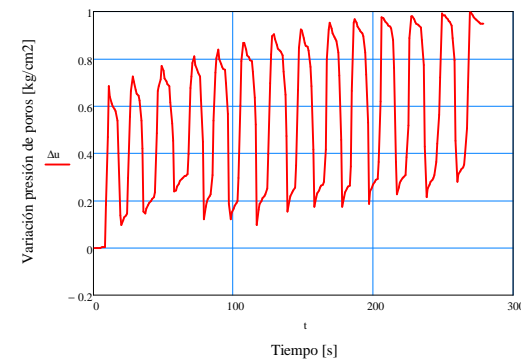
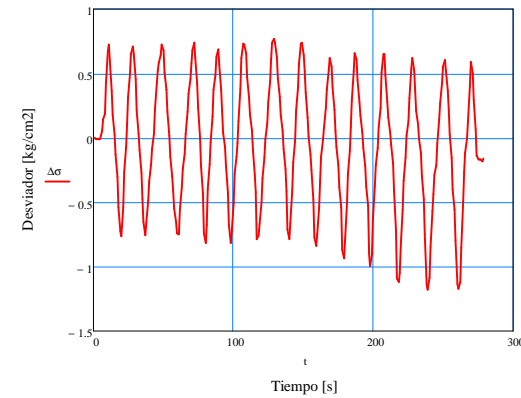
Dial

$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$

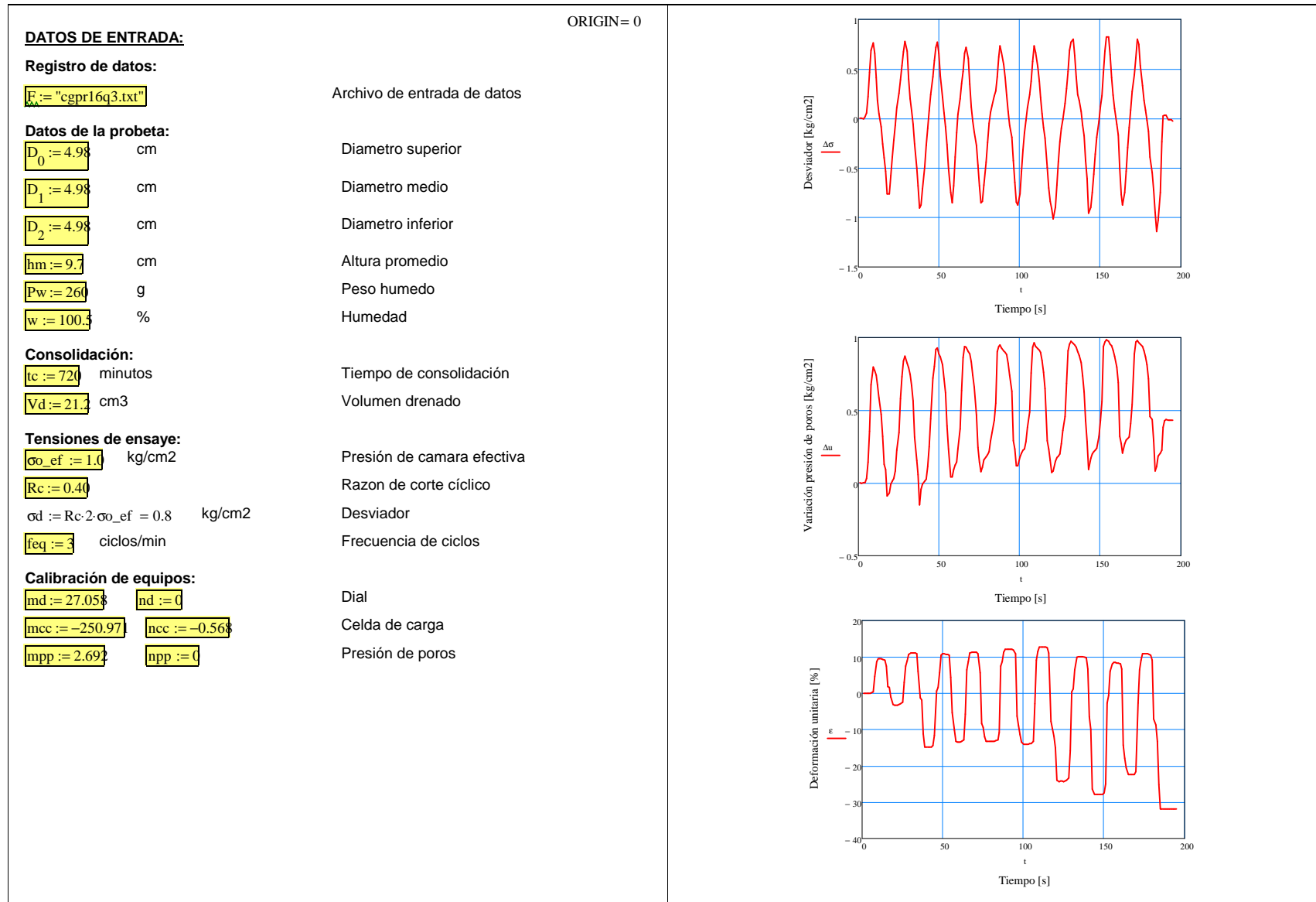
Celda de carga

$mpp := 2.69$ $npp := 0$

Presión de poros



A.2.- Triaxial Cíclico: Probetas Remoldeadas



ORIGIN= 0

DATOS DE ENTRADA:

Registro de datos:

$F_{in} := "cgpr8q3.txt"$ Archivo de entrada de datos

Datos de la probeta:

$D_0 := 4.98$ cm Diametro superior

$D_1 := 4.98$ cm Diametro medio

$D_2 := 4.98$ cm Diametro inferior

$hm := 9.7$ cm Altura promedio

$Pw := 260$ g Peso humedo

$w := 108.77$ % Humedad

Consolidación:

$t_c := 660$ minutos Tiempo de consolidación

$V_d := 31.3$ cm³ Volumen drenado

Tensiones de ensaye:

$\sigma_{ef} := 2.0$ kg/cm² Presión de camara efectiva

$R_c := 0.3$ Razon de corte ciclico

$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.2$ kg/cm² Desviador

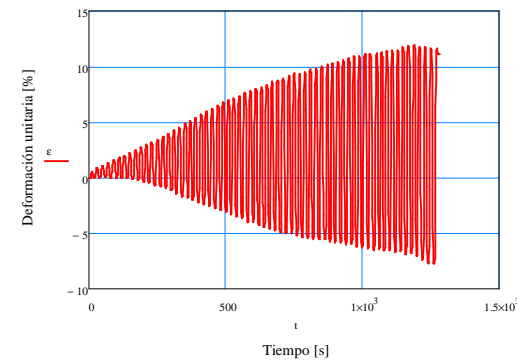
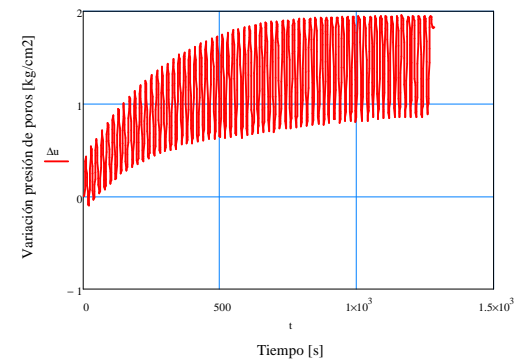
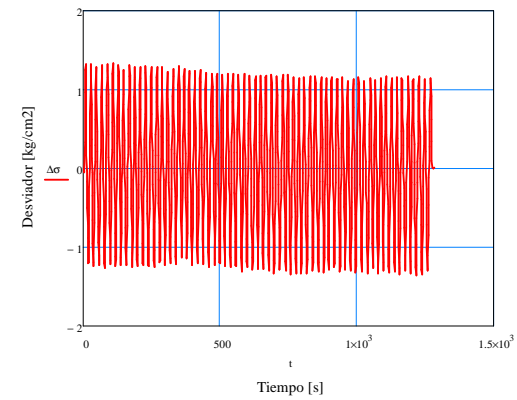
$f_{eq} := 3$ ciclos/min Frecuencia de ciclos

Calibración de equipos:

$md := 27.05$ % $nd := 0$ Dial

$mcc := -250.97$ % $ncc := -0.56$ % Celda de carga

$mpp := 2.69$ % $npp := 0$ % Presión de poros



A.2.- Triaxial Cíclico: Probetas Remoldeadas

ORIGIN = 0

DATOS DE ENTRADA:

Registro de datos:

$F_{in} := "cgpr9q3.txt"$

Archivo de entrada de datos

Datos de la probeta:

$D_0 := 4.98$ cm

Diametro superior

$D_1 := 4.98$ cm

Diametro medio

$D_2 := 4.98$ cm

Diametro inferior

$hm := 9.7$ cm

Altura promedio

$Pw := 260$ g

Peso humedo

$w := 100.4$ %

Humedad

Consolidación:

$t_c := 720$ minutos

Tiempo de consolidación

$V_d := 32$ cm³

Volumen drenado

Tensiones de ensaye:

$\sigma_{ef} := 2.0$ kg/cm²

Presión de cámara efectiva

$R_c := 0.35$

Razon de corte cíclico

$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.4$ kg/cm²

Desviador

$f_{eq} := 3$ ciclos/min

Frecuencia de ciclos

Calibración de equipos:

$md := 27.05$ % $nd := 0$

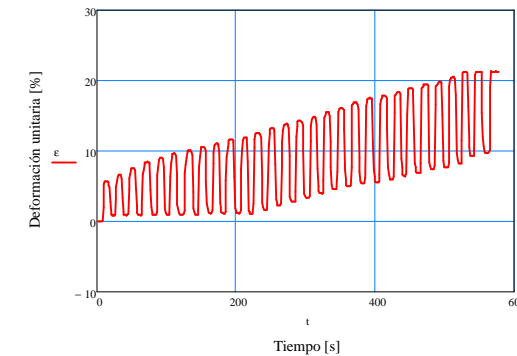
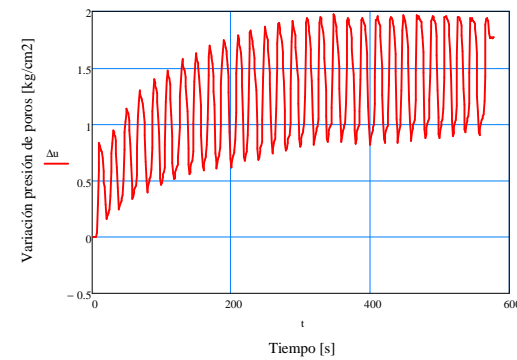
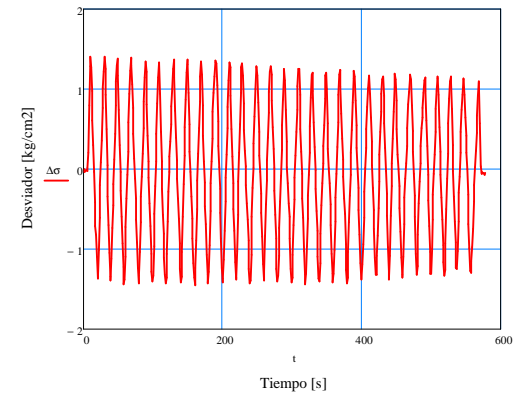
Dial

$mcc := -250.97$ % $ncc := -0.56$ %

Celda de carga

$mpp := 2.69$ % $npp := 0$

Presión de poros



A.2.- Triaxial Cíclico: Probetas Remoldeadas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{da} := "cgpr15q3.txt"$		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.98$ cm		Diametro superior
$D_1 := 4.98$ cm		Diametro medio
$D_2 := 4.98$ cm		Diametro inferior
$hm := 9.7$ cm		Altura promedio
$Pw := 260 - 4.1$ g		Peso humedo
$w := 108.77$ %		Humedad
Consolidación:		
$tc := 72$ minutos		Tiempo de consolidación
$Vd := 3.6$ cm ³		Volumen drenado
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 2.0$ kg/cm ²		Presión de camara efectiva
$Rc := 0.44$		Razon de corte ciclico
$\sigma_d := Rc \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.68$ kg/cm ²		Desviador
$f_{eq} := 3$ ciclos/min		Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ % $nd := 0$		Dial
$mcc := -250.97$ % $ncc := -0.56$ %		Celda de carga
$mpp := 2.69$ % $npp := 0$		Presión de poros

Deviador [kg/cm²]

Δσ

Tiempo [s]

Variación presión de poros [kg/cm²]

Δu

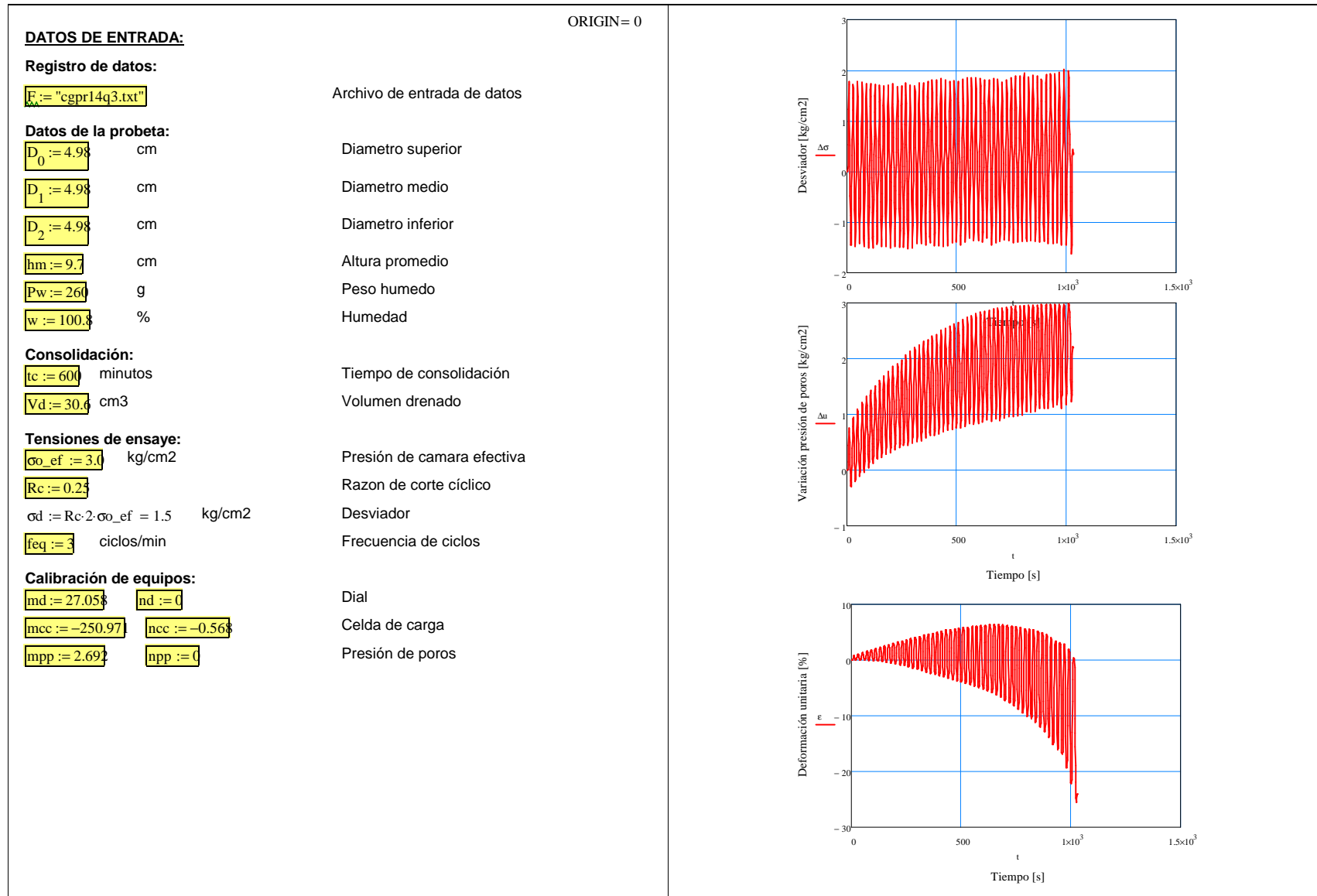
Tiempo [s]

