



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD ZACATENCO**



**INFLUENCIA DEL GAS METANO EN
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS
DE LA ARCILLA MARINA**

**TESIS DE MAESTRÍA
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN MECÁNICA DE SUELOS**

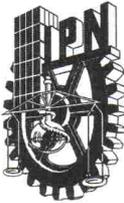
PRESENTA

RAÚL NAVA CASTRO

**M. en C. Carlos R. Torres A.
Director Interno**

**Ph.D. Jean M. E. Audibert
Director Externo**

2010



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F. siendo las 18:00 horas del día 19 del mes de febrero del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z. para examinar la tesis titulada:
"Influencia del gas metano en las propiedades mecánicas de la arcilla marina".

Presentada por el alumno:

Nava
Apellido paterno

Castro
Apellido materno

Raúl
Nombre(s)

Con registro:

A	9	4	0	3	2	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN MECÁNICA DE SUELOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Jean Marie Emmanuel Audibert

M. en C. Carlos Roberto Torres Álvarez

Dr. Esteban Flores Méndez

Dr. Héctor Aureliano Sánchez Sánchez

Dr. Norberto Domínguez Ramírez

~~PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES~~



M. en C. Pino Durán Escamilla
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 22 del mes de junio del año 2010 el que suscribe Raúl Nava Castro, alumno del Programa de Maestría en Mecánica de Suelos con número de registro A940323 adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura – Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Carlos Roberto Torres Álvarez y el Dr. Jean Marie Emmanuel Audibert y cede los derechos del trabajo intitulado: Influencia del gas metano en las propiedades mecánicas de la arcilla marina, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

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



Raúl Nava Castro



PJ

JMEA

WD

AL RECUERDO...

CRTA

NADT

NADE

AL SUEÑO...

FCM

DERA

FMMG

**A LO INTANGIBLE E
INCONMENSURABLE...**

FCI

TU APOYO

ARDI

LLCC

CASTRO

KC

MM

PER

HP



ÍNDICE

RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS	v
SIMBOLOGÍA	xi
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	
I.1. Antecedentes	6
I.1.1. Presencia de gas en suelos marinos	7
a. Norton Sound, 1976 (Sur de Nome, Alaska)	8
b. Campo Banzala, 1981(Costa fuera de Cabinda, Angola)	8
c. Campo Oseberg y Campo Brage, 1983 (Mar del Norte)	9
d. Togi, Este de Troll, 1987 (Mar del Norte)	9
e. Campo Tchibouela, 1988 (Costa fuera del Congo, África)	9
f. Área Gullfaks C, 1988 (Mar del Norte)	10
g. Troll, 1989 (Mar del Norte)	11
h. Dagmar, 1990 (Mar del Norte)	11
i. Chek Lap Kok, Lamma Island y Green Island, 1990 (Costa fuera de Hong Kong)	11
j. Sureste de Tyra, 1990 (Mar del Norte)	12
k. Campo Duyong B, 1993 (Costa Fuera de Malasia)	12
l. Campo NAM, 1995 (Costa fuera de Holanda)	13
l. Campo Oseberg, 1996 (Mar del Norte)	13
I.1.2. Presencia de gas en la Sonda de Campeche	14
a. POOL-D, 1989	14
b. AKAL-H, 1998	14
c. AKAL-GR, 1998	15
I.2. Justificación del estudio	16
I.3. Objetivos del estudio	17
I.4. Alcances	17
I.5. Hipótesis del estudio	18
CAPÍTULO II. EL GAS EN SEDIMENTOS MARINOS	
II.1. Gas biogénico y petrogénico	21
a. Gas biogénico	21
b. Gas petrogénico	22
II.2. Identificación de acumulaciones de gas	22



II.3. Comportamiento del suelo	23
II.4. Modelos conceptuales de la presencia de gas en los sedimentos marinos	24
a. Estructura de Suelo con Pequeñas Burbujas de Gas	25
b. Estructura de Suelo con Burbujas de Gas	26
c. Estructura de Suelo con Inclusiones de Gas	27
d. Estructura de Suelo con Grandes Inclusiones de Gas	28
e. Estructura de Suelo con Vacíos de Gas	29
 CAPÍTULO III. MUESTRAS DE ARCILLA MARINA RECONSTITUIDAS CON GAS METANO	
III.1. Métodos para reconstituir muestras de suelos parcialmente saturados.....	35
Método de compactación	35
Método de secado de suelo saturado	35
Método de presión de succión	36
Método de creación de burbujas con zeolita	36
Método de intercambio de agua de poro	36
III.2. Técnica empleada para reconstituir muestras de arcilla marina con gas metano	36
III.2.1. Propiedades de la zeolita	37
III.2.2. Experimentos con zeolita	39
III.2.3. Preparación de las muestras de arcilla marina con gas metano	44
III.2.4. Características de la prueba de consolidación unidimensional	46
III.2.5. Apariencia de la arcilla marina con gas metano	47
III.3. Pruebas de consolidación unidimensional para reconstituir muestras de arcilla marina sin y con gas metano	49
III.3.1. Nomenclatura	49
III.3.2. Análisis de los resultados de la arcilla marina blanda sin y con gas metano..	49
III.3.2.1. Etapa de descarga de la arcilla marina blanda sin y con gas	56
III.3.2.2. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas	57
III.3.3. Análisis de los resultados de la arcilla marina media sin y con gas metano ..	58
III.3.3.1. Curvas de descarga de la arcilla marina media sin y con gas metano ..	67
III.3.2.1. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas	68
 CAPÍTULO IV. ENSAYES DE LABORATORIO	
IV.1. Pruebas de consolidación a deformación constante.....	71
IV.1.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano	72
IV.1.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano	92
IV.2. Pruebas de veleta miniatura	111
IV.2.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano	112
IV.2.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano	116



IV.3. Pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas, con medición de presión de poro	122
IV.3.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano	123
IV.3.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano	126
IV.4. Pruebas estáticas y rápidas de corte simple directo	129
IV.4.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano	130
IV.4.1.1. Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora	130
IV.4.1.2. Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora	135
IV.4.1.3. Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora ..	140
IV.4.1.4. Efectos de la velocidad de deformación	145
IV.4.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano	146
IV.4.2.1. Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora	146
IV.4.2.2. Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora	150
IV.4.2.3. Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora ..	154
IV.4.2.4. Efectos de la velocidad de deformación	158
IV.5. Propiedades índice	159
IV.5.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano	159
IV.5.1.1. Límites de Atterberg	159
IV.5.1.2. Peso específico relativo de los sólidos	161
IV.5.1.3. Peso volumétrico	162
IV.5.1.4. Grado de saturación	163
IV.5.1.5. Relación de vacíos y porosidad	163
IV.5.1.6. Radiografías con Rayos X	165
IV.5.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano	165
IV.5.2.1. Límites de Atterberg	165
IV.5.2.2. Peso específico relativo de los sólidos	167
IV.5.2.3. Peso volumétrico	168
IV.5.2.4. Grado de saturación	169
IV.5.2.5. Relación de vacíos y porosidad	169
IV.5.2.6. Radiografías con Rayos X	171
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
V.1. Conclusiones	175
V.1.1. Pruebas de consolidación unidimensional	175
V.1.2. Pruebas de consolidación a deformación constante	176
V.1.3. Pruebas de veleta miniatura	177
V.1.4. Pruebas triaxiales con medición de presión de poro	178
V.1.5. Pruebas de corte simple directo	178
V.2. Recomendaciones	180
V.3. Trabajos a Futuro	180



BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICE A. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN, OBTENIDOS DURANTE LA RECONSTITUCIÓN DE LAS MUESTRAS DE ARCILLA SIN Y CON GAS METANO.

APÉNDICE B. PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN A DEFORMACIÓN CONSTANTE. DETALLES Y RESULTADOS ADICIONALES.

APÉNDICE C. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA MEDIR LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE. DETALLES Y RESULTADOS ADICIONALES.



Relación de tablas y figuras

Tablas

Tabla	Página
Tabla III.1. Intervalos de carga utilizados durante la consolidación del lodo arcilloso marino..	47
Tabla IV.1. Presión de preconsolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano	76
Tabla IV.2. Presión de preconsolidación de la prueba CRS para la arcilla media sin y con gas.....	95
Tabla IV.3. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	112
Tabla IV.4a. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media sin gas metano	116
Tabla IV.4b. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media con gas metano.....	117
Tabla IV.5. Resultados de las pruebas triaxiales UU_{u_w} y $UU_{u_{wg}}$. Arcilla blanda sin y con gas metano	123
Tabla IV.6. Resultados de las pruebas triaxiales UU_{u_w} y $UU_{u_{wg}}$. Arcilla media sin y con gas metano	126
Tabla IV.7. Características esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora	130
Tabla IV.8. Características normalizadas esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora	132
Tabla IV.9. Características esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora	135
Tabla IV.10. Características esfuerzo-deformación normalizadas de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora	137
Tabla IV.11. Características esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora	140
Tabla IV.12. Características normalizadas esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora	142
Tabla IV.13. Características esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora	146
Tabla IV.14. Características normalizadas esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora	147
Tabla IV.15. Características esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora	150



Tabla	Página
Tabla IV.16. Características normalizadas esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora	151
Tabla IV.17. Características esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora	154
Tabla IV.18. Características esfuerzo-deformación normalizadas de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora	155

Figuras

Figura	Página
Figura II.1. Estructura de suelo con pequeñas burbujas de gas.....	26
Figura II.2. Estructura de suelo con grandes burbujas de gas	27
Figura II.3. Estructura de suelo con grandes inclusiones de gas	28
Figura II.4. Estructura de suelo con fase continua de gas y agua	28
Figura II.5. Estructura de suelo con vacíos de gas	30
Figura III.1. Cristal de zeolita.....	37
Figura III.2. Estructura molecular de la zeolita (ZSM-5).....	38
Figura III.3. Burbujas de gas en agua	40
Figura III.4. Experimento para medir el volumen de gas metano	41
Figura III.5. Curvas de volumen de gas metano	42
Figura III.6. Experimento para medir la presión del gas metano	43
Figura III.7. Presión generada por el gas metano (experimento con zeolita al 7 y 15 por ciento).....	43
Figura III.8. Equipo empleado para reconstituir la arcilla marina.....	45
Figura III.9. Burbujas de gas metano en una muestra reconstituida de arcilla marina.....	46
Figura III.10. Arcilla blanda con gas metano al 7 por ciento antes (a) y después (b) de la prueba de consolidación a deformación constante	47
Figura III.11. Rayos X de una muestra de arcilla marina con gas metano	48
Figura III.12. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano, obtenidas durante el primer intervalo de carga	50
Figura III.13. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano, obtenidas durante el segundo intervalo de carga.....	52
Figura III.14. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano, obtenidas durante el tercer intervalo de carga	53



Figura	Página
Figura III.15a. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano, obtenidas durante el cuarto intervalo de carga.....	55
Figura III.15b. Parte de la curva de consolidación SZ15C4	55
Figura III.16. Curvas de descarga de la arcilla blanda sin y con gas metano.	57
Figura III.17. Curvas de compresibilidad de la arcilla blanda sin y con gas metano.	58
Figura III.18. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el primer intervalo de carga	59
Figura III.19. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el segundo intervalo de carga.....	60
Figura III.20. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el tercer intervalo de carga	62
Figura III.21. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el cuarto intervalo de carga.....	63
Figura III.22a. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el quinto intervalo de carga.....	64
Figura III.22b. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con el 7 por ciento de gas metano, obtenidas durante el quinto intervalo de carga.....	65
Figura III.23a. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el sexto intervalo de carga	66
Figura III.23b. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con el 7 por ciento de gas metano, obtenidas durante el último intervalo de carga	66
Figura III.24. Curvas de descarga de la arcilla marina media sin y con gas metano	67
Figura III.25. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano	68
Figura IV.1a. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano....	73
Figura IV.1b. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano (Método de Becker).....	74
Figura IV.2. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano ..	77
Figura IV.3. Conductividad hidráulica de la arcilla marina blanda sin y con gas metano	79
Figura IV.4. Presión de poro de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.....	80
Figura IV.5a. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano....	81
Figura IV.5b. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano (Método de Becker).....	83
Figura IV.6. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano ..	84
Figura IV.7. Conductividad hidráulica de la arcilla marina blanda sin y con gas metano	85
Figura IV.8. Presión de poro de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.....	86
Figura IV.9. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.....	87
Figura IV.10. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano (Método de Becker).....	88



Figura	Página
Figura IV.11. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano	89
Figura IV.12. Conductividad hidráulica de la arcilla marina blanda sin y con gas metano	90
Figura IV.13. Presión de poro de la arcilla marina blanda sin y con gas metano	91
Figura IV.14a. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano...	92
Figura IV.14b. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano (Método de Becker).....	93
Figura IV.15. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina media sin y con metano	96
Figura IV.16. Conductividad hidráulica de la arcilla marina media sin y con gas metano	97
Figura IV.17a. Presión de poro de la arcilla marina media sin y con gas metano	98
Figura IV.17b. Presión de poro de la arcilla marina media sin y con gas metano (Detalle)	98
Figura IV.18a. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano...	99
Figura IV.18b. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano (Método de Becker).....	101
Figura IV.19. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano .	102
Figura IV.20. Curva de Conductividad hidráulica de la arcilla marina media sin y con gas metano	103
Figura IV.21. Presión de poro de la arcilla marina media sin y con gas metano	104
Figura IV.22. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano.....	105
Figura IV.23. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano (Método de Becker).....	106
Figura IV.24. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano .	107
Figura IV.25. Conductividad hidráulica de la arcilla marina media sin y con gas metano	108
Figura IV.26a. Presión de poro de la arcilla marina media sin y con gas metano	109
Figura IV.26b. Presión de poro de la arcilla marina media con gas metano	109
Figura IV.27. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano	113
Figura IV.28. Resistencia residual al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano	114
Figura IV.29. Resistencia remodelada al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano	115
Figura IV.30. Resistencia residual y remodelada al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	116
Figura IV.31. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano	118
Figura IV.32. Resistencia residual al esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano	119
Figura IV.33. Resistencia remodelada al esfuerzo cortante de la arcilla media	120
Figura IV.34. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano	121



Figura	Página
Figura IV.35. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano	124
Figura IV.36. Presión de poro de la arcilla blanda sin y con gas metano	125
Figura IV.37. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano	127
Figura IV.38. Presión de poro de la arcilla media sin y con gas metano	128
Figura IV.39. Equipo de corte simple directo	129
Figura IV.40. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano	131
Figura IV.41. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano	133
Figura IV.42. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla sin y con gas metano	134
Figura IV.43. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano	136
Figura IV.44. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano	138
Figura IV.45. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla sin y con gas metano	139
Figura IV.46. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano	141
Figura IV.47. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano	143
Figura IV.48. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano	144
Figura IV.49. Efectos de la velocidad de deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano	145
Figura IV.50. Esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas metano	146
Figura IV.51. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla sin y con gas metano	148
Figura IV.52. Esfuerzo vertical normalizado de la arcilla sin y con gas metano	149
Figura IV.53. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano	150
Figura IV.54. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano	152
Figura IV.55. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla media sin y con gas metano	153
Figura IV.56. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano	154
Figura IV.57. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano	156
Figura IV.58. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla mediana sin y con gas metano	157
Figura IV.59. Efectos de la velocidad de deformación de la arcilla media sin y con gas metano	159
Figura IV.60. Carta de plasticidad de la arcilla blanda sin y con gas metano	160
Figura IV.61. Índice de liquidez de la arcilla blanda sin y con gas metano	160
Figura IV.62. Peso específico relativo de los sólidos de la arcilla blanda sin y con gas metano	161



Figura	Página
Figura IV.63. Peso volumétrico total de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	162
Figura IV.64. Peso volumétrico seco de la arcilla blanda sin y con gas metano	163
Figura IV.65. Grado de saturación de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	164
Figura IV.66. Relación de vacíos y porosidad de la arcilla blanda sin y con gas metano	164
Figura IV.67. Radiografías de rayos X de la arcilla blanda con gas metano al 7 por ciento	165
Figura IV.68. Carta de plasticidad de la arcilla media sin y con gas metano	166
Figura IV.69. Índice de liquidez de la arcilla media sin y con gas metano.	166
Figura IV.70. Peso específico relativo de los sólidos de la arcilla media sin y con gas metano	167
Figura IV.71. Peso volumétrico total de la arcilla media sin y con gas metano.....	168
Figura IV.72. Peso volumétrico seco de la arcilla media sin y con gas metano	169
Figura IV.73. Grado de saturación de la arcilla media sin y con gas metano.....	170
Figura IV.74. Relación de vacíos y porosidad de la arcilla media sin y con gas metano	170
Figura IV.75. Rayos X de la arcilla media con gas metano al 15 por ciento	171



SIMBOLOGÍA

Símbolo	Significado
EZ7VM	E = experimento
EZ15PM	S = blanda
SZ7C	F = media
FZ15C	Z = zeolita; seguida de un numero indica el porcentaje empleado
FZ15D	V = volumen
	P = Presión
	M = metano
	C = intervalo de carga
	D = descarga
e	Relación de vacíos
e_g	Relación de vacíos del gas
e_o	Relación de vacíos inicial
e_f	Relación de vacíos final
e_w	Relación de vacíos del agua
e_{50}	Relación de vacíos al 50 por ciento de la consolidación
G_s	Peso específico relativo de los sólidos
G_s	Módulo secante
G_T	Módulo tangente
h_o	Altura inicial de la muestra
h_f	Altura final de la muestra
IL	Índice de liquidez
IP	Índice plástico
k	Conductividad hidráulica o permeabilidad
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
MV_u MV_{res} MV_{rem}	MV = veleta miniatura u = resistencia inalterada res = resistencia residual rem = remoldeada remoldeada
n_o	Porosidad inicial
P_o	Presión de preconsolidación
S_o	Grado de saturación inicial



Símbolo	Significado
S_r	Grado de saturación
S_u	Resistencia inalterada al esfuerzo cortante
$S_{u,res}$	Resistencia residual al esfuerzo cortante
$S_{u,rem}$	Resistencia remoldeada al esfuerzo cortante
u_w	Presión del agua de poro
u_g	Presión del gas
u_{wg}	Presión del agua de poro y del gas metano
W	Trabajo por unidad de volumen
ϵ_a	Deformación axial
$\epsilon'_{v,c}$	Deformación a la presión de consolidación vertical
$d\epsilon$	Incremento de deformación
γ	Deformación al corte
γ_s	Peso volumétrico seco
γ_T	Peso volumétrico total
$\gamma_{t,o}$	Peso volumétrico total inicial
$\gamma_{t,f}$	Peso volumétrico total final
σ'_p	Presión de preconsolidación interpretada
σ_{avg}	Esfuerzo total
$\sigma'_{v,avg}$	Promedio del esfuerzo vertical
σ'_v	Esfuerzo vertical efectivo
$\sigma'_{v,c}$	Presión de consolidación vertical efectiva
$\Delta \sigma'_v / \sigma'_{v,c}$	Decremento del esfuerzo vertical, respecto a la presión de consolidación efectiva
ϕ'_{dss}	Relación de esfuerzos
τ_h	Esfuerzo cortante (horizontal)
τ_h / σ'_v	Esfuerzo cortante normalizado, respecto a la presión de consolidación efectiva
$\tau_h / \sigma'_{v,c}$	Esfuerzo cortante normalizado, respecto al esfuerzo vertical efectivo
ω	Contenido de agua
ω_o	Contenido de agua inicial
ω_ϕ	Contenido de agua final



Resumen

Para entender el comportamiento de una arcilla conteniendo gas metano, se requieren conocer parámetros de compresibilidad y de resistencia provenientes de pruebas de laboratorio y de campo, tal como se realiza para una arcilla sin gas. Para ello, se requieren muestras de arcilla inalteradas con gas metano; sin embargo, las técnicas de muestreo empleadas no son las más adecuadas, ya que no evitan la alteración de la muestra durante su recuperación, siendo mayor para una muestra conteniendo gas, debido a la expansión del gas conforme disminuye la presión confinante en el suelo.