Deformación unitaria [%]

ε

Tiempo [s]

A.2.- Triaxial Cíclico: Probetas Remoldeadas



ORIGIN = 0

DATOS DE ENTRADA:

Registro de datos:

$F_{in} := "cgpr10q3.txt"$ Archivo de entrada de datos

Datos de la probeta:

$D_0 := 4.98$ cm Diametro superior

$D_1 := 4.98$ cm Diametro medio

$D_2 := 4.98$ cm Diametro inferior

$hm := 9.7$ cm Altura promedio

$Pw := 260$ g Peso humedo

$w := 99.74$ % Humedad

Consolidación:

$t_c := 660$ minutos Tiempo de consolidación

$V_d := 29.3$ cm³ Volumen drenado

Tensiones de ensaye:

$\sigma_{ef} := 3.0$ kg/cm² Presión de camara efectiva

$Rc := 0.3$ Razon de corte ciclico

$\sigma_d := Rc \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.8$ kg/cm² Desviador

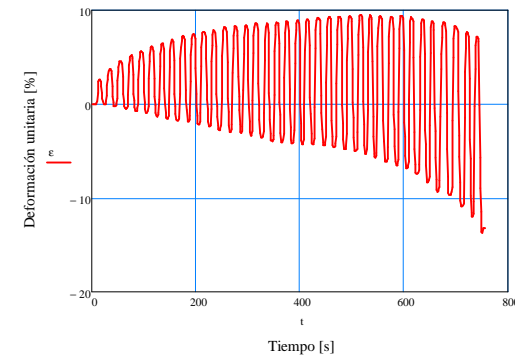
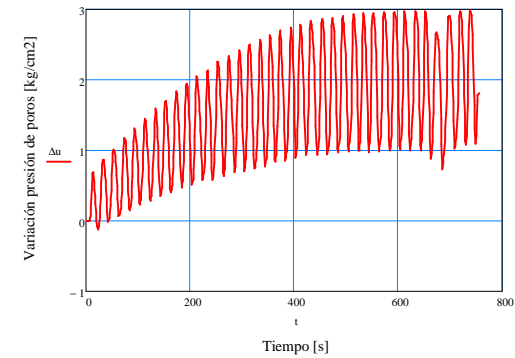
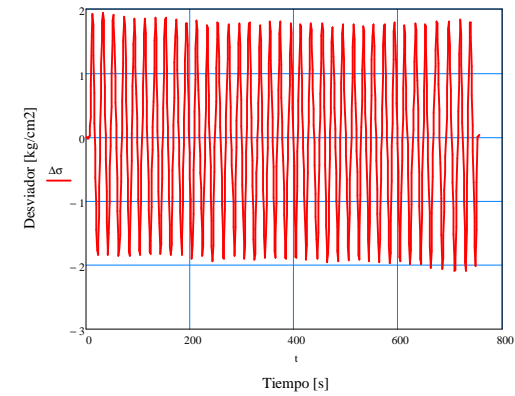
$f_{eq} := 3$ ciclos/min Frecuencia de ciclos

Calibración de equipos:

$md := 27.05$ % $nd := 0$ Dial

$mcc := -250.97$ % $ncc := -0.56$ % Celda de carga

$mpp := 2.69$ % $npp := 0$ % Presión de poros



ORIGIN = 0

DATOS DE ENTRADA:

Registro de datos:

$F_{in} := "cgpr11q3.txt"$ Archivo de entrada de datos

Datos de la probeta:

$D_0 := 4.98$ cm Diametro superior

$D_1 := 4.98$ cm Diametro medio

$D_2 := 4.98$ cm Diametro inferior

$hm := 9.7$ cm Altura promedio

$Pw := 265 - 4.1$ g Peso humedo

$w := 99.7$ % Humedad

Consolidación:

$t_c := 69$ minutos Tiempo de consolidación

$V_d := 28.6$ cm³ Volumen drenado

Tensiones de ensaye:

$\sigma_{ef} := 3.0$ kg/cm² Presión de camara efectiva

$R_c := 0.35$ Razon de corte ciclico

$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 2.1$ kg/cm² Desviador

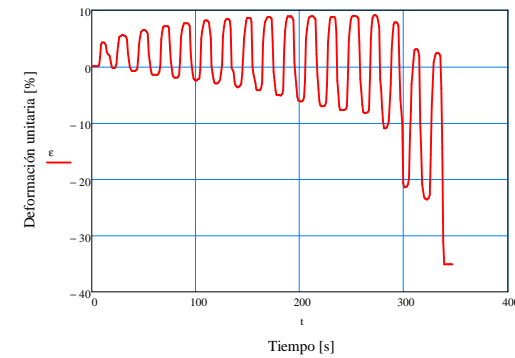
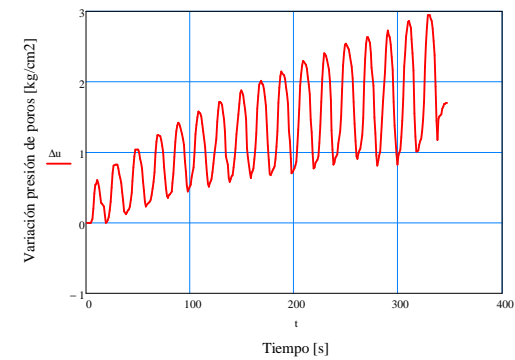
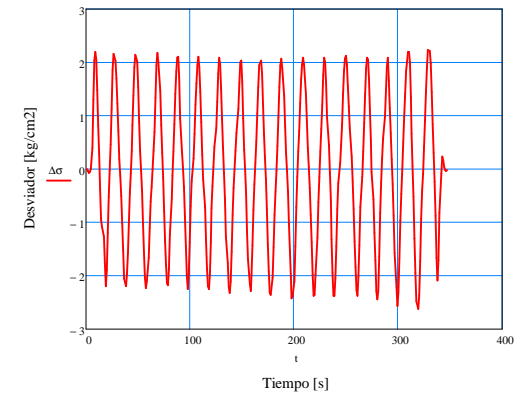
$f_{eq} := 3$ ciclos/min Frecuencia de ciclos

Calibración de equipos:

$md := 27.05$ % $nd := 0$ Dial

$mcc := -250.97$ % $ncc := -0.56$ % Celda de carga

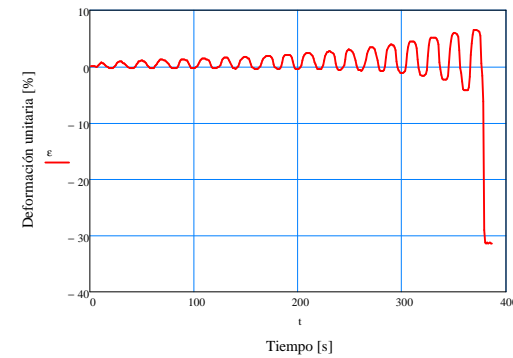
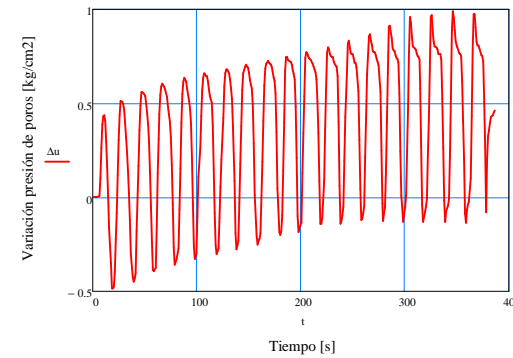
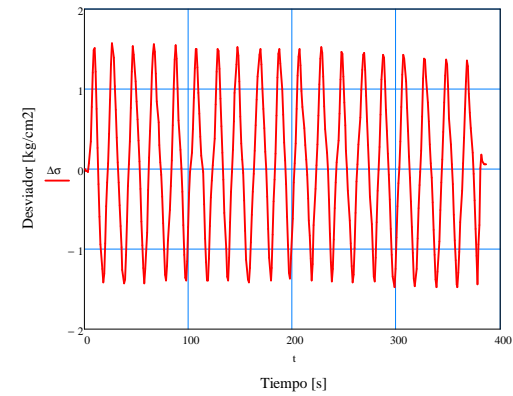
$mpp := 2.69$ % $npp := 0$ % Presión de poros