Una alternativa para obtener parámetros mecánicos de una arcilla conteniendo gas metano, es efectuar ensayos en laboratorio a muestras reconstituidas de arcilla con gas; para ello se reconstituyeron muestras de arcilla marina blanda y media con cero, 7 y 15 por ciento de zeolita saturada con gas metano, en peso.

En los resultados obtenidos de las pruebas de consolidación por incrementos para reconstituir las muestras de arcilla, se encontró que se requiere mayor carga en las muestras de arcilla con gas para obtener el mismo grado de consolidación que en la arcilla sin gas metano y también se encontró, en las curvas de compresibilidad (pruebas de consolidación a deformación constante), que la arcilla con mayor contenido de gas genera cierta reacción ante la carga, deducido esto porque la curva se desplaza ligeramente hacia la derecha de la curva de la arcilla con menor contenido de gas metano.

En lo que respecta a los resultados obtenidos para determinar las características del esfuerzo cortante se encontró en las pruebas de veleta miniatura realizadas en la arcilla blanda que la resistencia al esfuerzo cortante generalmente disminuye con la presencia del gas metano. Mientras que en la arcilla marina media se observó un ligero incremento a mayor contenido de gas, pero menor resistencia que en la arcilla sin gas metano.

En cuanto a las pruebas triaxiales se encontró que la resistencia inalterada al esfuerzo cortante se reduce con el contenido de gas en la arcilla blanda, mientras que en la arcilla media la resistencia es superior a mayor contenido de gas, pero sin cambiar el modo de falla en ambas consistencias de la arcilla.

En lo que se refiere a la resistencia al esfuerzo cortante normalizada (pruebas de corte simple directo) correspondiente a la arcilla marina blanda se encontró un ligero incremento en la resistencia normalizada en la arcilla con 7 por ciento de gas metano, independientes a la velocidad



de deformación. En el caso de la arcilla con mayor contenido de gas se presenta un ligero decremento en la resistencia al esfuerzo cortante normalizada cuando la muestra se deforma a 100 y 1 000 por ciento por hora, pero presenta la misma resistencia normalizada cuando la muestra se ensaya estáticamente.

En los resultados obtenidos para la arcilla media sin y con gas metano se encontró que cuando la muestra de arcilla se ensaya estáticamente (5 por ciento de deformación por hora) y a una velocidad de 1 000 por ciento de deformación por hora, la resistencia al esfuerzo cortante normalizada se reduce ligeramente con el contenido de gas metano.

Se infiere de los resultados, que el comportamiento presentado por la arcilla con gas metano se genera debido al confinamiento que proporcionan las láminas de arcilla al gas, resultando en una transferencia parcial de la carga aplicada de las burbujas de gas y del agua de poro a la estructura de la arcilla, generándose así, una nueva estructura compuesta por la arcilla, el agua de poro y el gas metano, cuyo comportamiento puede ser explicado y predecido.

En esta nueva estructura el gas permanece confinado por las láminas de arcilla, comportándose, hasta cierto nivel de carga, como un resorte o amortiguador, aumentando su rigidez y, al mismo tiempo, la rigidez de la estructura a medida que aumenta la carga aplicada, siendo mayor a mayor contenido de gas metano, hasta que la carga aplicada sobrepasa los esfuerzos de confinamiento proporcionados por las fuerzas intermoleculares desarrolladas por las láminas de arcilla.



Abstract

To understand the behavior of clay soil containing gas, it is necessary to know the compressibility and strength parameters derived from field and laboratory tests, as done for clay sediments without gas. For that, undisturbed clay samples containing methane gas are required, however, the sampling techniques are not adequate, because it is not possible to avoid sample disturbance during sampling, which is higher for a sample containing gas, due the gas expansion as the confining pressure is reduced.

An alternative method for obtaining mechanical parameters of clay containing methane gas is to perform laboratory test on reconstituted samples of clay containing gas; for this reason, soft and medium clay samples without gas and with 7 and 15 percent by weight of zeolite saturated with methane gas have been reconstituted. The following tests were performed:

Results from the incremental consolidation tests indicated that higher loads were required to consolidate the clay samples containing methane gas to obtain the same degree of consolidation as for the clay without gas and, also, it was found from the compressibility curves (controlled rate of strain tests) that the clay with higher gas content generate certain reaction when a load is applied, as indicated by the fact that the compressibility curve is slightly displaced to the right of the curve for the sample with less gas.

Regarding the tests to determine the shear strength characteristics of the clay, it was found that the minivane shear strength for the soft clay is reduced as the gas content increases. However, for the firm clay samples, the undisturbed shear strength becomes higher as the gas content increases.

Concerning to the triaxial tests, it was found that the undisturbed shear strength of the soft clay is reduced as the gas content increases; however, in the firm clay samples, the undisturbed shear strength becomes higher as the gas content increases. However, there is no change in the failure mode for both clay consistencies.

As regards the normalized shear strength (direct simple shear tests) of the soft clay, a slight increase in normalized shear strength was noticed for the clay with 7 percent of methane gas, independent of the rate of deformation. However, for the clay with higher gas content, a slight decrease in the normalized shear strength was noted when a rate of 100 and 1,000 percent of deformation per hour is applied, although the same normalized static shear strength was recorded.



The results for the firm clay without and with methane gas indicated that the normalized shear strength is slightly reduced with increased the gas content, when the clay is tested statically and at a rate of 1,000 percent of deformation per hour.

It is theorized that the behavior of the clay with methane gas is related to the confinement provided by the clay platelets to the methane gas, thus generating a partial load transfer from the gas and pore water to the clay structure and, thus, forming a new type of clay micro-structure composed by the pore water, methane gas and clay particles, whose behavior can be explained and predicted.

It is assumed that, in this “new structure”, the gas remains confined by the clay platelets and behaves, up to a certain level of load, as a shock absorber, thus, increasing the rigidity of the gas, at the same time as it increases the rigidity of the structure, as long as the load increases, being higher for a higher gas content in the clay, and until the applied load exceeds the confining stress provided by the intermolecular forces developed by the clay particles.



INFLUENCIA DEL GAS METANO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ARCILLA MARINA



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN



Antes de instalar plataformas marinas para explotar los yacimientos de crudo es necesario efectuar estudios geofísicos y geotécnicos para evaluar las condiciones del terreno de cimentación. Es con los parámetros obtenidos de los ensayos «in situ», así como con los adquiridos en laboratorio, que se determinan los parámetros para el diseño de las cimentaciones.

Actualmente se está presentando un problema complejo en las zonas petroleras: la presencia de gas bajo o circundando las plataformas marinas. El gas dentro de la estructura del suelo puede modificar las propiedades mecánicas de los suelos y, por lo tanto, tener repercusiones importantes en las plataformas o estructuras existentes y, en el caso de nuevas estructuras, posibles cambios en el diseño de sus cimentaciones, debido al posible efecto en las propiedades ingenieriles del suelo de cimentación.

En investigaciones efectuadas en sedimentos marinos con burbujas de gas, se ha encontrado que las burbujas pueden presentarse en alguna de las dos condiciones siguientes:

1. En forma de pequeñas burbujas ocluidas en el suelo dentro del poro de agua. En este caso, el mayor efecto de estas burbujas es solamente cambiar la compresibilidad del fluido de poro. (Okusa, 1985)
2. Burbujas de gas mucho más grandes que los espacios vacíos normales, en sedimentos de granos finos, como partículas del tamaño de la arcilla y limo, lo que significa que las burbujas de gas no encajan dentro de los vacíos normales de los espacios del suelo y consecuentemente puede haber un efecto importante en el comportamiento del suelo.

El gas que se deposita en los estratos superiores puede ser gas que migra de los yacimientos de petróleo (gas petrogénico) como es común a lo largo de planos de falla. Pero también puede ser producto de la descomposición bacteriana (gas biogénico). Existe la teoría de la industria petrolera, de que puede existir migración o rutas potenciales de flujo de gas a través de la tubería, generadas durante la cimentación y fraguado, a lo largo de la interfase camisa-cemento, por filtración de las burbujas de gas a través del cemento no fraguado y a través de fallas o canales.

La migración del gas se presenta tanto en suelos finos como granulares, aunque geólogos por décadas han pensado que las arcillas impiden la migración de fluidos, pero existen estudios en los que se han encontrado fluidos migrando a través de considerables espesores de arcillas y de esquistos. Probablemente Quirke (1930) fue uno de los primeros geólogos en reconocer el relativo



poder de la fuerza de erosión generada por la filtración a través de la interfase agua-sedimento. El gas profundo dentro de la tierra como metano, dióxido de carbono y algunos otros compuestos se considera que pueden migrar de las profundidades hacia la superficie, acorde a la hipótesis de Gold y Soter (1980).

En los sedimentos marinos se consideran tres zonas de medioambientes biogeo-químicos (Claypool y Kaplan, 1974), del lecho marino hacia abajo:

1. Una zona aeróbica de oxidación e inmediatamente bajo la superficie del depósito, que produce dióxido de carbono;
2. Una zona anaeróbica de sulfato reducido (sulphate-reducing), generando dióxido de carbono y sulfuro hidrogenado;
3. Una zona anaeróbica de producción de metano que se extiende debajo de los límites bajos de acción bacterial en los sedimentos, que es asumida por arriba de los 1 000 metros bajo la superficie, donde la acción bacterial se interrumpe debido a la temperatura o por el aumento de productos tóxicos.

Esto indica que al menos dos tipos de gas metano pueden ser encontrados en los sedimentos superficiales:

1. metano termogénico que ha migrado hacia arriba de la fuente madura de roca y del yacimiento; y
2. metano biogénico que es producido en profundidades superficiales alrededor de los 1 000 metros en los sedimentos superficiales.

Los dos gases son marcadamente diferentes en su composición isotópica, lo que permite identificar el origen del metano. La diferencia entre fuentes termogénicas y biogénicas es también considerada como un indicativo de la relación del metano con la de hidrocarburos altos. Sin embargo, actualmente se ha encontrado que estas relaciones para identificar el origen del gas metano no son totalmente confiables, debido a que una vez que el gas metano alcanza las cercanías superficiales de los sedimentos se genera una oxidación lo que crea una variación en la relación original.

La migración vertical es fácilmente alcanzada por algunos compuestos de hidrocarburos, debido a la variación en la solubilidad, densidad y tamaño molecular (por ejemplo, todos los gases de hidrocarburo en el rango C1 a C8 son más movibles). De estos, el metano ha tenido el tamaño



molecular más pequeño y por lo tanto es el más móvil. Esto fue corroborado por Gold y Soter (1980), con base en experimentos de laboratorio, quienes propusieron que el gas metano abiogénico fluye hacia arriba, de la profundidad interior de la tierra pasando a través de los depósitos de arcilla (aluminosilicatos, silicatoaluminicos).

El gas acumulado en los estratos puede provocar riesgos potenciales durante los trabajos de perforación, debido a la posibilidad de encontrar inesperadamente gas presurizado a poca profundidad. Entre los efectos generados en las propiedades mecánicas del suelo por la presencia del gas, se encuentra el incremento del exceso de presión de poro y, como consecuencia, una disminución en el esfuerzo efectivo y, por lo tanto, se genera una menor carga a la estimada, si se compara con un suelo libre de gas; otro efecto es la disminución de la cohesión, debido a la presencia de burbujas de gas en el agua intersticial, propiedad que esta relacionada con la resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

Por otra parte, el gas al mezclarse con los sedimentos marinos ocupa los vacíos del suelo al desplazar el agua intersticial, lo que genera una presurización del mismo a mayor acumulación y una vez que se ha superado la resistencia del suelo, el gas acumulado migra provocando deformaciones verticales y, en algunas ocasiones, hace fallar al suelo. Si este fenómeno ocurre bajo una plataforma fija puede poner en riesgo la estabilidad de la estructura por la disminución, tanto de la capacidad de carga del terreno de cimentación, como de la resistencia unitaria de fricción de los pilotes. Es decir, debido a que el gas crea espacios o vacíos entre el pilote y las partículas de suelo, se forman canales de oquedades al presentarse una liberación de gas, reflejándose esto en una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante. Este fenómeno también se puede presentar en forma paulatina, pudiendo generar una pequeña erosión en el suelo alrededor de los pilotes, presentándose así reducción en la fricción del pilote con el suelo.

En ensayos efectuados a suelos granulares con gas para determinar su resistencia al esfuerzo cortante, se observó que a mayor concentración de gas la resistencia disminuía y, en consecuencia, se presenta una reducción en la resistencia del suelo de cimentación. También se encontró que la respuesta a la carga, en la escala de tiempo, está influenciada por la velocidad de la difusión del gas de poro, así como por las características de permeabilidad del suelo.

Otro de los efectos que se generan con la presencia de gas en los suelos marinos es que la relación entre contenido de gas y resistencia cambia con la presión del oleaje en el fondo, ya que esta comprime o expande las burbujas atrapadas en el agua de poro y se ha encontrado que la resistencia puede disminuir de un 80 a un 92 por ciento cuando ocurre licuación.



Los efectos del gas también se pueden observar en estudios geofísicos, es decir, las acumulaciones de gas en los sedimentos marinos tienen efectos en sus propiedades acústicas. Por ejemplo, en los registros obtenidos durante investigaciones geofísicas se presentan anomalías o zonas con disturbios acústicos que están relacionadas con las acumulaciones profundas o superficiales de gas y pueden representar zonas con presiones mayores que la hidrostática, particularmente cuando son definidas por reflexiones de alta amplitud y horizontes arqueados.

1.1. Antecedentes

A través del tiempo en el Golfo de México y en algunas partes del resto del mundo (Norton Sound, Alaska; Costa fuera de Cabinda, Angola; Mar del Norte; Costa fuera del Congo, África; Costa fuera de Hong Kong y Costa fuera de Malasia) se han presentado diversas emanaciones de gas o accidentes relacionados a la presencia del mismo, tales como incendios o vibraciones, poniendo en riesgo las estructuras localizadas costa fuera, tales como plataformas, barcos productores, ductos, entre otras.

Todas las estructuras marinas son susceptibles a sufrir daños durante las emanaciones de gas, por ejemplo, cuando se realiza una perforación con un «riser» y durante las operaciones de flotación ocurre una expulsión de gas, se trata de liberar el «riser» y alejarlo del sitio. Sin embargo, si la conexión de este falla al efectuarse un número significativo de intentos de alejarlo, la tubería de revestimiento se curva o fractura, con ángulos de 2 a 45 grados de inclinación, en algunos casos se han reportado ángulos que han excedido los 45 grados, pero estos infortunadamente no están totalmente documentados. La fractura, usualmente, ocurre inmediatamente bajo la línea de lodos y es que la fracturación-inclinación de la camisa y del pozo es resistida por la presión pasiva del suelo al moverse estos lateralmente.

En el caso de las plataformas, las inversiones para las instalaciones, equipo y pozos productores pueden ser grandes y el costo potencial de daños puede ser más grande que el de la unidad móvil de perforación en una expulsión de gas considerable. Tal es así, que los daños a pozos de control excedieron los 200 millones de dólares en 1991, para una plataforma, como consecuencia de la expulsión de gas superficial y en algunos otros casos extremos se han perdido las estructuras completamente.