A.3.- Probetas Inalteradas Preconsolidadas

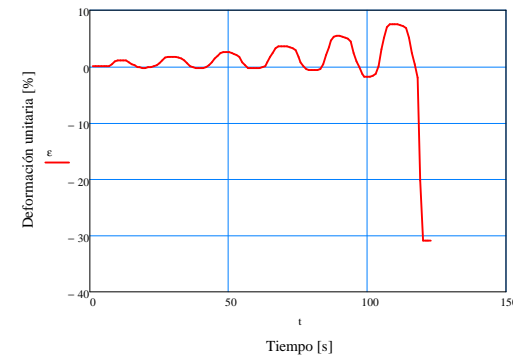
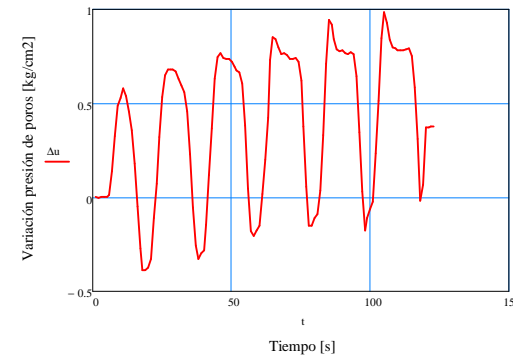
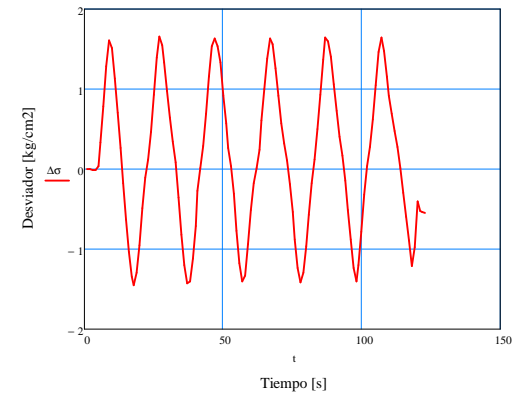
A.3.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas Preconsolidadas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpoc2q3.txt"$	Archivo de entrada de datos	
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.90$ cm	Diametro superior	
$D_1 := 4.98$ cm	Diametro medio	
$D_2 := 4.94$ cm	Diametro inferior	
$hm := 10.06$ cm	Altura promedio	
$Pw := 254.72$ g	Peso humedo	
$w := 108.2$ %	Humedad	
Consolidación:		
$t_c := 750$ minutos	Tiempo de consolidación preconsolidación	
$t_{c1} := 230$ minutos	Tiempo de consolidación	
$V_d := 17.8$ cm ³	Volumen drenado total	
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 1$ kg/cm ²	Presión de camara efectiva	
$R_c := 0.7$	Razon de corte cíclico	
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 1.4$ kg/cm ²	Desviador	
$f_{eq} := 3$ ciclos/min	Frecuencia de ciclos	
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ % $nd := 0$	Dial	
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$ %	Celda de carga	
$mpp := 2.692$ $npp := 0$	Presión de poros	

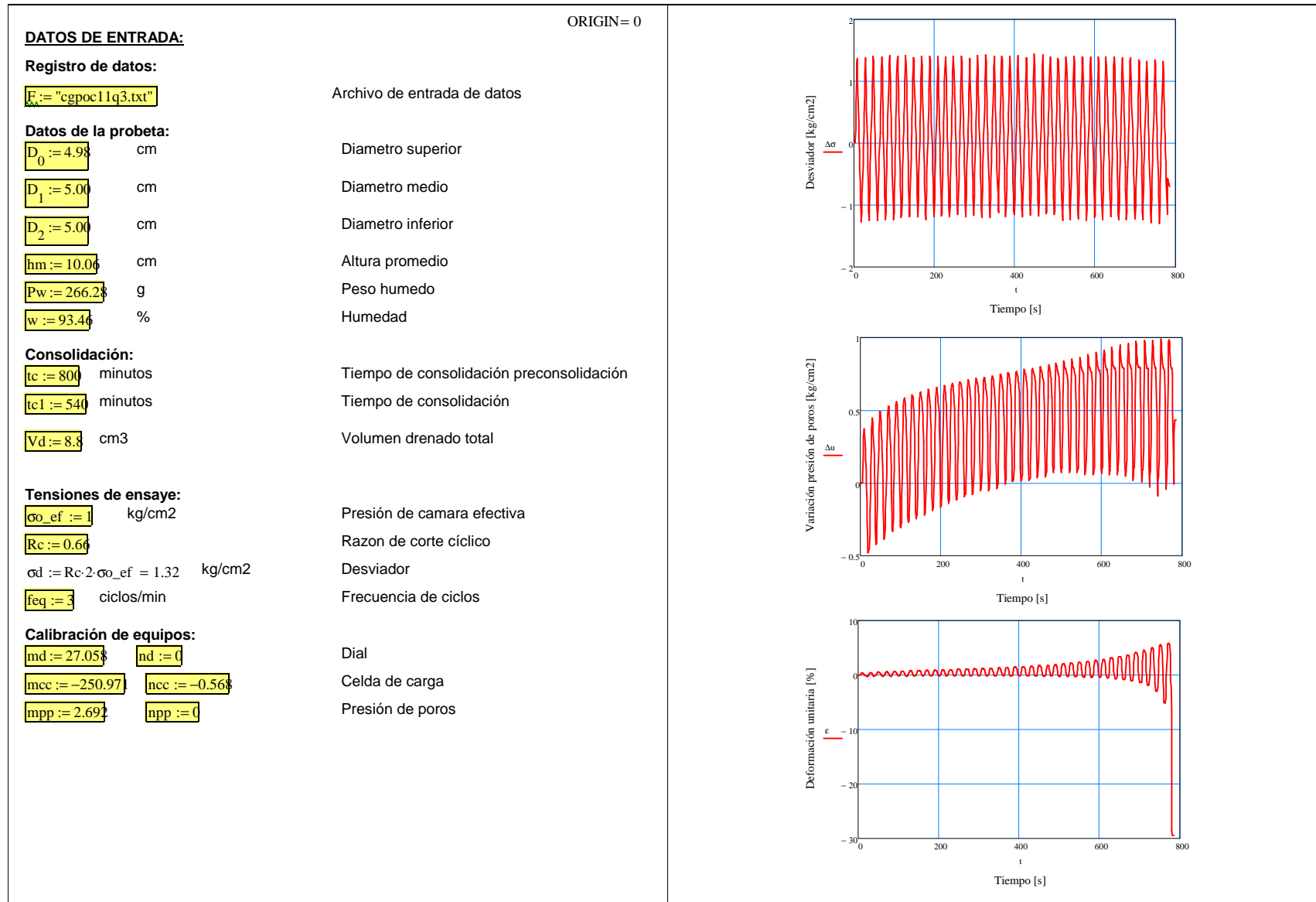


A.3.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas Preconsolidadas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{da} := "cgpoc4q3.txt"$		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.97$ cm		Diametro superior
$D_1 := 4.94$ cm		Diametro medio
$D_2 := 4.97$ cm		Diametro inferior
$hm := 10.06$ cm		Altura promedio
$Pw := 256.54$ g		Peso humedo
$w := 104.74$ %		Humedad
Consolidación:		
$tc := 630$ minutos		Tiempo de consolidación preconsolidación
$tc1 := 340$ minutos		Tiempo de consolidación
$Vd := 10.4$ cm ³		Volumen drenado total
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{o_ef} := 1$ kg/cm ²		Presión de camara efectiva
$Rc := 0.77$		Razon de corte ciclico
$\sigma_d := Rc \cdot 2 \cdot \sigma_{o_ef} = 1.54$ kg/cm ²		Desviador
$f_{eq} := 3$ ciclos/min		Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ %	$nd := 0$	Dial
$mcc := -250.97$ %	$ncc := -0.56$ %	Celda de carga
$mpp := 2.69$ %	$npp := 0$	Presión de poros