Las plataformas son susceptibles a sufrir daño estructural en la cimentación debido a la formación de cráteres y en el caso de que estos se extiendan, la plataforma puede inclinarse o colapsarse completamente, en el peor de los casos. También las plataformas auto-elevables y



otros equipos soportados en la base son vulnerables a fallas en la cimentación, debido a que tienen piernas independientes o descansan sobre una base y, una vez formado el cráter, puede conducir a una volcadura, como ha sucedido en algunas plataformas auto-elevables. Ante este fenómeno y en algunas circunstancias, las estructuras pueden ser retiradas a otra localización, sin embargo, esto generalmente no es posible debido al riesgo de fuego y en el peor de los casos se pierde la plataforma auto-elevable.

En el caso de barcos productores con existencia de hidrocarburos que están unidos a tuberías o con instalaciones de manejo de hidrocarburos y con pozos activos se incrementa el riesgo de daños mayores, si la emanación de gas genera explosión y fuego, debido a que es difícil aislar las instalaciones de producción con un 100 por ciento de seguridad y es mayor el riesgo si están localizadas en una plataforma separada de un complejo.

A través del tiempo en que se han presentado emanaciones de gas se han implementado técnicas para controlar la presión generada durante la perforación, que van desde lodos más pesados hasta modelos matemáticos. En algunos casos, la técnica empleada para prevenir la migración es empleando una buena cementación primaria, que ha tenido un gran valor en la construcción de pozos, también, puede eliminarse tiempo y costo para remediar la cementación y además proveer áreas de trabajo seguras, ya que proporciona ambientes con ausencia de filtración o huecos de gas en las zonas cubiertas por la cementación primaria. Adicionalmente, puede ayudar a prevenir consecuencias más severas como la pérdida del control del pozo, colapso de las camisas y, en el peor de los casos, abandonar los pozos.

Otros ejemplos para controlar las emanaciones de gas, ha sido la instalación de pozos piloto, que es una perforación de pequeño diámetro y perforado bajo un juego previo de tuberías de revestimiento. Esta se usa cuando se están perforando secciones superficiales y se emplea para controlar o minimizar la proporción del volumen de gas. Los pozos piloto son una técnica viable para evaluar las zonas bajo las tuberías de revestimiento. Sin embargo, aún si los pozos piloto son perforados con máxima precisión, no garantizan que una explosión no sea posible.

1.1.1. Presencia de gas en suelos marinos

Existen antecedentes de emanaciones o acumulaciones de gas en suelos marinos, pero no todas han sido plenamente documentadas y de algunas de ellas solo se conocen pequeños detalles verbales.



Las áreas o localidades citadas a continuación, en orden cronológico, se describen de manera general. En algunos casos se han realizado estudios especializados para determinar la existencia de acumulaciones o bolsas de gas y solo en pocos casos se ha estudiado la variación de las propiedades mecánicas de los suelos. En varios de ellos se determinó que no existían posibles riesgos, sin embargo, se puede encontrar evidencia de la importancia de desarrollar estudios especializados para determinar la presencia e influencia del gas en los sedimentos marinos.

a. Norton Sound, 1976 (Sur de Nome, Alaska)

En el verano de 1976, se descubrió una acumulación de gas más pesado que el metano en la columna de agua de Norton Sound. El centro de la emanación coincidía con una zona de fallas que van de norte a oeste cerca de la superficie. Aunado a los resultados obtenidos de los estudios geofísicos, geotécnicos y del monitoreo por televisión y junto con las características químicas del gas, se dedujo, de esta manera, que el gas provenía de los yacimientos de petróleo (Holmes et al., 1978; Nelson et al., 1978 y Kvenvolden et al., 1979).

Para determinar el origen y la influencia del gas en el suelo se desarrolló en 1977 un estudio integral de geofísica, geotecnia, geoquímica y de monitoreo por televisión.

En los estudios geotécnicos realizados en los sedimentos someros con anomalías acústicas cerca de la superficie y en los cráteres en el lecho marino, se determinó la presencia de gas por el bajo porcentaje de saturación, por los mayores intervalos de penetración del cono penetrómetro y por las penetraciones más rápidas del muestreador por vibración. El porcentaje de saturación del agua de poro fue evaluado dividiendo la medida del volumen del agua entre el volumen del espacio de poro, que es la resta del volumen de las partículas sólidas en cada muestra del volumen total de la muestra. Si la medida del volumen de agua no era igual al espacio de poro disponible (i. e., saturación < 100 %), se concluía que la parte del espacio de poro pudo haber estado ocupada por el gas de hidrocarburo (Nelson et al., 1978 y Kvenvolden et al. 1979).

b. Campo Banzala, 1981 (Costa fuera de Cabinda, Angola)

El campo Banzala está localizado en aguas y profundidades someras y contenía un billón de barriles de petróleo aproximadamente. Pero después de haberse alcanzado la profundidad total del pozo inicial, se perdió debido a una expulsión de gas, generada en un estrato sobre presionado de gas, que cubría totalmente el yacimiento de petróleo. La presión no se conocía pero se creyó



cercana a la presión de fractura. Debido a la incertidumbre de la sobrepresión del gas superficial, el campo Banzala no se desarrolló durante un lapso de tiempo (Smith et al., 1998).

En un estudio de las condiciones del sitio se encontró que existían dos estratos de arena cargados con gas, uno de ellos tenía arena con gas sobrepresionado localizado aproximadamente a 305 metros bajo el lecho marino y el segundo estrato estaba sobrecargado con gas (descubierto esto a partir de la expulsión de gas) y localizado aproximadamente en el intervalo entre 130 a 183 metros (Smith et al., 1998).

Para determinar las dimensiones de la acumulación de gas se efectuó un estudio sísmico entre los años de 1992 y 1993 con el que se determinó, que el gas cubría completamente el yacimiento.

c. Campo Oseberg y Campo Brage, 1983 (Mar del Norte)

En un estudio geofísico efectuado en la zona, se encontraron zonas acústicas blancas relacionadas a posibles acumulaciones de gas extendidas en la dirección noroeste-suroeste. El tipo de gas encontrado era de tipo biogénico, compuesto casi en su totalidad de metano y H_2S que se había filtrado de los estratos del Plioceno, hacia los sedimentos limosos del Cuaternario. En un estudio geotécnico efectuado posteriormente y a través de la zona acústica, se comprobó que el gas no representaba peligro alguno para las operaciones de perforación (Ostmo, et al. 1988).

d. Togi, Este de Troll, 1987 (Mar del Norte)

En el área se desarrolló un estudio sísmico y en los registros, se detectaron dos anomalías localizadas aproximadamente a 70 m y 107 m bajo el lecho marino que fueron asociadas a posibles bolsas de gas. Para corroborar su autenticidad, se efectuaron pruebas con equipo especializado desde 9 m y hasta 107 m de profundidad, en un tirante de agua de aproximadamente 300 m. El porcentaje de gas medido en el agua de poro fue aproximadamente 55 por ciento. Así las anomalías observadas en los registros no se asociaron a bolsas superficiales de gas y no representaron riesgo algún, comprobado esto al no encontrarse ninguna bolsa de gas durante las operaciones de perforación (Rad y Lunne, 1994).

e. Campo Tchibouela, 1988 (Costa fuera del Congo, África)

En el área se planeó la instalación de una plataforma, en un tirante de agua de 86 m y en la vecindad a dos plataformas existentes. Debido a una emanación de gas, durante la instalación de



un conductor en una de las plataformas, se requirió efectuar un nuevo estudio sísmico en el área, a pesar de que en el estudio previo no se había detectado la presencia de gas superficial en la zona, en este nuevo estudio se encontraron zonas sísmicas borrosas indicando la posible presencia de bolsas de gas o de una acumulación de gas alrededor de las plataformas. Para verificar su existencia, se efectuaron pruebas con equipo especializado, desde los 3 m hasta 72 m bajo el lecho marino, en la localización propuesta para la plataforma.

Los resultados obtenidos de saturación agua-gas fueron muy bajos, indicando que el suelo estaba libre de gas y no había sido afectado por la expulsión del mismo. Sin embargo, se observaron burbujas de gas saliendo por el sondeo, durante la perforación de algunas capas delgadas de arena y grava.

Considerando toda la información obtenida, se concluyó la existencia de una cantidad limitada de gas libre en el suelo que no representaba algún riesgo para la instalación de la plataforma; la cual fue instalada posteriormente sin problema alguno (Rad y Lunne, 1994; y Mokkelbost, 1997).

f. Área Gullfaks C, 1988 (Mar del Norte)

En los estudios sísmicos de alta resolución efectuados en el área Gullfaks C, se encontraron indicios de la existencia de gas libre en la localización propuesta para una plataforma, así como también se encontraron montículos de lodo, activos algunos de ellos (Rad y Lunne, 1994; y Mokkelbost, 1997).

Para determinar la existencia de gas libre se efectuaron pruebas in situ con equipo especializado para establecer el perfil de saturación agua-gas y desarrollar un programa avanzado de pruebas de laboratorio para reevaluar los parámetros de diseño previos e incluir el posible efecto del gas en el comportamiento del suelo. Los resultados obtenidos revelaron que el contenido de gas en el agua de poro se incrementaba con la profundidad a un máximo de 90 a 100 por ciento en el intervalo de 16 a 17 metros. Esto indicaba que podrían existir burbujas de gas ocluidas en dicho intervalo y que este pudo haber generado la turbiedad sísmica, sin haberse generado una expulsión de gas durante las investigaciones de suelo previas. (Rad y Lunne, 1994; y Mokkelbost, 1997) Adicionalmente, se desarrollaron pruebas triaxiales en muestras de arena limosa para investigar el comportamiento de la arena saturada con gas y con valores de saturación de gas del orden de 80 a 100 por ciento (Mokkelbost, 1997).



g. Troll, 1989 (Mar del Norte)

Como parte de la investigación geotécnica programada del suelo marino en el área se efectuaron pruebas in situ para determinar el contenido de gas en el poro de agua, para determinar el perfil de saturación agua-gas y desarrollar pruebas especiales de laboratorio para determinar el posible efecto del gas en el comportamiento del suelo. Los resultados obtenidos tanto de los ensayos in situ como los desarrollados en laboratorio indicaron que el suelo estaba casi libre de gas, por lo que fue suficiente con las pruebas de laboratorio convencionales para determinar los parámetros de diseño (Rad y Lunne, 1994).

h. Dagmar, 1990 (Mar del Norte)

Durante una segunda investigación geotécnica del suelo marino y en una inspección por video del lecho marino (tomado desde un vehículo operado a control remoto), se observó que en la localización de una plataforma brotaban burbujas de gas, en los sondeos efectuados en la primera investigación geotécnica. Para verificar la presencia de gas se efectuaron pruebas in situ con equipo especializado, desde tres y hasta los 32 metros de profundidad, bajo el lecho marino. Con los resultados obtenidos se determinó que la parte superior del segundo estrato de arena estaba saturado con gas (con un porcentaje entre 95 y 96 por ciento) y podrían existir algunas burbujas de gas en la parte superior del mismo. La cantidad de gas libre, sin embargo, era aparentemente muy pequeña ya que no tenía algún signo en los resultados del estudio sísmico (Rad y Lunne, 1994).

Durante el desarrollo de las pruebas in situ, se encontró que el agua de poro del estrato de arcilla tenía una salinidad de 35 gr/lit, mientras que el agua de poro en los estratos de arena subyacentes, era relativamente dulce, con una salinidad de solo 5 gr/lit. Con base en estos resultados, se concluyó que la baja densidad del agua menos salada provocó que el agua en el estrato de arena se elevara en el sondeo. Como el agua saturada con gas viaja hacia arriba en el sondeo, lo que experimenta más bajas presiones, implica como resultado, la presencia de gas en no solución y, por lo tanto, se presentó la liberación de las burbujas de gas observadas (Rad y Lunne, 1994).

i. Chek Lap Kok, Lamma Island y Green Island, 1990 (Costa fuera de Hong Kong)

Debido a una turbiedad sísmica observada en algunas localizaciones de interés, se efectuaron un total de 96 pruebas especiales en once localizaciones de las áreas Chek Lap Kok, Lamma Island y Green Island, para detectar la presencia de gas. Las pruebas fueron desarrolladas tanto dentro como afuera de la turbiedad sísmica encontrada, entre el intervalo desde 0.6 hasta



28 metros de profundidad. Sin excepción, los resultados confirmaron los resultados del estudio sísmico, es decir, se encontró gas en donde se localizó la turbiedad sísmica y aproximadamente a las profundidades indicadas en el estudio sísmico y no se detectó gas en las localizaciones sin turbiedad sísmica. Debido a estos resultados se realizaron análisis para determinar la composición del gas en laboratorio y se determinó que el gas in situ estaba principalmente compuesto por dióxido de carbono, metano y nitrógeno. Con base a estos resultados se concluyó que solo existía una cantidad menor de burbujas de gas ocluido en el área con anomalía sísmica y que no afectaría las actividades a desarrollarse (Rad y Lunne, 1994).

j. Sureste de Tyra, 1990 (Mar del Norte)

En la interpretación preliminar de los datos de un estudio sísmico realizado en la localización propuesta para una plataforma, se detectó la posible existencia de bolsas de gas en el área propuesta. Para corroborarlo se realizaron estudios especializados desde 30 y hasta 78 metros bajo el lecho marino. Los resultados obtenidos indicaron que no existía gas disuelto o libre, esto fue comprobado durante las operaciones de perforación, al no encontrarse ninguna bolsa de gas (Rad y Lunne, 1994).

k. Campo Duyong B, 1993 (Costa Fuera de Malasia)

Durante un sondeo geotécnico en septiembre de 1993 ocurrió una expulsión de gas durante la recuperación de una muestra de suelo, al llegar a una profundidad de 60 metros bajo el lecho marino. Este suceso generó dudas respecto a la seguridad de las tres plataformas existentes y de la nueva plataforma, planeada para instalarse en el sitio, por lo que se decidió efectuar un nuevo estudio sísmico en el área, con el que se determinó la existencia de acumulaciones de gas en los intervalos de 14 a 50 metros y de 60 a 65 metros bajo el lecho marino; acumulaciones localizadas en dos capas delgadas de arena (Lunne, et al., 1996 y Mokkalbost, 1997).

Debido a la presencia de gas y para evaluar la seguridad de las plataformas se efectuó un estudio geotécnico para determinar el efecto del gas en las propiedades del suelo.

En los resultados obtenidos se encontró que la saturación de gas en el poro de agua se incrementaba en la parte superior de los estratos cargados con gas, es decir, se midió una saturación de 6 por ciento a 45 metros y de 30 por ciento a los 77 metros, lo que reflejó que las mayores concentraciones de gas fueron cerca de los estratos cargados con gas, también se detectó alta presión entre los dos estratos. Debido a la baja cantidad de gas disuelto en el agua de



poro, se determinó que no había repercusiones prácticas en las propiedades de la arcilla, respecto a la capacidad axial del pilote (Lunne, et al., 1996).

En los nuevos cálculos de capacidad de carga se determinó que la longitud de los pilotes para la nueva plataforma debía ser de 53 metros, quedando las puntas de los pilotes lo suficientemente arriba de la zona de gas, evitando cualquier problema posterior.

La investigación geotécnica y los análisis subsecuentes mostraron que el efecto principal del gas superficial fue incrementar la presión de poro en los estratos de arcilla, lo que reduce con el tiempo la capacidad de carga de los pilotes. Como solución, se instalaron dos pozos de alivio, uno a una profundidad de 90 metros y el otro entre 59 y 60 metros bajo el lecho marino, con el objetivo de reducir la presión en los estratos cargados con gas (Lunne, et al., 1996).

I. Campo NAM, 1995 (Costa fuera de Holanda)

En el Sector Holandés del Mar del Norte se realizaron estudios especiales para determinar el porcentaje de gas en el poro de agua, debido a que en un estudio superficial sísmico se encontró una anomalía que cubría un área de 150 por 150 metros, localizada alrededor de uno de los pozos. Los suelos en el sitio consisten de 15 metros de arena compacta sobreyaciendo a una arcilla dura bajo los 32 metros, seguida por una arena muy compacta a más de 80 metros. La anomalía era más pronunciada en el estrato superior de arena, sin embargo, podría ser posible que cubriera o enmascara información bajo esta profundidad (Mokkelbost, 1997).

Se realizaron tres estudios cerca al pozo, dentro de la anomalía detectada, y un sondeo fuera de la anomalía, esto representaría las condiciones del suelo virgen respecto al suelo con gas.

Los resultados indicaron que el suelo no contenía gas libre; solo se detectaron pequeñas cantidades de gas metano, correspondientes a una relación de saturación de gas de 0.2 por ciento o menor, en el agua de poro. Con base en los resultados se concluyó que la anomalía sísmica localizada alrededor del pozo no era debido al escape de gas superficial a lo largo de la camisa del conductor, evitando costos adicionales de inyección a lo largo de las camisas de los conductores (Mokkelbost, 1997).

m. Campo Oseberg, 1996 (Mar del Norte)

Durante un sondeo ocurrieron dos expulsiones de gas a la profundidad de 27 metros bajo el lecho marino, debido a estas se efectuó un segundo estudio más detallado de los perfiles sísmicos,



encontrándose la existencia de anomalías en la zona de estudio, con base a los resultados obtenidos se considero que la mejor solución era cambiar la localización de la plataforma para evitar problemas durante su instalación (Lunne, 1999).

1.1.2. Presencia de gas en la Sonda de Campeche

Algunas manifestaciones de gas se han presentado en la Sonda de Campeche, como se describe en las secciones siguientes, como algunos ejemplos:

a. POOL-D, 1989

En la plataforma de perforación POOL-D se presento una fuga súbita de gas, que generó un cráter de grandes dimensiones en el área de conductores, dejando sin confinamiento lateral a 6 pilotes y a los 12 conductores en una longitud variable que va desde el lecho marino hasta 21 metros y, en algunas partes, hasta 31 metros.

b. AKAL-H, 1998

Durante las actividades de perforación en marzo de 1998, se presentaron movimientos oscilatorios en la plataforma con una duración de más de seis (6) horas, sin que se pudiera identificar la fuente de dichas vibraciones (Barrera y Hernández, 1998), por lo cual, se efectuó una revisión de las condiciones del sitio, encontrándose que:

- 1) En un estudio geofísico efectuado en 1978 se habían detectado acumulaciones de gas en los estratos superficiales y profundos, razón por la cual se cambio la ubicación de la plataforma.
- 2) En un estudio geofísico posterior realizado en 1997 se detectó que la acumulación de gas había migrado hacia el sureste invadiendo el suelo bajo la plataforma de AKAL-H (Galván et al., 1998; y Barrera y Hernández, 1998).
- 3) Se dedujo que la causa del movimiento se debió a una expulsión súbita de gas y que posiblemente redujo la capacidad de carga del suelo.
- 4) Se registró un cráter y burbujeo en el lecho marino en septiembre y diciembre de 1996, fecha en que se iniciaron las perforaciones para la instalación de los conductores.
- 5) Se detectó la presencia de burbujas de gas H₂S en la plataforma.

En una inspección posterior del sitio se encontró que:



- a) Existía una socavación en el lecho marino, así como emanación de gas, específicamente en el área de conductores de la estructura adosada.
- b) Se detectó abundante burbujeo alrededor de algunos de los conductores y en algunos de los elementos horizontales se registró burbujeo ligero.
- c) Se registró azolve en uno de los «risers».

Debido a las evidencias encontradas se concluyó que el movimiento oscilatorio fue generado por la emanación de gas y, con base a los registros geofísicos, se determinó que existe gas bajo la plataforma de perforación AKAL-H, pero la emanación súbita de gas no afectó estructuralmente la plataforma. Por lo que se propuso efectuar estudios especializados para determinar la influencia del gas en las propiedades mecánicas del suelo (Barrera y Hernández, 1998).

c. AKAL-GR, 1998.

Durante los trabajos de perforación para conductores se reportó una emanación de gas de considerable magnitud y corta duración. Durante la inspección se observó que salía gas en grandes cantidades y de forma continua, por una oquedad de aproximadamente 20 cm de diámetro. Una inspección efectuada dos días después, mostró que la fuga de gas había disminuido considerablemente, observándose únicamente la salida esporádica de burbujas de gas (Galván, 1998).

Durante la revisión de la información se encontró que durante las actividades de perforación para un conductor, se registró un colapso a 133 metros de profundidad y al alcanzarse los 800 metros de profundidad se registro una fuerte emanación de gas, por lo cual se decidió cementar la tubería de los conductores. Durante esta etapa, se reportó que el flujo de gas no había permitido efectuar una cementación adecuada; por lo que se efectuó una nueva recementación para taponar la salida de gas, provocando que el gas emanara a través del lecho marino (Galván, 1998).

Se concluyó que la emanación de gas provenía de estratos profundos, ya que no se había registrado ninguna acumulación de gas en el estudio geofísico previo, considerando además que la fuga se presentó cuando se estaba perforando a 800 metros bajo el lecho marino (Galván, 1998).



Como resultado y debido a estas manifestaciones de gas se propuso realizar estudios geofísicos y geotécnicos en algunos sitios afectados, para evaluar las propiedades de los suelos que contienen gas.

1.2. Justificación del estudio

El comportamiento del gas en la naturaleza depende de la presión, temperatura y volumen y, cuando este se deposita en los sedimentos marinos, interactúa con las partículas que lo rodean y con el agua de poro, desplazándola para formar vacíos llenos de gas, normalmente metano producido biogénicamente o termogénicamente. Es decir, se forman burbujas de gas no disuelto, que pasan a integrarse a la estructura del suelo, esta nueva estructura se comportará de manera diferente dependiendo del tipo de suelo y del tamaño de las burbujas.

Cuando se deposita una cantidad considerable de gas en los suelos de cimentación, las propiedades mecánicas del suelo podrían alterarse, situación que puede poner en riesgo a las estructuras existentes y/o futuras. En el caso de las plataformas existentes, se deben considerar medidas de remediación y, en el caso de estructuras futuras, la selección de los parámetros de diseño debe hacerse considerando la influencia del gas; esto es posible efectuando ensayos in situ y en laboratorio, en muestras con contenido de gas.

Existen diferentes factores que influyen en el comportamiento de las burbujas de gas y, por lo tanto, repercuten en las propiedades del suelo. Dentro de los primeros factores se encuentra: la cantidad de gas, la variación de la presión de gas, el movimiento del gas disuelto, la tensión superficial, las características de expansión y contracción de la burbuja. La influencia obvia es que la respuesta no drenada (a tormentas, por ejemplo) es compresible, pero no es a volumen constante, como se asume para un suelo saturado. Otra influencia en las propiedades mecánicas del suelo se presenta al variar la resistencia al esfuerzo cortante, que depende de la interacción que existe entre las partículas del suelo y que estas a su vez están influenciadas por la interacción que existe con el agua de poro. La influencia de esta alteración en la resistencia al esfuerzo cortante de las arcillas puede ser evaluada a través de ensayos especiales de laboratorio.

Para efectuar ensayos en laboratorio es importante conocer la cantidad de gas existente en el sitio, es decir, conocer el porcentaje de saturación de gas en el agua de poro. Esta información también es útil para conocer el posible riesgo de que se presente una expulsión o emanación súbita de gas durante las actividades de perforación o instalación de conductores, evitando así la pérdida de vidas humanas y materiales. Adicionalmente, esta información es útil para evaluar los



riesgos existentes en zonas de plataformas, pero esta información no es suficiente para conocer la variación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, de aquí se desprende la trascendencia de efectuar pruebas especiales de laboratorio

La resistencia de un pilote es la suma de la resistencia obtenida por punta y la resistencia obtenida por fricción. Ambas componentes de la resistencia están asociadas al esfuerzo cortante del suelo. Los análisis también están asociados a las propiedades de compresibilidad para establecer los perfiles de diseño y si las propiedades del suelo cambian, entonces también cambian estas resistencias, de aquí la importancia de conocer cuánto varía la resistencia al esfuerzo cortante y como varia la compresibilidad de las arcillas con contenido de gas metano a través de pruebas de laboratorio y obtener mejores parámetros de diseño.

Con los resultados obtenidos en laboratorio se podrá determinar cuantitativamente la variación en la resistencia al esfuerzo cortante y en las características de compresibilidad de la arcilla y, por lo tanto, determinar si existe disminución en la capacidad de carga de los pilotes. Esto permitirá obtener valores que podrán ser utilizados para reevaluar el diseño de estructuras ya instaladas y determinar la estabilidad de las plataformas ante este fenómeno o seleccionar mejores parámetros para el diseño de futuras plataformas.

1.3. Objetivos del Estudio

Evaluar las propiedades índice, de compresibilidad, de resistencia al esfuerzo cortante y la resistencia normalizada a diferentes velocidades de deformación de la arcilla marina blanda y media con gas metano al 7 y 15 por ciento, con respecto a la arcilla sin contenido de gas, a través de los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, ya que la presencia de gas podría modificar el comportamiento de la arcilla marina ante sollicitaciones estáticas y dinámicas.

1.4. Alcances del Estudio

Para lograr los objetivos planteados, se llevaron a cabo los siguientes trabajos:

- a) Se creó una gran muestra de lodo arcilloso, con un contenido de agua de aproximadamente 150 por ciento.
- b) Se tomaron porciones de lodo arcilloso y se mezcló con zeolita saturada con gas metano. La cantidad de zeolita mezclada fue del 7 y 15 por ciento en peso de la muestra de lodo arcilloso y se consideró la generación de la misma cantidad de gas metano en la muestra.



- c) La mezcla obtenida de la arcilla con gas metano se consolidó para obtener arcilla blanda y media con y sin gas metano al 7 y 15 por ciento.
- d) Una vez consolidada la muestra de arcilla con gas, se obtuvieron submuestras y se realizaron ensayos para conocer las características de compresibilidad y de resistencia al esfuerzo cortante. Los siguientes ensayos se realizaron en las muestras de arcilla blanda y media sin y con gas metano:
- Pruebas de consolidación a deformación constante,
 - Pruebas de veleta miniatura y torcómetro,
 - Pruebas triaxiales sin consolidación y sin drenaje, con medición de presión de poro,
 - Pruebas de corte simple directo estáticas (5 por ciento de deformación por hora) y rápidas (100 y 1 000 por ciento de deformación por hora), deformando la muestra al, y por ciento,
 - Pruebas para determinar las propiedades índice, entre ellas está el contenido de agua, límites de Atterberg, peso específico relativo de los sólidos, peso volumétrico, grado de saturación, porosidad, y
 - Radiografías con rayos X.

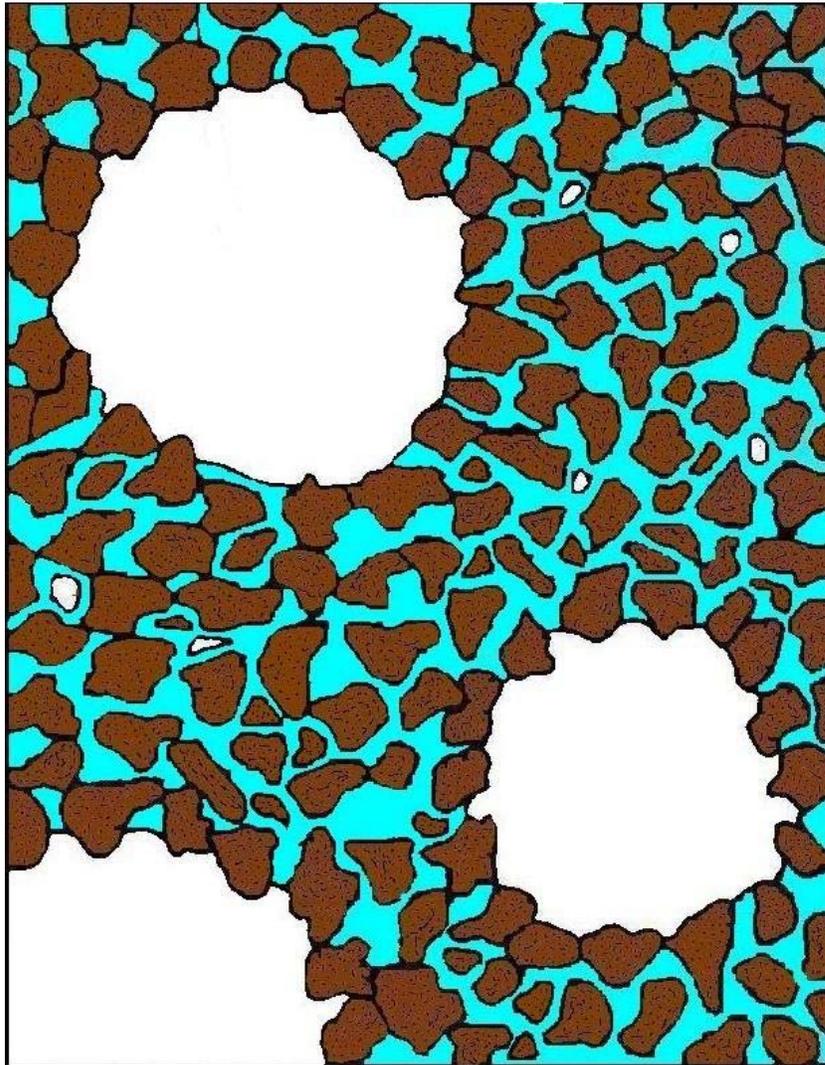
1.5. Hipótesis del Estudio

Un fenómeno que ha cambiado la concepción del comportamiento de los sedimentos marinos, es la presencia de gas superficial en los estratos someros, de aquí se deduce que la presencia de gas superficial reduce la resistencia al esfuerzo cortante y cambia las características de compresibilidad de las arcillas marinas y, en consecuencia, la capacidad de carga de las cimentaciones.



CAPÍTULO II

EL GAS EN SEDIMENTOS MARINOS





Diversas investigaciones han reportado la presencia de burbujas de gas en sedimentos que forman el lecho marino (Claypool y Kaplan, 1974; Schubel, 1974a; Whelan, et al., 1975; Whelan, et al., 1977; y Best, et al., 2003, entre otros). El gas encontrado es típicamente metano, nitrógeno o dióxido de carbono producido por la descomposición de materia orgánica, de lo que se deduce, entonces, que los suelos reales no están totalmente saturados. En estos suelos, los vacíos están llenos parcialmente con agua y gas, actuando cada una con diferente presión, es decir, existe tanto la presión del agua de poro (u_w), como la presión del gas (u_g).

Aunque el gas disuelto no tiene signos físicos, el gas libre puede escaparse o filtrarse al lecho marino creando montículos de lodo y/o almacenarse en una localización formando bolsas o acumulaciones de gas, principalmente en arenas, aunque también se han encontrado suelos finos conteniendo burbujas de gas. Si una acumulación de gas es localizada en estratos superiores, en aproximadamente los primeros 1 000 metros de sedimentos marinos, es común referirsele como una acumulación o bolsa superficial de gas y es considerada un riesgo tanto para la investigación del suelo marino, como para las operaciones de perforación de pozos productores.

El gas puede existir en solución en el agua de poro o estar presente en su fase libre, pero en cualquier caso puede afectar el comportamiento mecánico del suelo. Dependiendo de la relación entre la presión del gas, los esfuerzos in situ y de la resistencia del suelo, el gas libre puede presentarse en alguno de los tres modos siguientes (Rad et al., 1994):

1. En burbujas ocluidas, que se generan entre las cavidades formadas por la reestructuración del suelo, principalmente en arcillas blandas,
2. Dentro de micro y macro fracturas, principalmente en arcillas firmes,
3. En burbujas ocluidas y/o interconectadas que se forman como un re-emplazamiento del agua de poro, sin algún efecto en la matriz del suelo, principalmente en arena.

II.1. Gas Biogénico y Petrogénico

Las acumulaciones de gas encontradas dentro de los sedimentos marinos pueden derivarse, principalmente, de dos tipos de gas:

- a. **Gas Biogénico.** Producto de la actividad biológica en estratos superficiales bajo el lecho marino, resultado de la descomposición de materia orgánica atrapada en los sedimentos marinos no consolidados por la acción de bacterias anaeróbicas, justo bajo la línea de lodos.



- b. **Gas Petrogénico.** Generado por alta presión y por el efecto de las altas temperaturas, como consecuencia de la descomposición química de materia orgánica de naturaleza caliente, en sedimentos profundamente enterrados en la corteza terrestre.

Otras fuentes alternativas de gas pueden ser las fallas termales de complejos compuestos orgánicos e inorgánicos a grandes profundidades (gas termogénico) y vulcanismo submarino o procesos geotermales (gas vulcogénico).

El gas puede ser encontrado en bolsas aisladas o dispersas por todas partes entre el sedimento y esta asociado con otras características (i.e. fallas, diapiros) y se ha encontrado en muchos de los estudios efectuados, principalmente, gas metano (CH_4) de origen biogénico, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que sea de origen petrogénico, que tal vez haya migrado por los planos de falla.

Para definir su posible origen es importante identificar zonas o bolsas de gas, así como la geología para poder determinar posibles rutas de migración.

II.2. Identificación de Acumulaciones de Gas

La identificación de acumulaciones de gas se efectúa a través de estudios geofísicos; el equipo que se utiliza depende de las áreas a investigar, por ejemplo, si se requiere saber si existe burbujeo a nivel del lecho marino y la localización de la acumulación de gas, el equipo a utilizar sería el sonar de barrido lateral, el ecosonda y el perfilador somero. Actualmente, se efectúan estudios sísmicos de 3D de alta resolución, estos estudios son complementados con sondeos geotécnicos, análisis geoquímicos y, en algunas ocasiones, con monitoreo por televisión. La manifestación del gas puede presentarse través de:

- a. Acumulaciones superficiales,
- b. Emanaciones súbitas, y
- c. Escape en la superficie del lecho marino, en forma de burbujeo.

Algunos rasgos asociados a las acumulaciones o presencia de gas, que frecuentemente se encuentran en los registros geofísicos, son los montículos de lodo y cráteres formados por la salida de gas hacia la columna de agua. Las filtraciones de gas pueden manifestarse como oleadas de burbujas o columnas de color o agua brillando en un registro geofísico, provocando la mezcla de fluidos alrededor y bajo la interfase sedimento-agua marina. Obviamente, para que el gas penetre



hacia la columna de agua, el gas migra a través de los sedimentos no consolidados. El término filtración abarca desde un vigoroso burbujeo de gas en lecho marino (una macro-filtración) a una emanación en pequeña escala de burbujas microscópicas o compuestos de hidrocarburos en solución, detectable solo por instrumentos geoquímicos (micro filtraciones). Las macro-filtraciones se identifican más fácilmente, pero son poco comunes. Las filtraciones pueden ser continuas o intermitentes, solo ocurren pequeñas expulsiones quizás una o dos veces por año.

El descubrimiento de los montículos de lodo en el Mar del Norte dio soporte a la hipótesis, originalmente propuesta por King y MacLean (1970), de que el fluido que escapa es responsable de la formación de los montículos de lodo, la consideración fue suscitada por la violenta erupción de gas, que puede poseer una amenaza a las instalaciones de costa fuera.