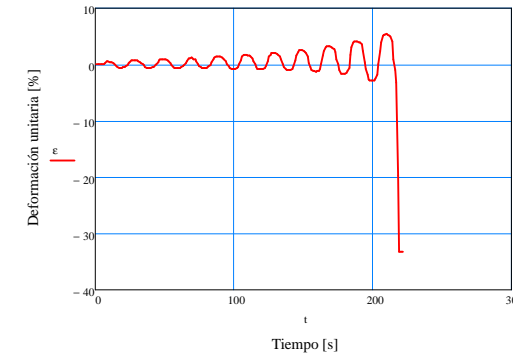
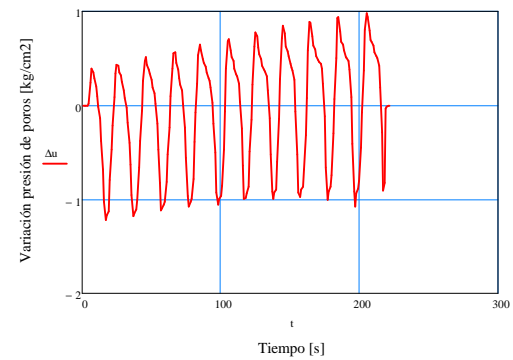
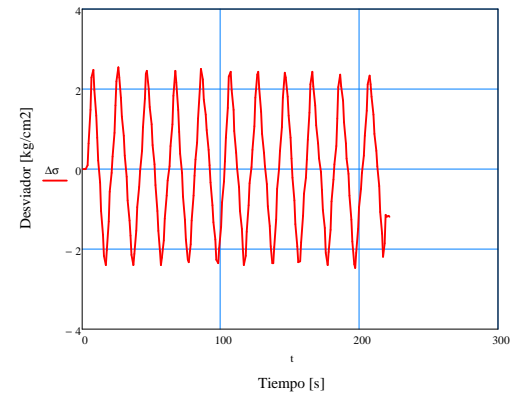


A.3.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas Preconsolidadas



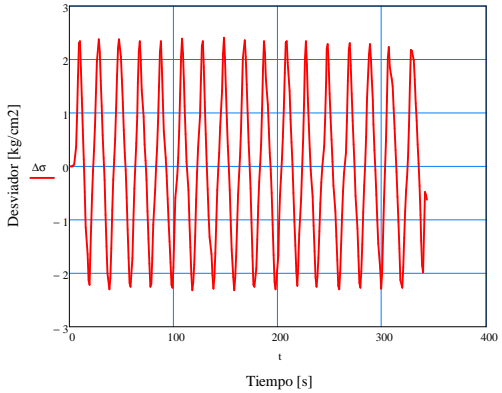
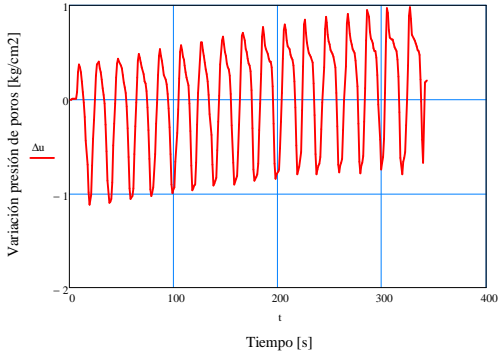
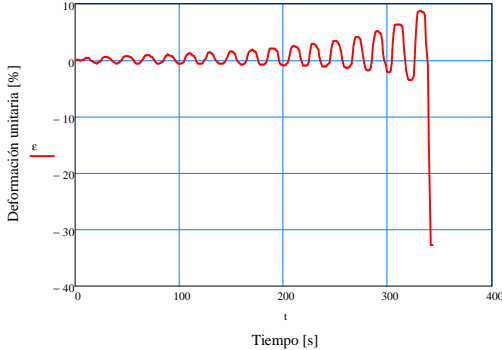
A.3.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas Preconsolidadas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpoc10q3.txt"$	Archivo de entrada de datos	
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.98$ cm	Diametro superior	
$D_1 := 4.97$ cm	Diametro medio	
$D_2 := 4.99$ cm	Diametro inferior	
$hm := 10.06$ cm	Altura promedio	
$Pw := 263.02$ g	Peso humedo	
$w := 92.18$ %	Humedad	
Consolidación:		
$t_c := 780$ minutos	Tiempo de consolidación preconsolidación	
$t_{c1} := 420$ minutos	Tiempo de consolidación	
$V_d := 22.8$ cm ³	Volumen drenado total	
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} :=$ kg/cm ²	Presión de camara efectiva	
$R_c := 1.16$	Razon de corte cíclico	
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 2.32$ kg/cm ²	Desviador	
$f_{eq} := 3$ ciclos/min	Frecuencia de ciclos	
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ $nd := 0$	Dial	
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$	Celda de carga	
$mpp := 2.69$ $npp := 0$	Presión de poros	



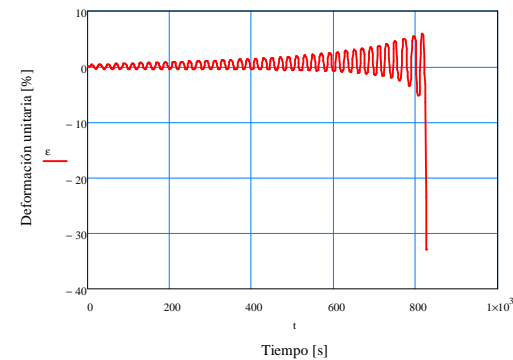
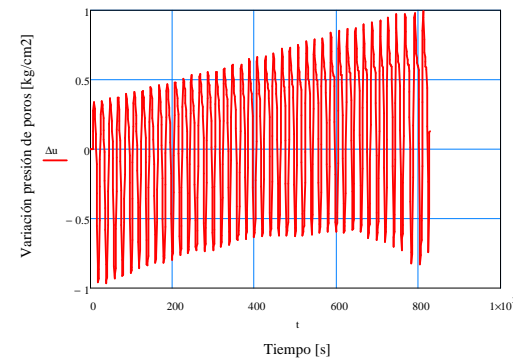
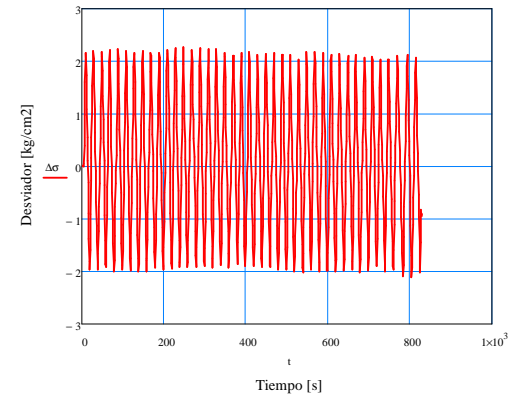
A.3.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas Preconsolidadas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN= 0
Registro de datos:		
$F_{in} := "cgpoc9q3.txt"$	Archivo de entrada de datos	
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.96$ cm	Diametro superior	
$D_1 := 4.97$ cm	Diametro medio	
$D_2 := 4.93$ cm	Diametro inferior	
$hm := 10.06$ cm	Altura promedio	
$Pw := 260.42$ g	Peso humedo	
$w := 94.23$ %	Humedad	
Consolidación:		
$t_c := 720$ minutos	Tiempo de consolidación preconsolidación	
$t_{c1} := 443$ minutos	Tiempo de consolidación	
$V_d := 21.7$ cm ³	Volumen drenado total	
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} := 1$ kg/cm ²	Presión de camara efectiva	
$R_c := 1.1$	Razon de corte ciclico	
$\sigma_d := R_c \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 2.22$ kg/cm ²	Desviador	
$f_{eq} := 3$ ciclos/min	Frecuencia de ciclos	
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$ $nd := 0$	Dial	
$mcc := -250.97$ $ncc := -0.56$	Celda de carga	
$mpp := 2.692$ $npp := 0$	Presión de poros	