Es difícil estimar la presencia del gas debido a que algunos rasgos geológicos pueden tener los mismos signos que la bolsa de gas o puede, alternativamente, enmascarse por debajo de la bolsa de gas. Sin embargo, estos estudios no pueden proveer información exacta de la existencia de gas superficial, para ello se complementa con estudios especializados de geotecnia o de mecánica de suelos, estos estudios se utilizan para determinar la existencia y la variabilidad de las propiedades mecánicas de los suelos. Con los resultados se obtiene la extensión vertical y, especialmente, la presión interna de la bolsa de gas. Estos estudios se complementan con un estudio geoquímico para obtener información acerca de la presencia de gases disueltos o de la composición de los gases in situ, que es necesaria para proponer pruebas de laboratorio en muestras gaseosas.

II.3. Comportamiento del Suelo

La mecánica de suelos ha establecido a través del tiempo que, para cierto tipo de análisis, los vacíos dentro del suelo están llenos completamente con agua. Sin embargo, resultados obtenidos en investigaciones efectuadas en suelos finos para estudiar su comportamiento ante la presencia del gas, indicaron que los tamaños de las burbujas normalmente son mucho más grandes que los espacios vacíos normales dentro del suelo (Anderson y Hampton, 1980; Nageswaran, 1983), y no pueden ser solo consideradas como burbujas ocluidas dentro del agua, que simplemente cambian la compresibilidad del fluido del poro. Por ello Terzaghi en 1944 estableció una clara diferencia al distinguir entre pequeñas y grandes burbujas, al referirlas como “burbujas de gas” y “vacíos de gas” respectivamente. Los progresos obtenidos en este tipo de suelo han sido limitados, por el hecho de que la estructura básica de un suelo no saturado varía



considerablemente, cada tipo de estructura obtenida resulta en un diferente modelo de comportamiento del suelo.

En el caso de las arenas, se ha estudiado la respuesta estática no drenada y su resistencia cíclica ante el efecto del gas y se ha encontrado que la presencia de gas afecta la resistencia no drenada de la misma. La propagación del efecto depende del tipo de gas, la cantidad de gas y de la presión de poro, entre otros factores. También se ha encontrado, en otro tipo de estudios (tales como estudios geofísicos (Schubel, 1974a; Whelan, et al. 1977) y estudios numéricos (Anderson y Hampton, 1980; Yushieh, et al. 1983; Okusa 1985; Sills et al. 1991)), que la presencia del gas afecta la respuesta acústica del suelo.

II.3.1 Modelos conceptuales de la presencia de gas en los sedimentos marinos

El comportamiento del gas en la naturaleza está influenciado por la presión, la temperatura y su volumen. Algunos tipos de gas reaccionan limitadamente con el agua, como es el caso del nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2) y metano (CH_4), otros además de reaccionar con el agua producen iones como es el caso del dióxido de carbono, el ácido sulfhídrico (H_2S), el dióxido de sulfuro (SO_2) y el amoníaco (NH_3).

Las burbujas de gas en el suelo no tienen la misma configuración ni el mismo tamaño. Según Klausner y Yehuda (1991), en cada configuración existe un arreglo del tamaño, estadísticamente distribuido a través de los vacíos y probablemente presenten un comportamiento diferente (Wroth y Houlsby, 1985). Por ejemplo, el concepto de dos esfuerzos independientes variables ($\sigma - u_g$) y ($u_g - u_w$) han sido aplicados exitosamente para suelos donde las fases de agua y gas son continuas (Matyas y Radhakrishna, 1968; Fredlund, 1985) pero el mismo alcance no puede ser aplicable a suelos donde la fase de agua o gas es discontinua (Wheeler, 1988); i. e. a los sedimentos marinos que contienen gas en sus vacíos y que se conocen como suelos gaseosos no saturados o parcialmente saturados.

Estudios efectuados en suelos finos han sugerido que las burbujas de gas son considerablemente más grandes que el tamaño de las partículas de limo y arcilla.

La aplicación de carga en los suelos gaseosos, debido a la compresibilidad de las burbujas de gas, causa cambios de volumen, aun cuando el suelo es no drenado, por ello es necesario definir separadamente la relación de vacíos del gas (e_g), y la relación de vacíos del agua (e_w) lo que viene siendo la relación del volumen del gas, al volumen de sólidos y la relación de volumen de



agua al volumen de sólidos, respectivamente. Estas relaciones de vacíos están relacionadas con el grado de saturación (S_r) por medio de:

$$e_g = (1 - S_r)e \dots \dots \dots (1)$$

$$e_w = S_r e \dots \dots \dots (2)$$

$$e_g + e_w = e \dots \dots \dots (3)$$

asumiendo que la estructura del suelo gaseoso es como se idealiza en la Figura II.2, la relación de vacíos del agua es también, la relación del suelo saturado rodeado por las burbujas de gas.

La presencia de burbujas de gas dentro de los vacíos de los sedimentos marinos puede generar diversas estructuras y, dependiendo de los tamaños relativos de las burbujas y de las partículas del suelo, se pueden considerar las siguientes:

- a. Estructuras de suelo con pequeñas burbujas,
- b. Estructura de suelo con burbujas de gas,
- c. Estructura de suelo con inclusiones de gas,
- d. Estructura de suelo con grandes inclusiones de gas, y
- e. Estructura de suelo con vacíos de gas.

a). Estructura de suelo con pequeñas burbujas de gas

Este tipo de estructura se caracteriza por tener un alto grado de saturación, debido a que la fase de agua es de forma continua, mientras que la fase del gas, en forma de burbujas discretas, es discontinua, a pesar de que la cantidad de gas es lo bastante grande para no ser ignorada. Esta discontinuidad se debe a que las burbujas formadas son más pequeñas o bastante más pequeñas que los vacíos existentes, es decir, las burbujas de gas son pequeñas comparadas con el tamaño de las partículas del suelo, Figura II.1.

Debido al tamaño de las burbujas de gas, estas se alojan dentro de los vacíos existentes entre las partículas, sin distorsionar la estructura del suelo y es que para este tipo de estructura el radio de curvatura de cada interfase agua-gas (que controla la diferencia entre la presión del gas y la presión del agua) es igual al radio de la burbuja.

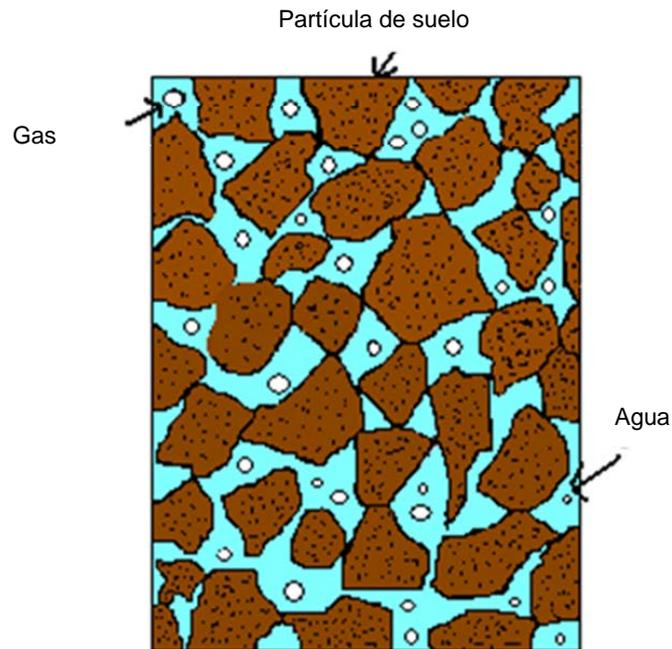


Figura II.1 Estructura de suelo con pequeñas burbujas de gas.

Tomando como referencia el tamaño de las burbujas, se pueden considerar de forma esférica y que se mueven libremente con el agua. Esta forma asignada a las inclusiones de las burbujas de gas junto con una mínima interfase con el agua, para un volumen dado, requiere una mínima cantidad de energía para mantener ese volumen. Sin embargo, si existiera algún movimiento del agua, puede producirse alguna colisión entre burbujas de diferente tamaño, por la diferencia de velocidades generada por esa desigualdad, generando, en algunas ocasiones, la fusión a una burbuja más grande de gas. Este fenómeno se presenta principalmente en suelos granulares donde el considerable movimiento del agua puede permitir diferencias entre las velocidades de las burbujas.

b). Estructura de Suelo con Burbujas de Gas

En este tipo de estructura, las inclusiones de gas son más grandes que el ancho de las oquedades de los poros, pero permanecen más pequeñas que la expansión de los mismos, de tal forma que las burbujas de gas encajan fácilmente dentro de los vacíos y mantienen todavía una forma esférica, pero no pueden comunicarse libremente dentro de ellos. Obteniéndose como resultado una fase de agua continua, mientras que el gas, en forma de burbujas discretas, presenta una fase discontinua (Figura II.2). Algunos autores opinan que esta configuración de burbujas

podría ser la configuración original del suelo o el resultado de la fusión de muchas burbujas más pequeñas moviéndose en los vacíos.

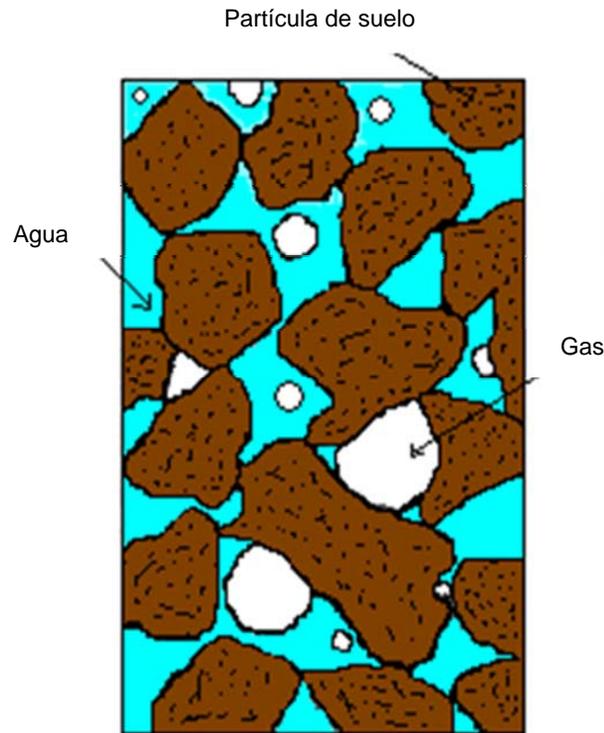


Figura II.2 Estructura de suelo con grandes burbujas de gas.

En este tipo de configuración, las altas presiones del agua de poro pueden comprimir las burbujas a un tamaño tal que permitiría que pasaran por el ancho de la oquedad o después de un considerable tiempo, pueden ser parcialmente disueltas en el agua. Este retraso posiblemente ocurre en suelos de grano fino, donde el tiempo de disolución del gas en el agua relativo al tiempo del movimiento de la misma llega a ser más largo.

c). Estructura de Suelo con Inclusiones de Gas

En esta estructura las burbujas de gas son más grandes, comparándolas con las estructuras anteriores, pero ya no son de forma esférica, aunque siguen más o menos el contorno de los vacíos, Figura II.3. Estudios efectuados han demostrado que el gas contenido en los vacíos se encuentra entre el 10 al 15 por ciento de la porosidad. Debido al gran tamaño de las burbujas, tanto la fase del agua como la del gas son continuas, presentando la estructura una saturación intermedia.

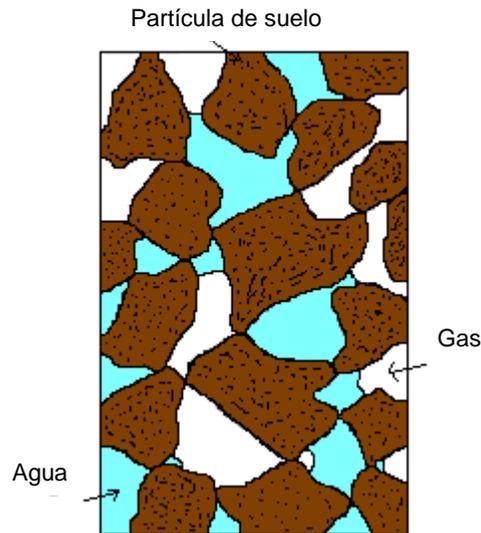


Figura II.3 Estructura de suelo con grandes inclusiones de gas.

En los suelos granulares, las inclusiones pueden alcanzar la superficie de los granos y, en los suelos de grano fino, pueden ser removidos de la superficie de la partícula por muchos lentes moleculares de agua.

d). Estructura de Suelo con Grandes Inclusiones de Gas

A medida que el suelo pierde agua, su grado de saturación decrece y el gas sigue formando una fase continua en los vacíos del suelo (Figura II.4).

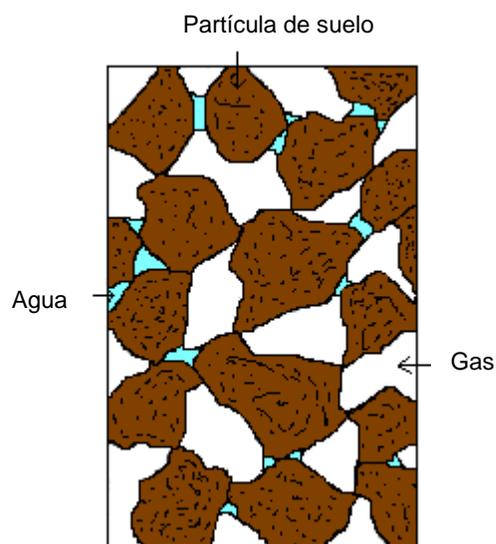


Figura II.4 Estructura de suelo con fase continua de gas y agua.



Esta configuración es más probable que ocurra en suelos granulares y limo, entre el 10 al 30 por ciento del grado de saturación y ligeramente arriba del límite de encogimiento. El agua, que es discontinua, retrocede a los puntos de contacto de las partículas formando meniscos en la interfase agua-gas.

En suelos arcillosos, cada una de las configuraciones ocurre a muy bajo grado de saturación, si es que ocurre. En algunas arcillas altamente plásticas, puesto que las fuerzas de atracción entre las partículas y la película de agua adherida a ellas son mucho más fuertes que las fuerzas de tensión entre las moléculas del agua, ocurre un gran deslizamiento en el agua antes de que se retroceda al ensanchamiento entre las partículas. En suelos no marinos, ocurre un fenómeno ante esta situación, se presenta cuando este proceso rompe el suelo lo que resulta en una falla, que ahora forma una fase continua con el gas. Fases continuas de gas, incluyendo las grietas, tienen la propiedad de permitir el libre movimiento del agua y del gas en el suelo. Las grietas, sin embargo, son diferentes de la configuración de la fase continua de gas en que se convierten más grandes con el decrecimiento de la cantidad de agua en el suelo y más pequeñas con la absorción del agua. En un campo, es decir en un suelo no marino, con un bajo nivel de agua, o sin ella, las grietas pueden ir tan profundas como 6 a 8 metros bajo la superficie del suelo, o quizás aun más.

e). Estructura de Suelo con Vacíos de Gas

En este tipo de estructura, las burbujas son mucho más grandes que el tamaño normal de la partícula y además las grandes inclusiones de gas son rodeadas por partículas más pequeñas. En la región de cada burbuja, la partícula del suelo es empujado por el gas, dejando un gran vacío llenado por gas (Figura II.5). Esta configuración es encontrada en suelos cohesivos donde las fuerzas de cohesión pueden permitir que las partículas formen cavidades dentro. Por ejemplo en tierra, este tipo de estructura se encuentra en suelos compactados o inalterados donde la presión del gas mantiene grandes inclusiones. Las interfaces agua-gas están dadas por un gran número de pequeños meniscos que tienden puentes huecos entre las partículas. El radio de curvatura de estos meniscos no es necesariamente igual al radio de la burbuja.

En este tipo de estructura los suelos son marinos no saturados con el gas o parcialmente saturados, en forma de burbujas discretas. El gas ocurre como burbujas discretas si el grado de saturación (S) está por arriba de un cierto valor crítico. Barden y Sides (1970) y Sparks (1963) sugieren que el nivel de saturación crítico es de alrededor de 0.85, una sugerencia que renace del trabajo de Nageswaran (1983). En cambio, según Esrig y Kirby (1977) las burbujas discretas

ocurren con un grado de saturación en exceso de 0.9, debido a que el gas es comprimido por la columna de agua marina que tiene encima, además consideran que este alto nivel de saturación es significado de que el gas esta forma de burbujas discretas. Sin embargo, el valor preciso del grado de saturación critico probablemente varia significativamente para diferentes tipos de suelo.

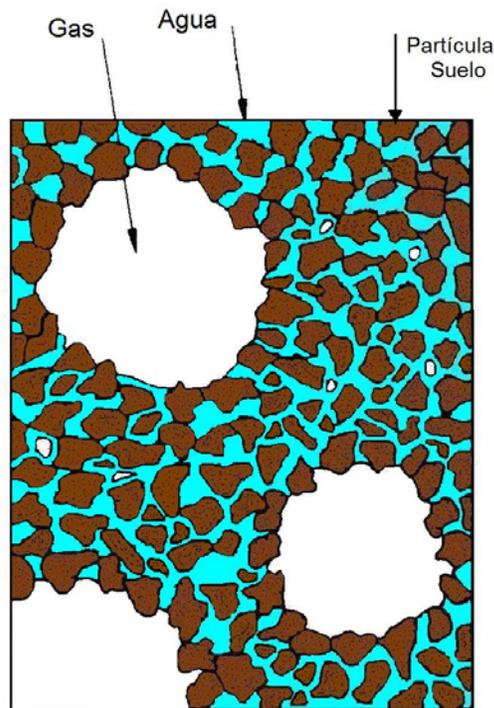


Figura II.5 Estructura de suelo con vacíos de gas.

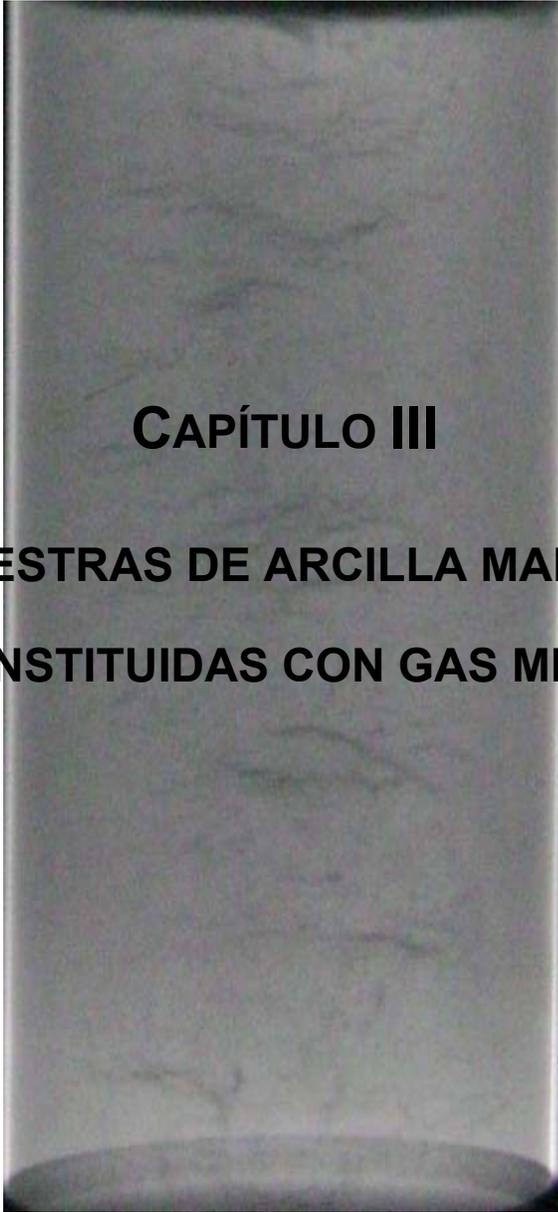
Si bien el tamaño de las burbujas puede variar considerablemente, existen evidencias de que en suelos finos son mucho más grandes que las partículas, deduciendo así que la estructura mostrada en la Figura II.5, es la más probable de existir en suelos finos. La tesis de que el gas no disuelto dentro de los sedimentos marinos ocurre en forma de grandes burbujas está fundamentada en estudios, efectuados por Garder y Goringe (1988), con el microscopio electrónico, en muestras saturadas con gas, preparadas en laboratorio con la técnica del cribado molecular de la zeolita. Este método es considerado como representativo del proceso de formación de las burbujas, tal como ocurre en los suelos marinos. En dichos estudios se obtuvieron tamaños entre 0.1 mm a 1 mm de diámetro y comparándolos con el tamaño promedio de la partícula fueron considerablemente más grandes.

Muchos autores, quienes han estudiado el problema de los suelos no saturados conteniendo burbujas discretas de gas, han asumido, explícitamente o implícitamente, que la



estructura del suelo es como se muestra en la Figura II.1, con las burbujas pequeñas suficientes para encajar dentro de los espacios vacíos normales (Anderson y Hampton, 1980; Chang y Duncan, 1983 y Okusa, 1985). *“Un suelo conteniendo burbujas de gas muy pequeñas es relativamente más fácil de analizar, debido a que el suelo obedece la misma ley de esfuerzos efectivos como un suelo saturado, y el solo efecto de las burbujas de gas es el cambio de la compresibilidad en el fluido del poro”*, Sparks (1963).

De cualquier manera la presencia de las burbujas de gas probablemente tienen un efecto significativo en las propiedades ingenieriles del suelo marino, debido a la alta compresibilidad de las burbujas, obviamente afecta el comportamiento del cambio de volumen de los suelos. Aunado a esto, algunos autores han reportado bajos valores inusuales de esfuerzo cortante (en un rango de 0.96 a 1.34 kPa) en áreas donde existe gas (Bea y Arnold, 1973; Whelan et al., 1977). Otros autores (Indeed et al., 1978; y Prior y Suhayda, 1979) sugieren que la presencia del gas no disuelto puede ser parcialmente responsable por los deslizamientos submarinos en taludes con muy bajos valores en el área del Delta del Mississippi. Por su parte Wheeler (1988) establece que el esfuerzo cortante puede aumentar o disminuir debido a la presencia de las burbujas de gas.



CAPÍTULO III

**MUESTRAS DE ARCILLA MARINA
RECONSTITUIDAS CON GAS METANO**



Para entender el comportamiento de una arcilla conteniendo gas metano se requieren conocer parámetros de resistencia provenientes tanto de pruebas de campo como de laboratorio, tal como se realiza para una arcilla sin gas. Para ello, se requieren muestras inalteradas con gas; sin embargo, las técnicas de muestreo empleadas normalmente no son adecuadas para obtener muestras inalteradas de arcilla conteniendo gas, ya que no evitan que se presente cierta alteración durante la recuperación de la muestra, siendo mayor para una muestra conteniendo gas, debido a la expansión del gas conforme disminuye la presión confinante en el suelo.

Una alternativa que permite obtener parámetros mecánicos de una arcilla conteniendo gas metano, es la de efectuar ensayos de laboratorio en muestras reconstituidas de arcilla conteniendo gas metano, de los resultados obtenidos de estos ensayos se pueden conocer las características de compresibilidad y de resistencia al esfuerzo cortante, entre otras propiedades.

Con los resultados obtenidos en laboratorio es posible conocer la probable variación de las características mecánicas de la arcilla con gas metano mediante la comparación de los resultados con los de una arcilla sin gas y, a partir de esta, desarrollar conceptos que permitan entender mejor el comportamiento de la arcilla con gas metano.

III.1. Métodos para reconstituir muestras de suelos parcialmente saturados

Algunas de las técnicas empleadas para preparar suelos trifásicos (i. e., estructura con suelo, agua y aire o gas metano), que han permitido estudiar el comportamiento de los suelos parcialmente saturados son:

a. **Método de compactación (Bishop y Donald, 1961; y Matyas y Radhakrishna, 1968).**

La reconstitución de las muestras se efectúa mezclando arcilla limosa seca con un porcentaje de agua conocido; posteriormente la mezcla se compacta estáticamente hasta obtenerse una compacidad determinada. El procedimiento de compactación consiste en comprimir capas de suelo de una pulgada de espesor, empleando un determinado peso a una tasa de compresión de 2.0 mm/min, para tener control de la consistencia seca del suelo. Posteriormente la muestra se coloca en una base para ensaye triaxial y se sella, permitiendo que la muestra repose por un intervalo de tiempo de 10 horas, con la finalidad de que la presión de poro se equilibre.

b. **Método de secado de suelo saturado (Jennings y Burland, 1962).**

El suelo en el contenido de agua de su límite líquido, se coloca en moldes para secarlo a temperatura ambiente, durante el proceso de secado y en varias etapas las muestras se remodelan y



colocan dentro de una jarra y se sellan por siete días, permitiendo así que el contenido de agua se equilibre dentro del suelo.

- c. **Método de presión de succión (Bishop, et al. 1961).** En este método se varía el grado de saturación inicial de las muestras empleadas en los ensayos triaxiales (muestras preparadas con el método de compactación) efectuando ciertos ajustes a la presión de poro y a la presión de aire empleados. El grado de saturación se calcula empleando las mediciones de los cambios del aire y del volumen de agua durante la aplicación de la succión inicial.
- d. **Método de creación de burbujas con zeolita (Nageswaran, 1983).** La creación de burbujas de gas se efectúa mezclando zeolita saturada con gas metano y lodo limo arcilloso, logrando obtener burbujas de gas metano uniformemente distribuidas y con tamaños similares.
- e. **Método de intercambio del agua de poro (Rad, et al., 1994).** En este método, se emplean muestras de arena para colocarlas en moldes y compactarlas a determinada compacidad, para posteriormente saturarlas con agua desairada a cierta presión; subsiguientemente, el agua de poro se intercambia con agua saturada con gas metano, permitiendo así la creación de burbujas dentro de la muestra de arena.

III.2. Técnica empleada para reconstituir muestras de arcilla marina con gas metano

En diversos estudios se ha identificado que en los sedimentos marinos existen diversos tipos de gases. Principalmente se encuentran sulfuro de hidrógeno y metano, entre otros (Claypool y Kaplan, 1974; Schubel, 1974; Christian y Cranston, 1977; Esrig y Kirby, 1977; Bhasin y Leland, 1978; Whelan et al., 1978). El proceso de acumulación de estos gases en los sedimentos marinos se produce por diversas vías (Capítulo II) y se acumula en los estratos superficiales, que en el caso de las arcillas impiden que el gas escape a la columna de agua debido a su baja permeabilidad, formándose con el paso del tiempo un suelo gaseoso.

Para reproducir en laboratorio las burbujas de gas o vacíos con gas metano dentro de la arcilla se utilizó zeolita tipo A, que es un producto que se utiliza en la industria química como tamiz molecular para absorber diferentes tipos de sustancias, dependiendo de su tamaño molecular. En lo que respecta al gas se eligió metano por su disponibilidad en el mercado y a su relativamente fácil manipulación en laboratorio, además de que es uno de los gases con mayor presencia en los sedimentos marinos.

El procedimiento utilizado en este estudio para generar las burbujas de gas consistió en mezclar zeolita saturada con gas metano y lodo arcilloso, las burbujas de gas se formaron a medida que la zeolita liberó el gas metano. La liberación del gas requiere de un par de horas para su liberación máxima, lo que permite realizar la mezcla de la zeolita con el lodo arcilloso sin que exista una pérdida significativa de gas. Este método permite la creación y distribución de burbujas de gas metano dentro de la arcilla, representando, hasta cierto punto, «los procedimientos de acumulación que ocurren naturalmente en los ambientes marinos» (Nageswaran, 1983).

III.2.1. Propiedades de la zeolita

Las zeolitas, Figura III.1, son aluminosilicatos cristalinos con poros de tamaño uniforme y con un rango de dimensiones moleculares de 3 a 10 ángstrom; el tamaño molecular está determinado por la estructura unitaria del cristal. La zeolita contiene grandes iones y una estructura tridimensional con canales y cavidades interconectadas, formando poros que normalmente contienen moléculas de agua de hidratación, es decir, tienen una gran superficie interna que está disponible para absorber moléculas con libertad de movimiento a través de los canales, debido a que los canales o poros están distribuidos uniformemente, permitiendo intercambio iónico.

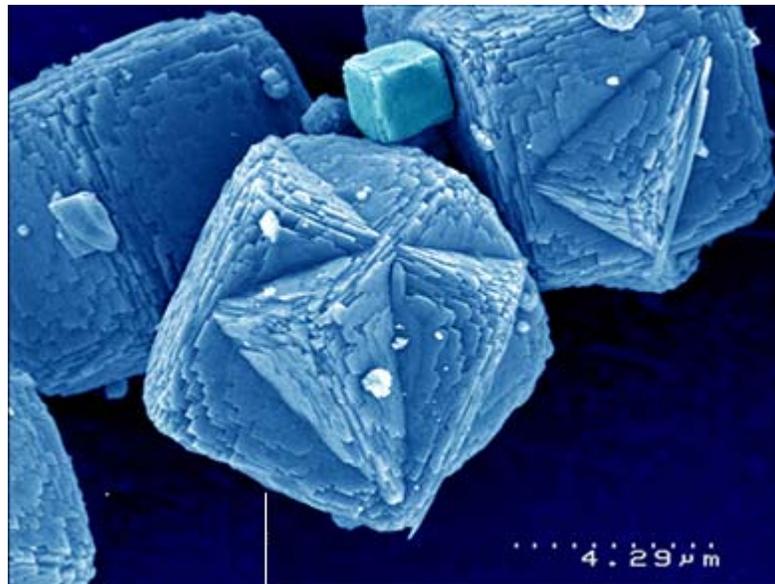


Figura III.1. Cristal de zeolita.

En la actualidad existen 88 tipos de zeolita natural y más de 150 tipos sintetizadas y están compuestas, básicamente, de minerales de silicatos de aluminio hidratado con una estructura abierta que puede alojar a una variedad de cationes, tales como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y otros. Estos



iones positivos están unidos débilmente y pueden fácilmente ser intercambiados por otros cuando entran en contacto con una solución.

Las zeolitas naturales se forman de rocas volcánicas y de capas de ceniza que reaccionan con la alcalina del agua subterránea, también se cristalizan en ambientes de post-depositación por periodos que van desde miles a millones de años en cuencas marinas someras. Algunos de los minerales más comunes presentes en la zeolita provienen de las rocas sedimentarias, estos son la chabasita, la hielandita, la filipsita, la clinoptilolita, la heroinita, la mordenita, la estilbita, la ferrierita, la laumantita, entre otros. Estos tipos de zeolitas están constituidas por aluminio, silicio, hidrógeno, oxígeno y un número variable de moléculas de agua.

La estructura cristalina está formada por tetraedros que se reúnen formando una red tridimensional, Figura III.2, en la que cada oxígeno es compartido por dos átomos de silicio, formando así parte de los minerales tectosilicatos.

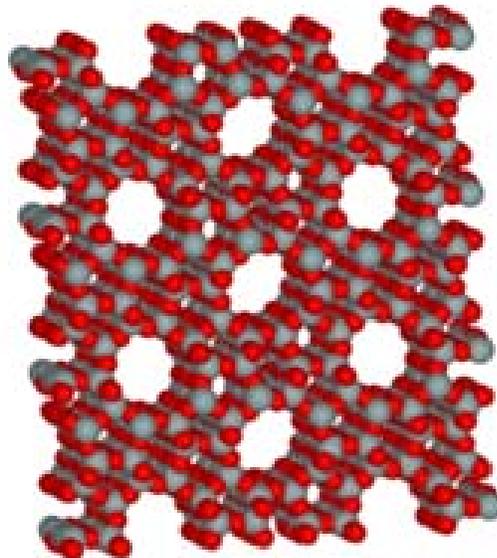


Figura III.2. Estructura molecular de la zeolita (ZSM-5).

Las zeolitas tienen una porosidad natural conformada por una estructura cristalina con ventanas, jaulas y súper-jaulas, debido a que el tamaño del poro es muy uniforme, se les conoce como "tamiz molecular". Las zeolitas también tienen la habilidad de seleccionar cierto tipo de moléculas con base, principalmente, al proceso de exclusión de tamaño, es decir, seleccionan el máximo tamaño de la molécula o del genero iónico que puede entrar en los poros de la zeolita que está controlado por el diámetro de los túneles y en el caso de las zeolitas naturales el tamaño de los poros.



Los cristales de zeolita tienen diversas propiedades, entre ellas presentan la propiedad única de remover el agua de hidratación utilizando calor, sin provocar cambios en los cristales i. e. la zeolita es estable bajo un rango adecuado de temperatura, presión o radiación ionizante, manteniéndola inalterada y resistente con cavidades o poros vacíos, disponibles para almacenar moléculas de menor tamaño dentro de sus cristales y sin permitir mas absorción una vez saturada, manteniéndolas hasta que exista una oportunidad para reemplazarlas. Otra de sus propiedades consiste en liberar las moléculas adsorbidas, como el gas, cuando la zeolita tiene contacto con el agua; generándose así, las burbujas de gas metano dentro de la arcilla.

La selección de la zeolita se efectuó comparando el diámetro molecular del gas metano (4.0 Ångstrom) con los tamaños de los poros de los diferentes cristales de zeolita disponibles. La zeolita (silicato álcali-aluminio hidratado, $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot x\text{SiO}_2\cdot y\text{H}_2\text{O}$), utilizada proviene de rocas sedimentarias y volcánicas, basaltos naturales, minerales y depósitos de arcilla y tiene un tamaño de poro menor a 10 Ångstrom, por lo tanto, la zeolita puede saturarse con gas metano y mezclarse fácilmente con el lodo arcilloso.

El utilizar cierta proporción de zeolita para mezclarla con la arcilla, no debería afectar considerablemente el comportamiento de los suelos cohesivos (Nageswaran, 1983), debido a que parte de su composición mineralógica proviene de este tipo de suelo fino y a que su peso específico relativo de los sólidos varía entre 2.37 a 2.41, valores muy cercanos a 2.65 que corresponden a la arcilla marina del Golfo de México, utilizada en este estudio.

Por otra parte, adicionar zeolita en gran cantidad al lodo arcilloso no es recomendable, debido a su naturaleza tixotrópica, que es la propiedad que le permite a un material recuperar su resistencia en un lapso de tiempo relativamente corto. La cantidad de zeolita utilizada, en este estudio, del 7 y 15 por ciento en peso total de la muestra, se definió con base a la investigación realizada por Sparks (1963) y Nageswaran (1983).

III.2.2. Experimentos con zeolita

Previo a la reconstitución de las muestras de arcilla con gas metano se efectuaron diversos experimentos con la zeolita, el procedimiento empleado consistió en saturar la zeolita deshidratada bajo presión con gas metano, para posteriormente mezclarla con cierta cantidad de agua. La zeolita al contacto con el agua presenta un intercambio, libera el gas metano y absorbe agua, formándose así las burbujas o bolsas de gas, Figura III.3, esto es debido a que las zeolitas tienen muy fuerte afinidad con moléculas polares, como es el caso del agua.