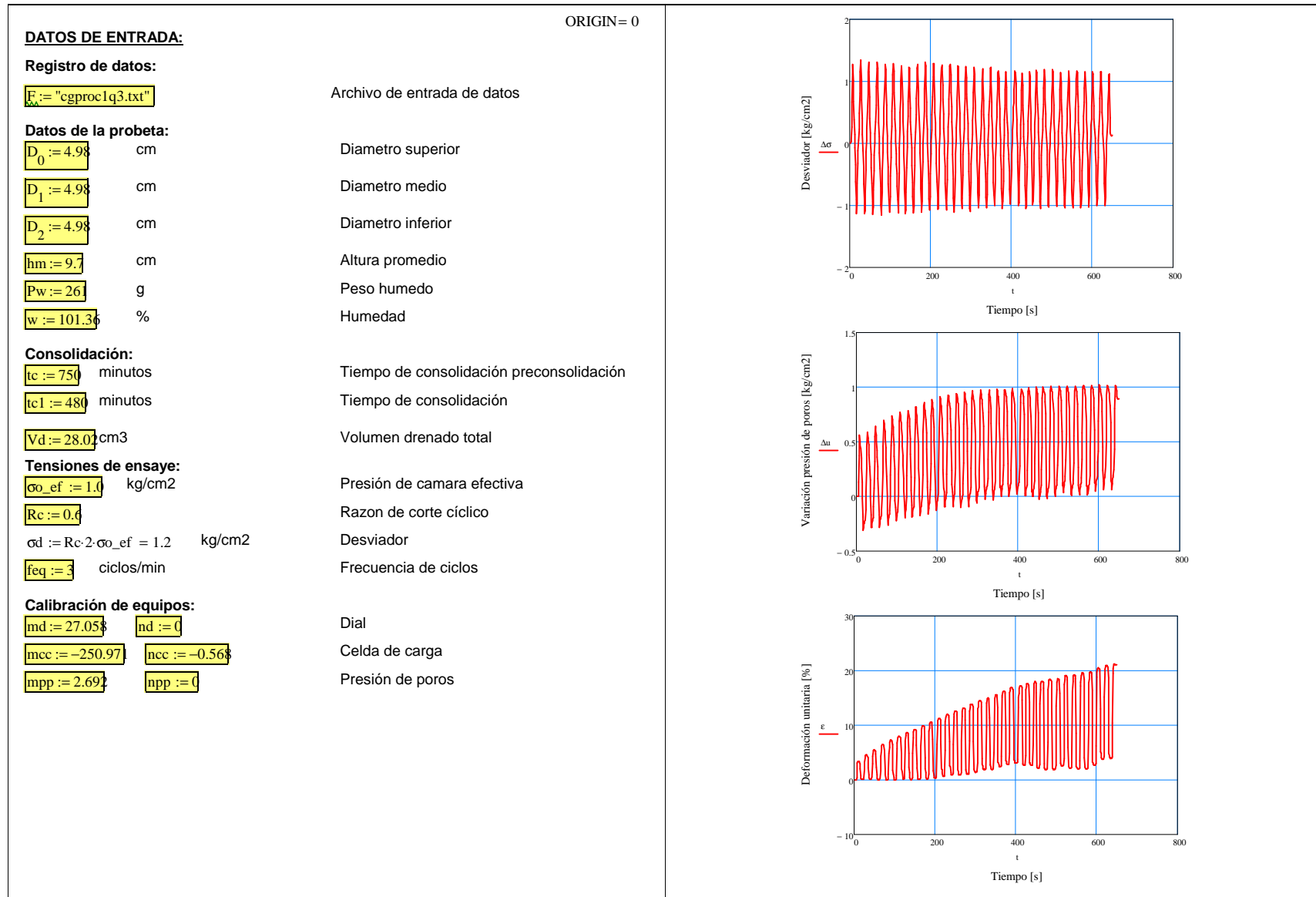
A.3.- Triaxial Cíclico: Probetas Inalteradas Preconsolidadas

DATOS DE ENTRADA:		ORIGIN = 0
Registro de datos:		
$F_{da} := "cgpoc8q3.txt"$		Archivo de entrada de datos
Datos de la probeta:		
$D_0 := 4.93$	cm	Diametro superior
$D_1 := 4.98$	cm	Diametro medio
$D_2 := 4.97$	cm	Diametro inferior
$hm := 10.06$	cm	Altura promedio
$Pw := 265.7$	g	Peso humedo
$w := 93.39$	%	Humedad
Consolidación:		
$tc := 70$	minutos	Tiempo de consolidación preconsolidación
$tc1 := 420$	minutos	Tiempo de consolidación
$Vd := 19.1$	cm ³	Volumen drenado total
Tensiones de ensaye:		
$\sigma_{ef} :=$	kg/cm ²	Presión de camara efectiva
$Rc := 1.00$		Razon de corte cíclico
$\sigma_d := Rc \cdot 2 \cdot \sigma_{ef} = 2$	kg/cm ²	Desviador
$f_{eq} := 3$	ciclos/min	Frecuencia de ciclos
Calibración de equipos:		
$md := 27.05$	$nd := 0$	Dial
$mcc := -250.97$	$ncc := -0.56$	Celda de carga
$mpp := 2.69$	$npp := 0$	Presión de poros