Figura III. 3. Burbujas de gas en agua.

La cantidad de metano absorbida y posteriormente liberada por cierta cantidad de zeolita, depende de factores tales como: la temperatura, la presión a la que el metano es absorbido, el tipo de metano empleado, el tiempo que la zeolita está bajo saturación con el metano, el periodo de tiempo en el que la zeolita entra en contacto con el agua, la presión ambiental cuando esto ocurre y al tamaño de los vacíos o poros de la zeolita. Y en el caso de este estudio, también, depende del suelo utilizado, pero debido a que la solubilidad del metano en la arcilla es probablemente muy bajo comparado con la solubilidad en el agua, no se considera que influya mucho en el proceso.

Para comprobar la generación de burbujas de gas en el suelo, se examinó el volumen de gas metano liberado en agua y el tiempo requerido para su liberación. En este experimento se utilizó el 7 y el 15 por ciento de zeolita en peso para un volumen de agua de 537 ml. El procedimiento realizado siguió algunos pasos indicados en la sección III.2.3., que consisten en:

- a. Se seca la zeolita a una temperatura de 105 grados centígrados por un periodo de tiempo de 24 horas. Se utilizaron 38.0 y 81.0 gramos de zeolita correspondientes al 7 y 15 por ciento, respectivamente;
- b. Se coloca la zeolita en una cámara y se le aplica una presión de succión, para generar vacío por 24 horas; esto permite extraer el aire de los poros de la zeolita. Estos dos pasos iniciales garantizan que los poros de la zeolita estén vacíos casi en su totalidad; permitiendo que el gas metano ocupe los poros de la zeolita a su máxima capacidad;
- c. Se presuriza la cámara con gas metano a 100 kN/m^2 por un periodo de 24 horas; evitando abrir la cámara para que la zeolita no absorba aire;

- d. La zeolita se coloca en un matraz graduado y se llena con los 537 ml de agua.
- e. Se tapa el matraz empleando una tapa con un tubo de plástico en medio, lo que permite drenar el agua expulsada por el gas (Figura III.4).

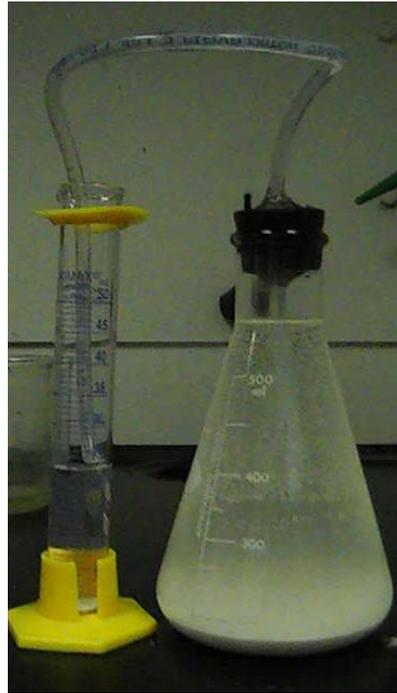


Figura III.4. Experimento para medir el volumen de gas metano.

El agua contenida en el matraz es empujada a medida que el gas metano se «genera» o libera de los poros de la zeolita, desplazándose a través del tubo para depositarse en un matraz graduado, lo que permite medir el volumen de agua desplazada, este volumen de agua es una medición indirecta del volumen de gas metano liberado por la zeolita.

La nomenclatura empleada para los experimentos es EZ7VM y EZ15PM, la letra E designa experimento, mientras que la letra Z seguida del número 7 o 15 indica el porcentaje de zeolita que se mezcló con el agua, que corresponde al porcentaje de gas metano generado. En el caso de las letras V o P indican volumen y presión, respectivamente y la última letra, M, significa metano. Por ejemplo, la nomenclatura EZ7VM indica el experimento realizado para medir el volumen de agua desplazado, empleando agua con el 7 por ciento de zeolita.

La Figura III.5 muestra el volumen de gas metano producido con la zeolita saturada al 7 y 15 por ciento en peso, respecto al volumen de agua utilizado en el experimento, que es la máxima capacidad del matraz. En la Figura III.5 se observa que se generó un volumen de gas metano de



75 mililitros durante un periodo de 296 horas (aproximadamente 12.3 días), para el caso de la zeolita al 7 por ciento, EZ7VM. El mayor volumen de gas generado se presentó aproximadamente entre la segunda y treintaidosava hora de haberse iniciado el experimento.

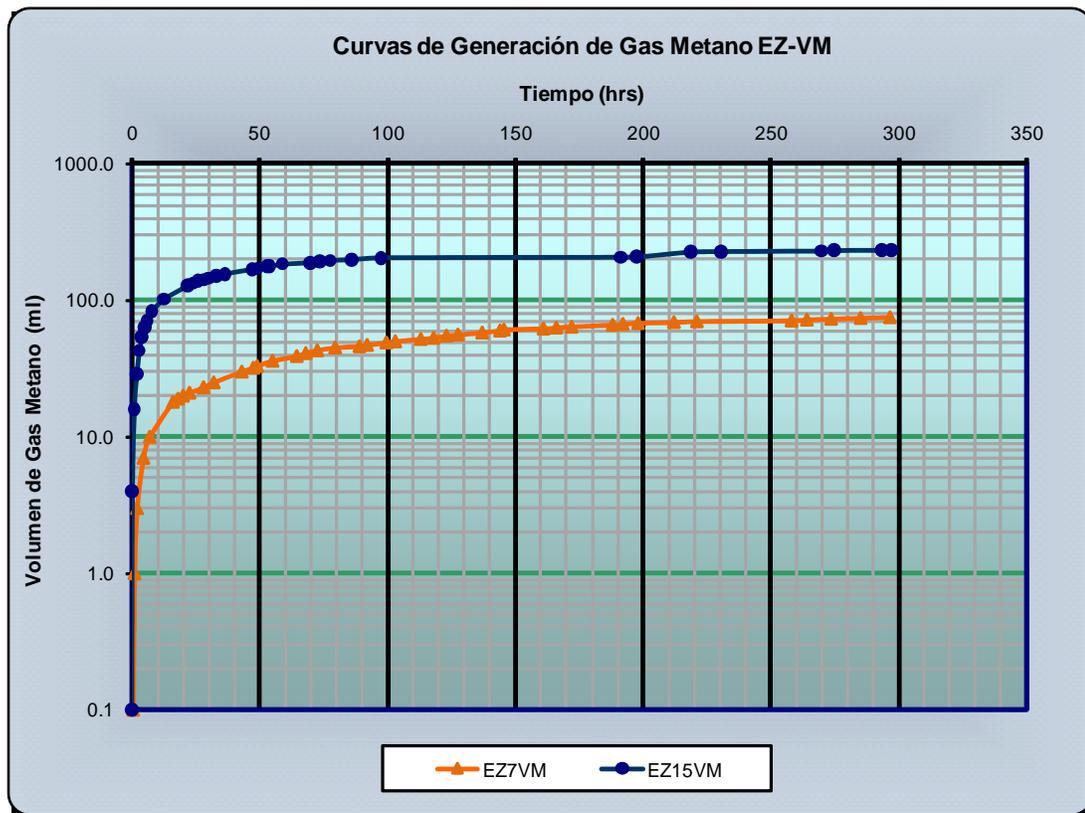


Figura III.5. Curvas de volumen de gas metano.

En lo que respecta a la zeolita al 15 por ciento, EZ15VM (Figura III.5) se generó un volumen de gas de 235 ml en un periodo de tiempo de 285 horas (aproximadamente 12 días), generándose el mayor volumen de gas aproximadamente en el mismo intervalo de tiempo que en la muestra EZ7VA. La liberación de gas metano continuó por algunos días más, pero la cantidad liberada fue muy pequeña, por lo que no se considero en los datos mostrados.

Los resultados mostrados en el Figura III.5 indican que la zeolita saturada con gas metano se puede mezclar con el lodo arcilloso durante un periodo de tiempo relativamente corto, sin que exista una considerable perdida de gas, lo que permite una buena distribución de la zeolita dentro del lodo arcilloso y, por lo tanto, una distribución uniforme de las burbujas de gas.

Otro experimento realizado consistió en medir la presión generada por el gas, en este experimento se utilizaron 34 ml de agua mezclada con el 7 y 15 por ciento de zeolita saturada. El

experimento siguió los pasos indicados anteriormente (incisos a – c); la mezcla obtenida de agua y zeolita saturada con gas metano se colocó en una cámara sellada, Figura III.6.



Figura III.6. Experimento para medir la presión del gas metano.

En la Figura III.7 se muestran las presiones obtenidas en los experimentos efectuados.

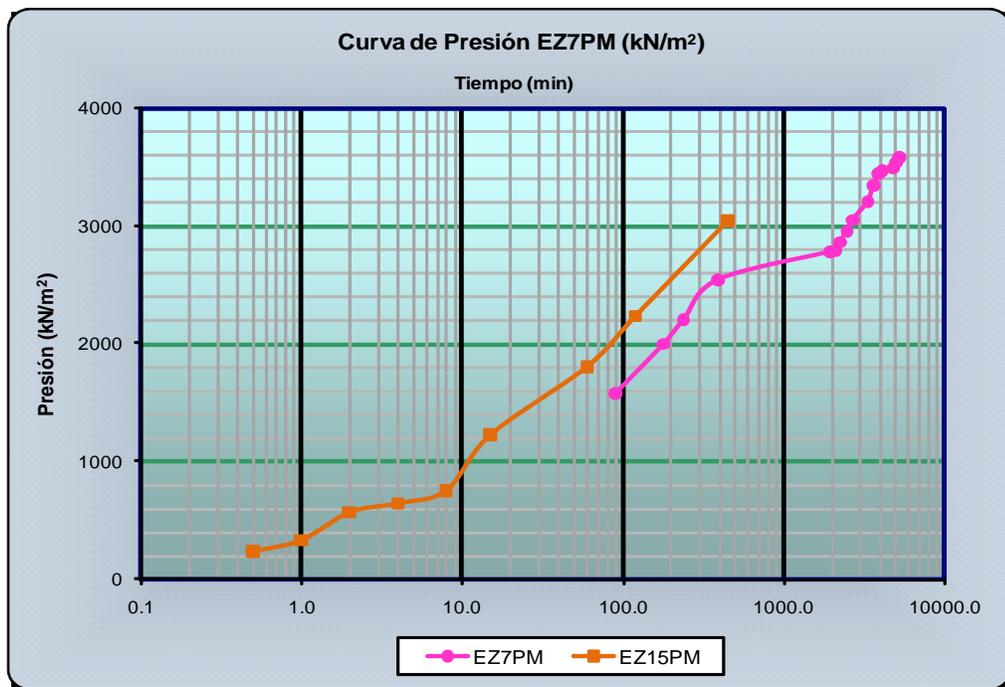


Figura III.7 Presión generada por el gas metano (experimento con zeolita al 7 y 15 por ciento).



Los resultados de las presiones desarrolladas por el gas metano indican que para el caso del agua con el 7 por ciento de zeolita saturada con gas metano (EZ7PM), se desarrolló una presión de $3\,589\text{ kN/m}^2$ en un intervalo de tiempo de 159.5 horas (un poco más de 6.5 días), para el caso del agua con el 15 por ciento de zeolita saturada (EZ15PM), se desarrolló una presión de $3\,188\text{ kN/m}^2$, pero en solo 17.5 horas. En este último experimento la presión desarrollada posteriormente fue muy alta, tanta que expulsó el sello de la cámara, originando una fuga de gas, lo que no permitió la continuación del experimento. El resultado obtenido se presenta con el propósito de comparar los dos porcentajes utilizados.

El hecho de que se genere presión dentro de la cámara indica que, posiblemente, estando confinado el gas metano es capaz de soportar parte de la carga inducida a la estructura (compuesta por gas metano, agua y suelo), esto es debido a que la presión generada por el gas es en sentido contrario a la dirección de la carga inducida y generada por esta misma al comprimir las burbujas de gas. Por lo tanto, los esfuerzos transferidos al suelo serán menores, generando así una estructura con menor consistencia al compararla con una arcilla sin gas; tal como se ve en las curvas de consolidación obtenidas durante la reconstitución de las muestras de arcilla conteniendo gas (Sección III.3.).

Estas altas presiones son poco probables que la arcilla sea capaz de soportarlas, debido a que se exceden los posibles radios de curvatura mínimos de los meniscos que forman la interfase del gas y el agua, Wheeler, 1986 y debido también a que las fuerzas intermoleculares entre las partículas de arcilla no son tan altas para mantener al gas confinado, especialmente cuando está en proceso de formación el suelo gaseoso.

III.2.3. Preparación de las muestras de arcilla marina con gas metano

Para reconstituir las muestras se utilizó arcilla marina del Golfo de México, su límite líquido varió entre 70 y 90 por ciento y su límite plástico entre 20 y 25 por ciento. Las muestras de arcilla fueron destruidas en su totalidad para crear una sola muestra de lodo arcilloso, con un contenido de agua de aproximadamente 150 por ciento.

El procedimiento para reconstituir la arcilla sin gas metano consistió en colocar una porción de lodo arcilloso en un recipiente de acrílico de 20.3 cm de diámetro y de 24.1 cm de altura (Figura III.8), posteriormente se consolidó hasta las presiones de 48.3 y 193.1 kN/m^2 , para obtener arcilla con consistencia blanda y media, respectivamente. Para el caso de las muestras de arcilla con gas metano, una vez colocado el lodo arcilloso en el recipiente se mezcló con la zeolita saturada con gas por aproximadamente 10 minutos. Este proceso no afectó la generación de las

burbujas de gas, dado que la máxima liberación de gas metano por la zeolita se presenta aproximadamente entre la segunda y treintaidosava hora y debido, también, a la baja permeabilidad de la arcilla.



Figura III.8. Equipo empleado para reconstituir la arcilla marina.

Subsiguientemente, las muestras se dejaron en reposo; para que se estabilizaran y, en el caso de las muestras con gas, para que también se creara la mayor cantidad de burbujas de gas. Una vez consolidada la muestra, se obtuvieron submuestras y se efectuaron ensayos en laboratorio para determinar las propiedades índice, para efectuar pruebas de compresión y de resistencia al esfuerzo cortante. El procedimiento utilizado se detalla a continuación:

- a) Se seca la zeolita a una temperatura de 110 grados centígrados durante 24 horas.
- b) Se coloca la zeolita en una cámara hermética y se le aplica una presión de succión de 100 kN/m^2 para generar vacío durante 24 horas y extraer el aire de los poros de la zeolita.
- c) La cámara se presuriza con gas metano a una presión de 200 kN/m^2 durante 24 horas para saturar la zeolita con gas metano.
- d) Se criba el lodo arcilloso con el tamiz número 200, para retener los fragmentos de concha.
- e) Se mezcla el lodo arcilloso con la zeolita saturada con gas metano durante 10 minutos, para distribuir la zeolita uniformemente dentro del lodo arcilloso.

- f) Se deja reposar la mezcla obtenida durante 24 horas antes de aplicar la primera carga, con la finalidad de que la muestra se estabilice y se genere la mayor cantidad de burbujas de gas metano dentro del lodo arcilloso, Figura III.9.

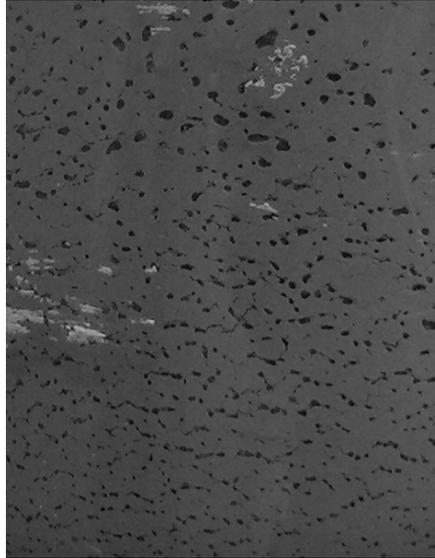


Figura III.9. Burbujas de gas metano en una muestra reconstituida de arcilla marina.

III.2.4. Características de la prueba de consolidación unidimensional

La prueba de consolidación unidimensional para la creación de las muestras de arcilla sin y con gas metano siguió los criterios establecidos en la teoría de Terzaghi. Para el ensaye se empleó una cámara de acrílico (20.3 cm de diámetro y 38.1 cm de altura), se utilizaron piedras porosas de hierro con diminutas perforaciones para permitir el flujo (Figura III.8) y un marco de carga.

Para obtener arcilla blanda las muestras se consolidaron hasta una presión de 48.3 kN/m^2 dividida en cuatro intervalos de carga (6.2, 12.1, 24.1 y 48.3 kN/m^2) y para obtener arcilla media se consolidó la muestra hasta una presión de 193.1 kN/m^2 , dividida en 6 intervalos de carga (6.2, 12.1, 24.1, 48.3, 96.5 y 193.1 kN/m^2), Tabla III.1. Para cada uno de los intervalos de carga se permitió el libre flujo y las muestras se consolidaron hasta definir claramente la consolidación primaria y que la curva de consolidación secundaria apareciera o que tuviera una tendencia clara de iniciarse. En el último intervalo de carga se permitió que se definiera el tramo de consolidación secundaria, para posteriormente iniciar el proceso de descarga de la muestra.

Tabla III.1. Intervalos de carga utilizados durante la consolidación del lodo arcilloso marino.