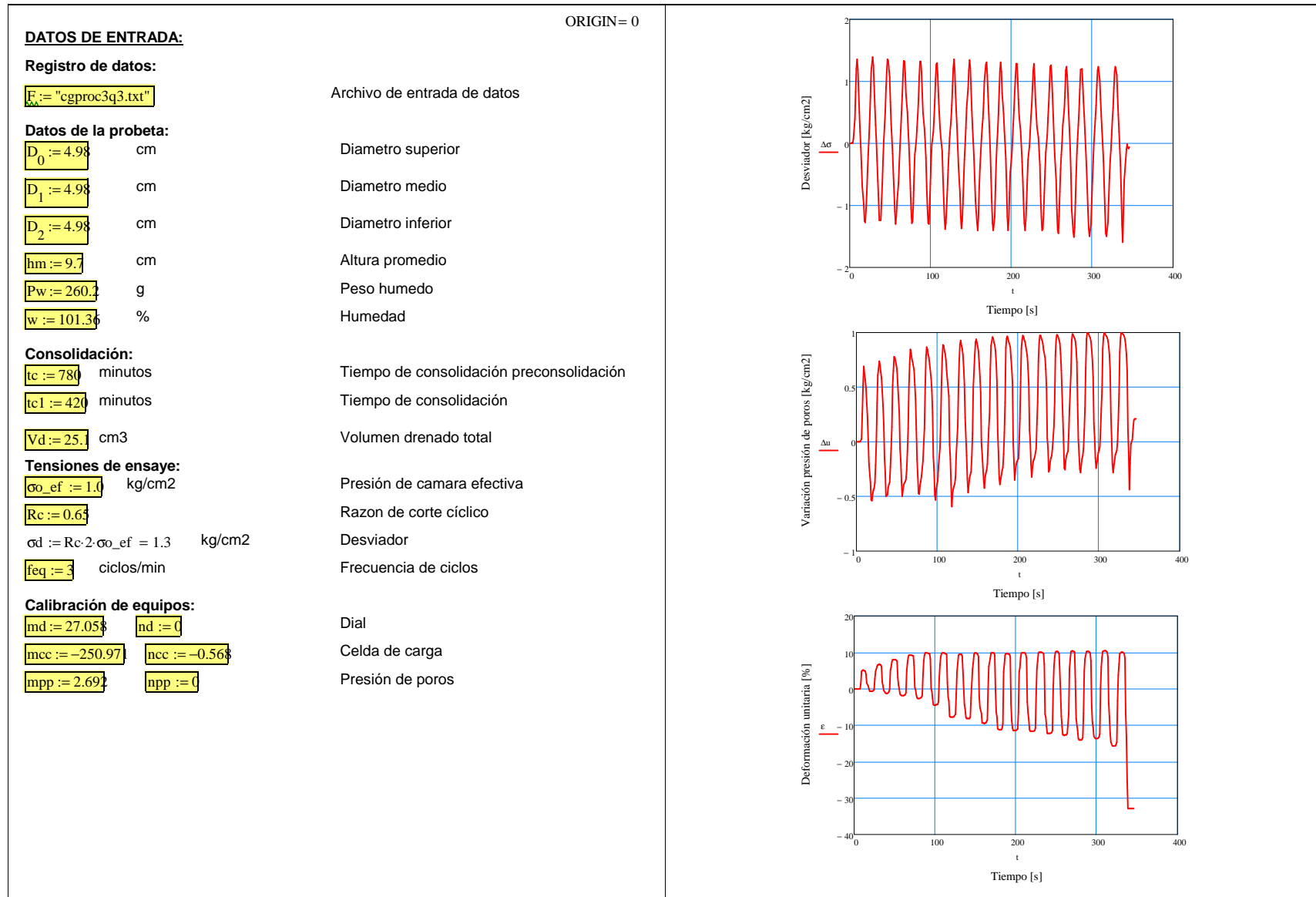


A.4.- Probetas Remoldeadas Preconsolidadas

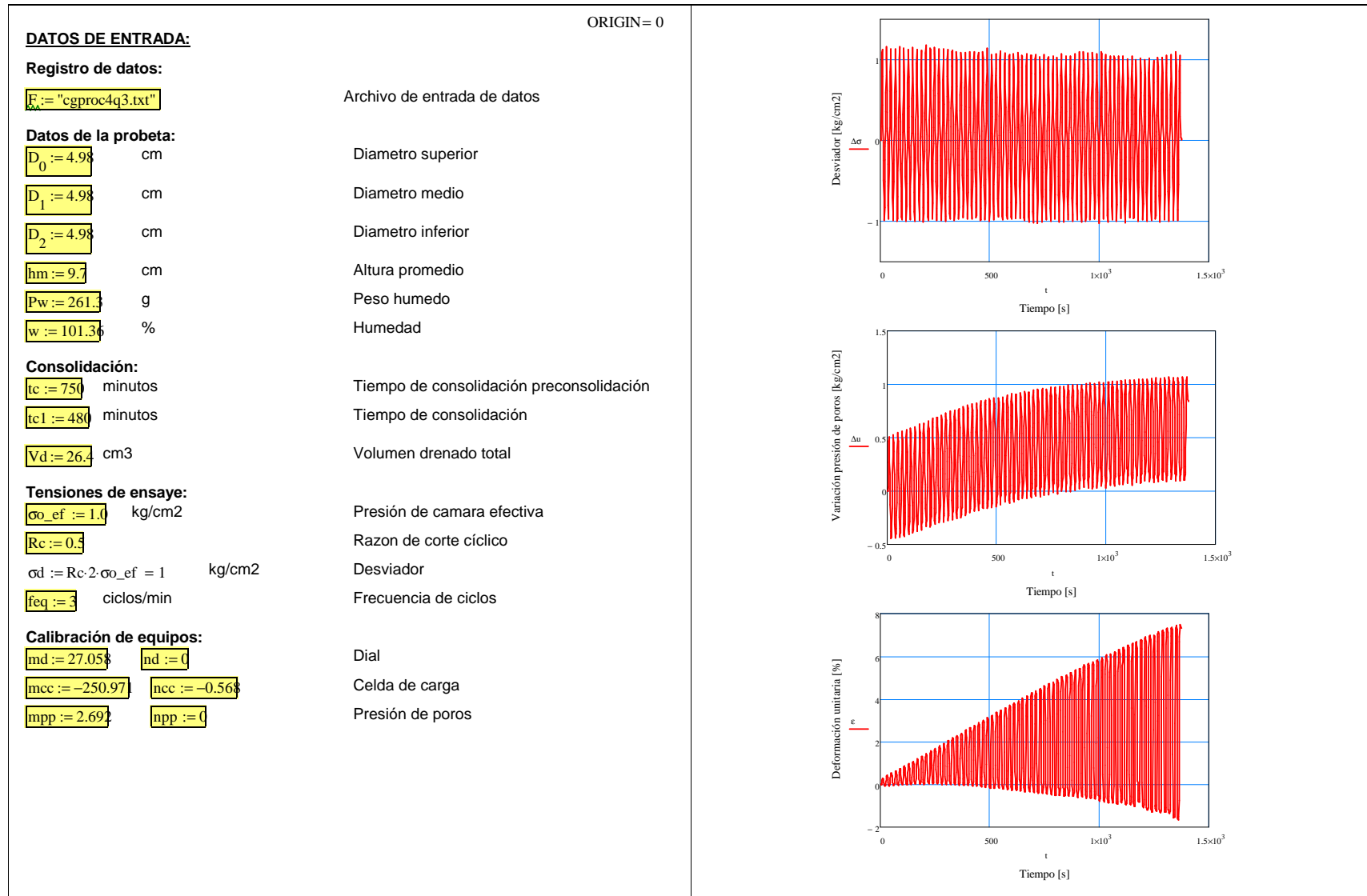
A.4.- Triaxial Cíclico: Probetas Remoldeadas Preconsolidadas



A.4.- Triaxial Cíclico: Probetas Remoldeadas Preconsolidadas

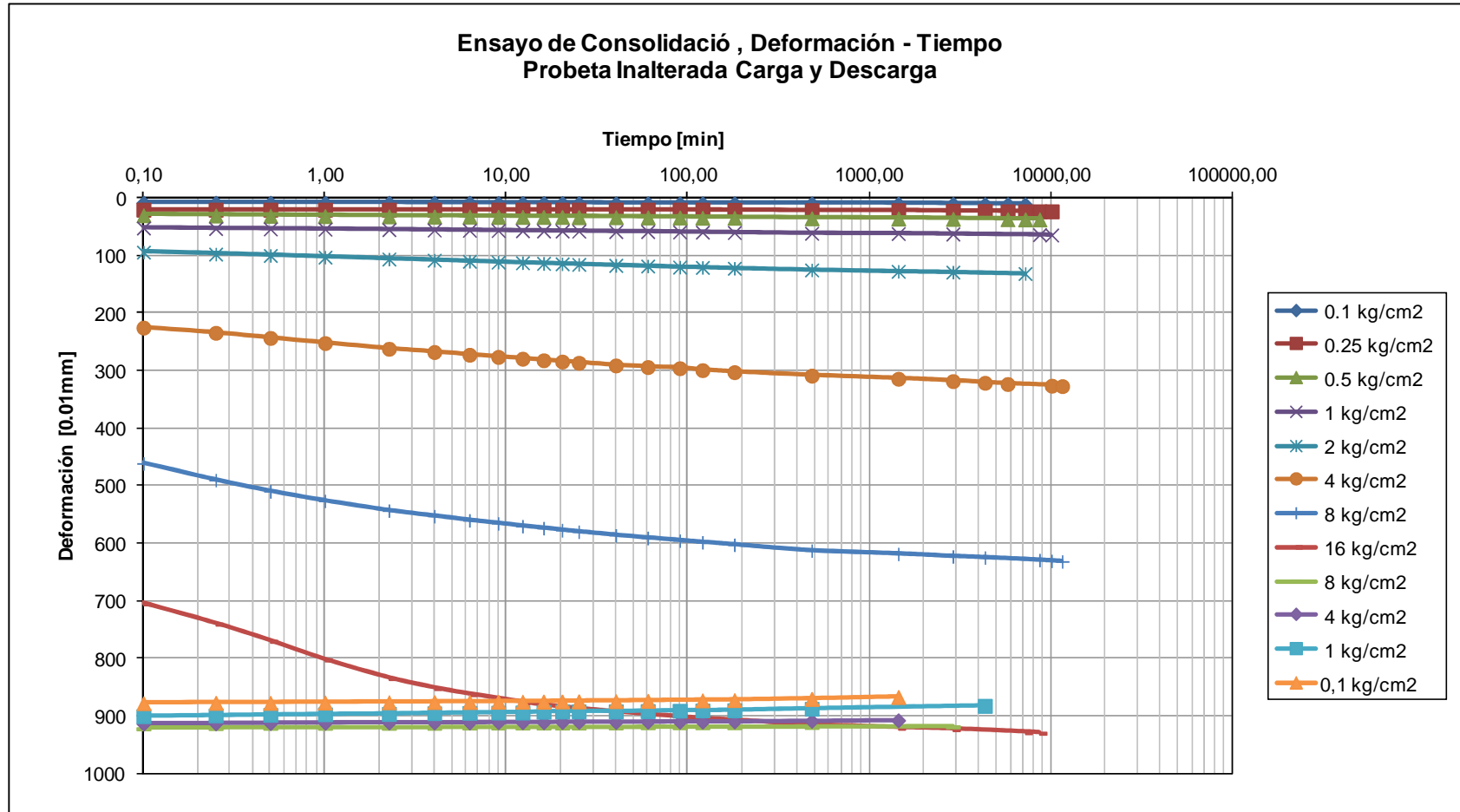


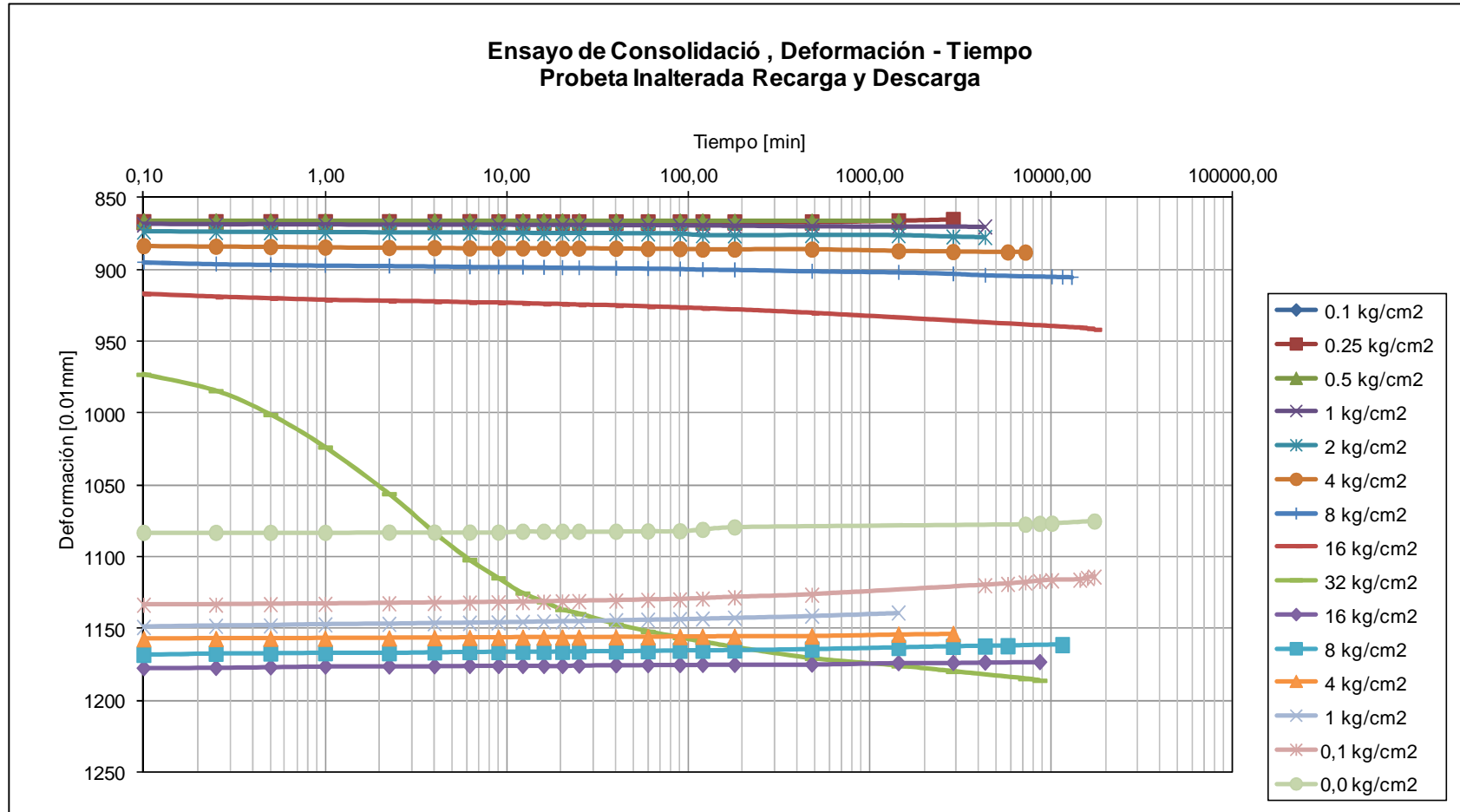
A.4.- Triaxial Cíclico: Probetas Remoldeadas Preconsolidadas

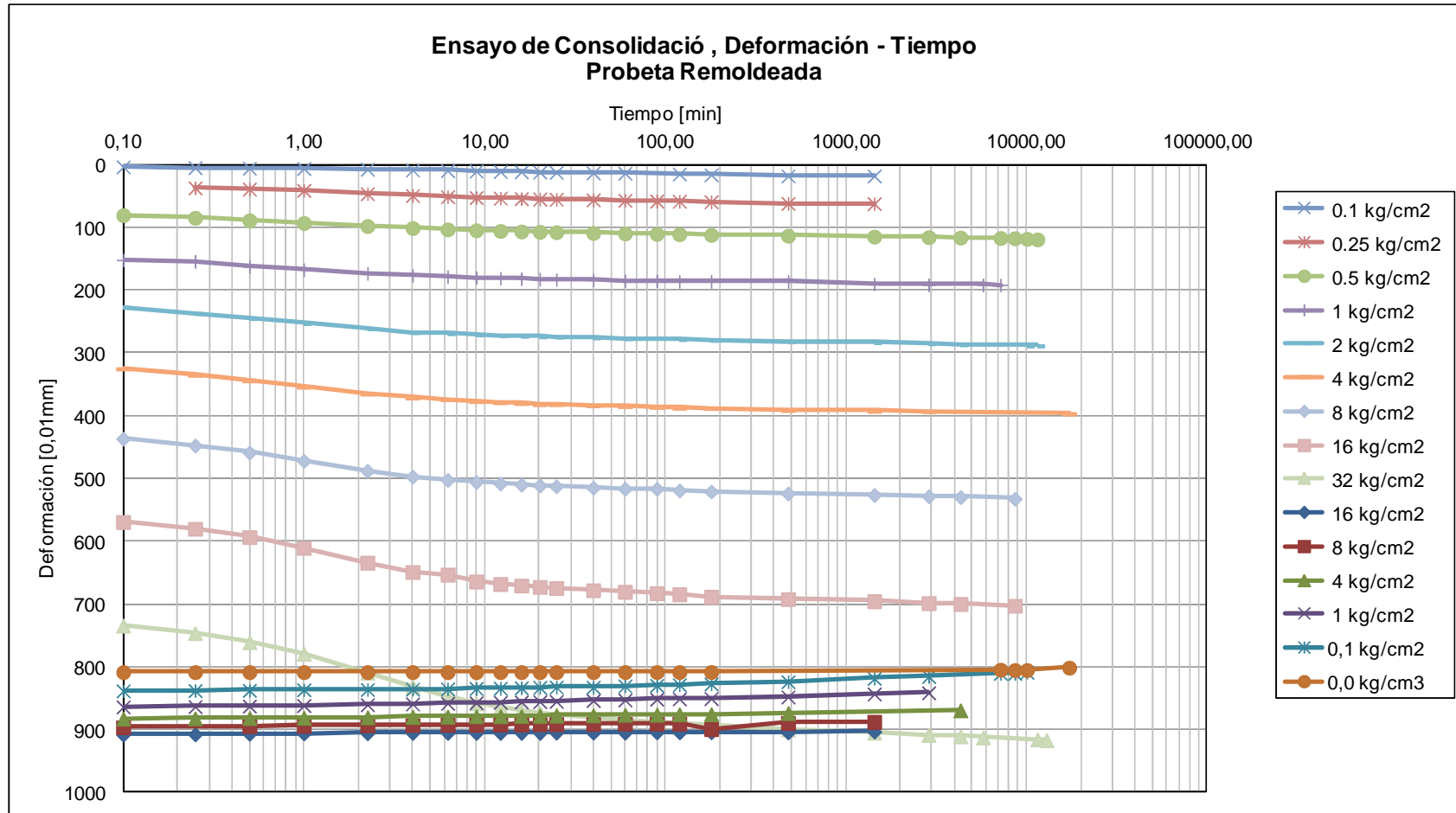


**ANEXO B: ENSAYES DE CONSOLIDACIÓN
TRUMAO**

B.1.- Deformación – Tiempo, Serie de Ensayos 1







B.2.- Deformación – Tiempo, Serie de Ensayos 2