Consistencia de la arcilla	Intervalo de Carga					
	Carga 1 kN/m ²	Carga 2 kN/m ²	Carga 3 kN/m ²	Carga 4 kN/m ²	Carga 5 kN/m ²	Carga 6 kN/m ²
Blanda sin y con gas metano	6.21	12.07	24.13	48.27	----	----
Media sin y con gas metano	6.21	12.07	24.13	48.27	96.53	193.06

En el Apéndice A se presentan en detalle las consideraciones seguidas durante las pruebas de reconstitución de la arcilla.

III.2.5 Apariencia de la arcilla marina con gas

En la Figura III.10 se observa claramente el efecto que tiene el gas en la apariencia y en la textura de la arcilla. La Figura III.10 muestra dos fotografías de una muestra reconstituida de arcilla blanda con el 7 por ciento de gas metano tomadas antes y después de realizarse la prueba de consolidación a deformación constante.

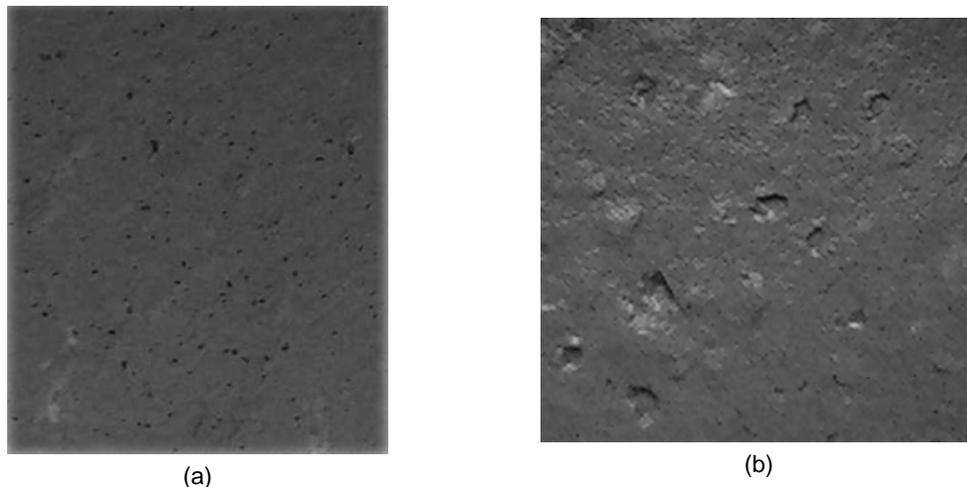


Figura III.10. Arcilla blanda con gas metano al 7 por ciento antes (a) y después (b) de la prueba de consolidación a deformación constante.

En la Figura III.10(a) se observan pequeñas circunferencias generadas por la presencia de gas, estas circunferencias son mayores que el tamaño de las partículas de la arcilla y en la Figura III.10(b) se observan, además, marcas de expulsión de gas, esto es debido a que varias burbujas se unieron y formaron una sola, presurizándose debido a la carga inducida, para posteriormente emanar de la muestra una vez que la presión no pudo ser soportada por el

confinamiento proporcionado de la arcilla, siendo esto un indicativo del desarrollo de presión en las burbujas de gas generadas con la zeolita.

En la Figura III.11 se presenta una fotografía de rayos X tomada a una muestra reconstituida de arcilla marina con el 7 por ciento de gas metano, en la muestra se ven claramente los efectos provocados por el gas metano en la apariencia de la arcilla y como consecuencia de la presencia del gas, la muestra presenta cierta alteración de sus propiedades mecánicas, esta alteración se refleja en los resultados estáticos de laboratorio obtenidos (Capítulo IV) y sí se presenta alteración estática, por consecuencia, existe alteración o cambio en las propiedades dinámica de la arcilla marina. La muestra reconstituida de arcilla con gas metano presentada en la Figura III-11 presenta cierta similitud con las muestras obtenidas y presentadas por Schubel, 1974a y por Whelan, et al., 1975.



Figura III.11. Rayos X de una muestra de arcilla marina con gas metano.



III.3. Pruebas de consolidación unidimensional para reconstituir muestras de arcilla marina sin y con gas metano

Para conocer el comportamiento y evaluar la variación de las propiedades mecánicas, tal como la resistencia al esfuerzo cortante, de la arcilla marina sin y con gas metano, se reconstituyeron muestras y se realizaron ensayos de laboratorio. La reconstitución de las muestras se realizó a través de la consolidación de lodo arcilloso marino, empleando presiones que permitieron obtener arcilla marina de consistencia blanda y media sin gas, con el 7 y 15 por ciento de gas metano en peso. Los intervalos de carga empleados para consolidar el lodo arcilloso marino se presentan en la Tabla III.1.

III.3.1. Nomenclatura

La nomenclatura empleada para los ensayos de laboratorio es SZ0 y FZ0, las letras S y F al inicio designan una arcilla marina de consistencia blanda y media, respectivamente, siendo esto el resultado final de las pruebas de consolidación para reconstituir las muestras de arcilla marina. La letra Z seguida de un número indica el porcentaje de zeolita que se mezcló con el lodo arcilloso marino, es decir, el número cambia cuando se emplea el 7 y el 15 por ciento de zeolita, lo que corresponde al porcentaje de gas metano generado dentro del lodo arcilloso marino.

En lo que respecta a las pruebas de consolidación para reconstituir las muestras de arcilla marina, la nomenclatura empleada es SZ7C1 o FZ15C1. En este caso, la letra C seguida de un número indica el intervalo de carga aplicado durante la prueba. Por ejemplo, SZ0C1 indica una arcilla marina blanda sin gas metano y durante su primer intervalo de carga, que corresponde a 6.21 kN/m^2 . Para los siguientes intervalos de carga solo cambia el último número, es decir, la nomenclatura SZ0C3 corresponde a una arcilla marina blanda sin gas metano y durante su tercer intervalo de carga, que equivale a 24.13 kN/m^2 , tal como se indica en la Tabla III-1.

El procedimiento detallado y algunas comparaciones de las curvas de consolidación, obtenidas durante la reconstitución de la arcilla marina sin y con gas metano para cada una de las consistencias, se presentan en el Apéndice A.

III.3.2. Análisis de los resultados de la arcilla marina blanda sin y con gas metano

Previo al inicio de la prueba de consolidación para reconstituir las muestras de arcilla marina se observó flujo de agua al exterior de la cámara, acumulándose en promedio 1.0 cm de agua en ambos extremos de la muestra. El fenómeno de la expulsión de agua es un indicativo del

desarrollo de presión por el gas en condiciones atmosféricas, esta presión se incrementó a medida que el gas metano fue liberado por la zeolita y, al mismo tiempo, se observó que la muestra aumentaba de volumen.

En la Figura III.12 se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina blanda sin y con gas metano, obtenidas durante el primer intervalo de carga (6.21 kN/m^2). En la Figura III.12 se observa que la deformación vertical de la curva SZ7C1 es menor que en la muestra sin gas, mientras que en la curva SZ15C1 se percibe que la deformación ocurrida durante los primeros 15 minutos es debida al flujo de gas, liberándose así parte de la presión mantenida en las burbujas de gas metano. Ambos casos indican que el gas interactúa con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga aplicada, ya que una «*parte del incremento del esfuerzo total es soportado por el fluido de poro*», Nageswaran, 1983, siempre que la estructura (i. e. gas, agua y partículas de arcilla) se equilibre ante la carga actuante. Este comportamiento se debe a que la arcilla por su baja permeabilidad confina al gas, reduciéndose de esta manera el esfuerzo efectivo en la estructura del suelo.

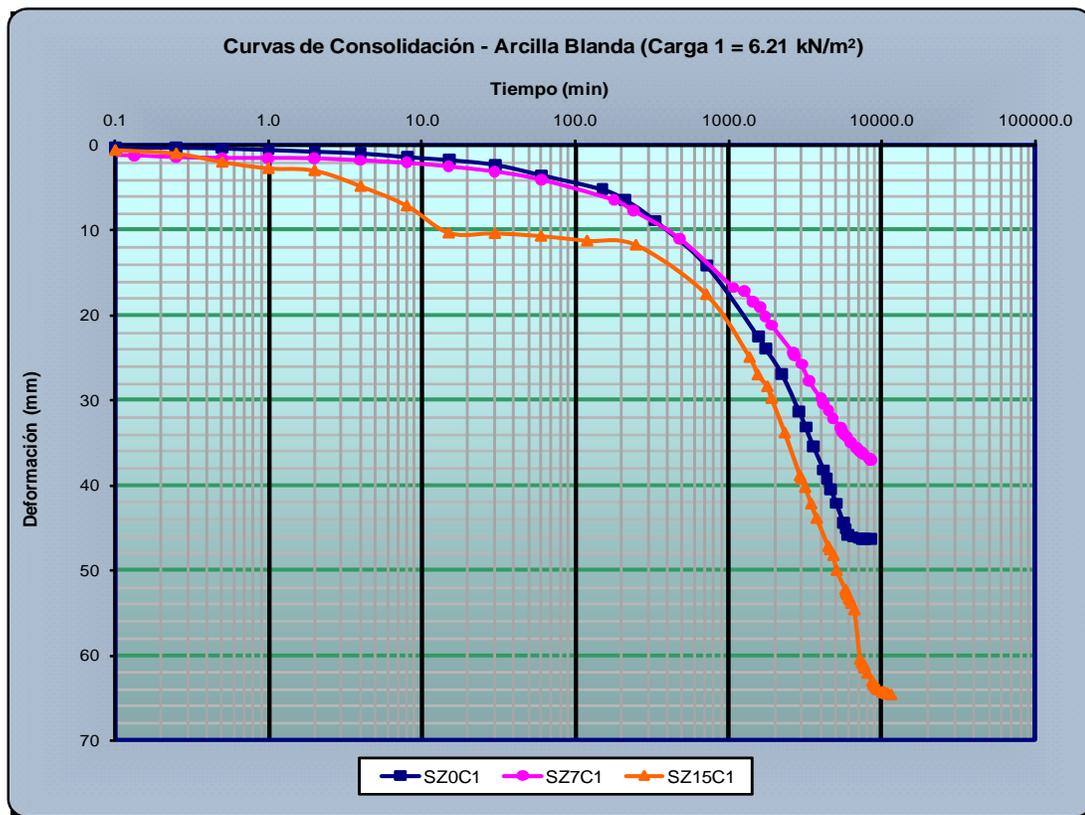


Figura III.12. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano obtenidas durante el primer intervalo de carga.



Para el primer intervalo de carga se obtuvo una deformación vertical de 46.39, de 37.04 y de 64.62 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Estas deformaciones verticales equivalen aproximadamente al 20 por ciento de menor deformación para el 7 por ciento de gas y de aproximadamente 40 por ciento de mayor deformación para la arcilla con el 15 por ciento de gas metano, ambos porcentajes con respecto a la arcilla sin gas. La deformación de la arcilla con el 15 por ciento de gas es mayor en aproximadamente 74 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

El tiempo requerido para consolidar la arcilla durante el primer intervalo de carga fue de 8 490 minutos (141.5 horas), de 8 520 minutos (142.0 horas) y de 11 580 minutos (193.0 horas) para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Por lo tanto, se utilizó prácticamente el mismo tiempo para consolidar la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, pero esta última con menor deformación vertical, por lo que se requiere mayor carga para obtener la consistencia de la arcilla marina sin gas metano. En el caso de la deformación de la arcilla con gas al 15 por ciento, no corresponde solamente al flujo de agua, sino que también se relaciona, en parte, a la compresión del gas y es debido a que la *«respuesta no drenada de un suelo gaseoso produce cambio de volumen, por la compresibilidad de las burbujas de gas»*, Silis et al., 1991.

En la Figura III.13 se presentan las curvas de consolidación de la arcilla marina blanda con y sin gas metano, correspondientes al segundo intervalo de carga (12.07 kN/m^2) y se observa que las curvas de la arcilla con gas metano presentan menor deformación que la arcilla sin gas, obteniéndose menor deformación en la arcilla con mayor contenido de gas, sugiriendo que posiblemente el gas soporta parte de la carga aplicada al suelo, obteniéndose como resultado una estructura más compresible y por lo tanto más débil, al compararla con la arcilla sin gas, similar a los bajos resultados de la resistencia al esfuerzo cortante presentados por Coleman et al., 1978; Whelan et al., 1975 y 1977; Esrig y Kirby, 1977; Denk et al., 1981, y los resultados de Nageswaran, 1983.

El hecho de que se obtenga menor deformación en la arcilla con gas contradice lo establecido por Nageswaran, 1983, que en su estudio escribió que a *«medida que se incrementa el contenido de gas la consolidación es más rápida»*, pero esta afirmación es debida a que en su estudio empleó un suelo limo arcilloso, que es una estructura con vacíos más grandes y más permeable que la arcilla, por lo tanto, este concepto no puede ser extendido a todos los suelos finos.

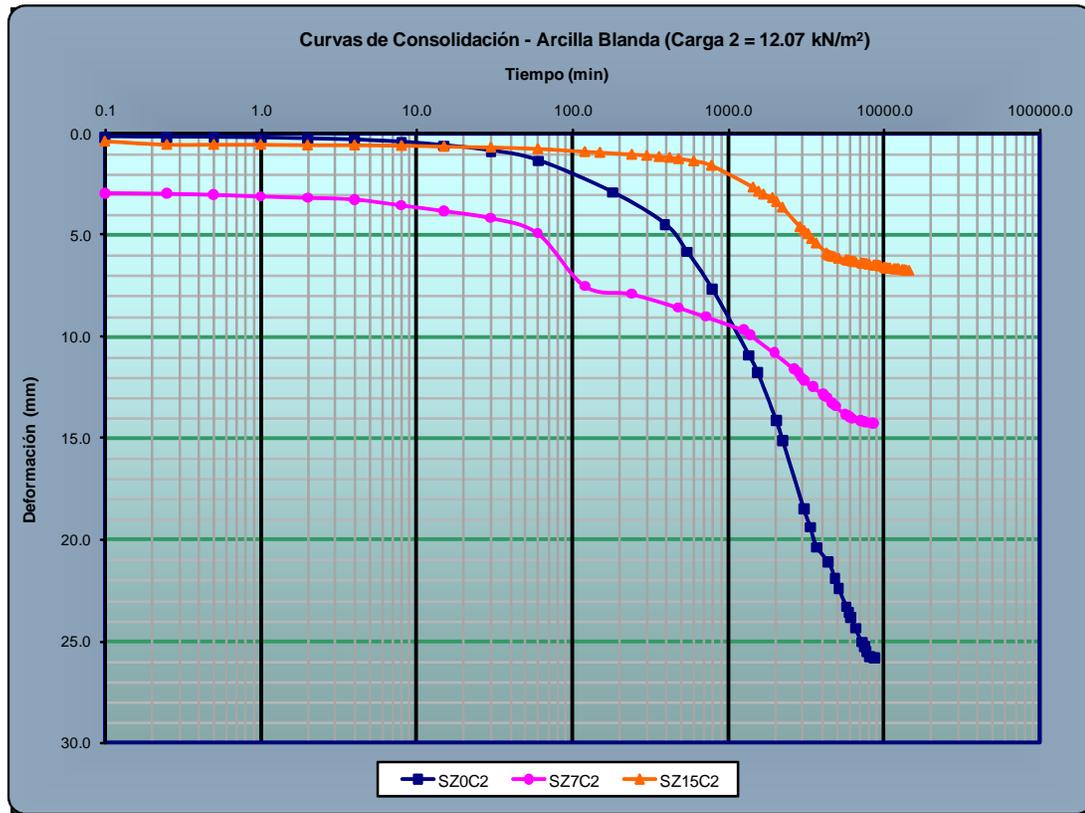


Figura III.13. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano, obtenidas durante el segundo intervalo de carga.

En la curva SZ7C2 (Figura III.13) se observa que existe una parte convexa en la etapa de la consolidación primaria, esta convexidad se asocia a una disipación de la presión en cierto intervalo de tiempo, indicando que los esfuerzos inducidos sobrepasaron la presión de confinamiento generada por la arcilla marina para posteriormente equilibrarse, reduciéndose de esta manera el volumen de las burbujas de gas metano y reacomodándose este para interactuar con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga inducida. En cambio, en la curva SZ15C2 se observa que el tramo recto de la consolidación primaria se prolonga al compararlo con el de la arcilla sin gas metano, indicando que no se han sobrepasado los esfuerzos soportados por el gas, por lo tanto, el gas interactúa con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga aplicada, obteniéndose, como resultado, menor deformación vertical.

Durante el segundo intervalo de carga se obtuvo una deformación vertical de 25.83, de 14.28 y de 6.75 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente; estas deformaciones equivalen aproximadamente al 45 y 74 por ciento de menor deformación para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto

a la diferencia en deformación de la arcilla con gas al 15 por ciento es de aproximadamente 53 por ciento menor, con respecto a la arcilla con el 7 por ciento de gas; estos resultados indican que a mayor cantidad de gas se presenta menor deformación y se deduce, por lo tanto, que el gas soporta mayor carga, al menos en lo que respecta a estos niveles de carga. Esto indica que la deformación de un suelo gaseoso depende de su «*contenido de gas, de su rigidez y de su permeabilidad*», Nageswaran, 1983.

El tiempo para consolidar las muestras de arcilla durante el segundo intervalo de carga fue de 8 640 minutos (144.0 horas), de 8 580 minutos (143.0 horas) y de 8 010 minutos (133.5 horas) para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Por lo que se empleó prácticamente, el mismo tiempo para consolidar la arcilla sin gas y con gas, pero obteniéndose menor deformación en la arcilla con gas.

En la Figura III.14 se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina blanda con y sin gas metano, obtenidas durante el tercer intervalo de carga (24.13 kN/m^2).

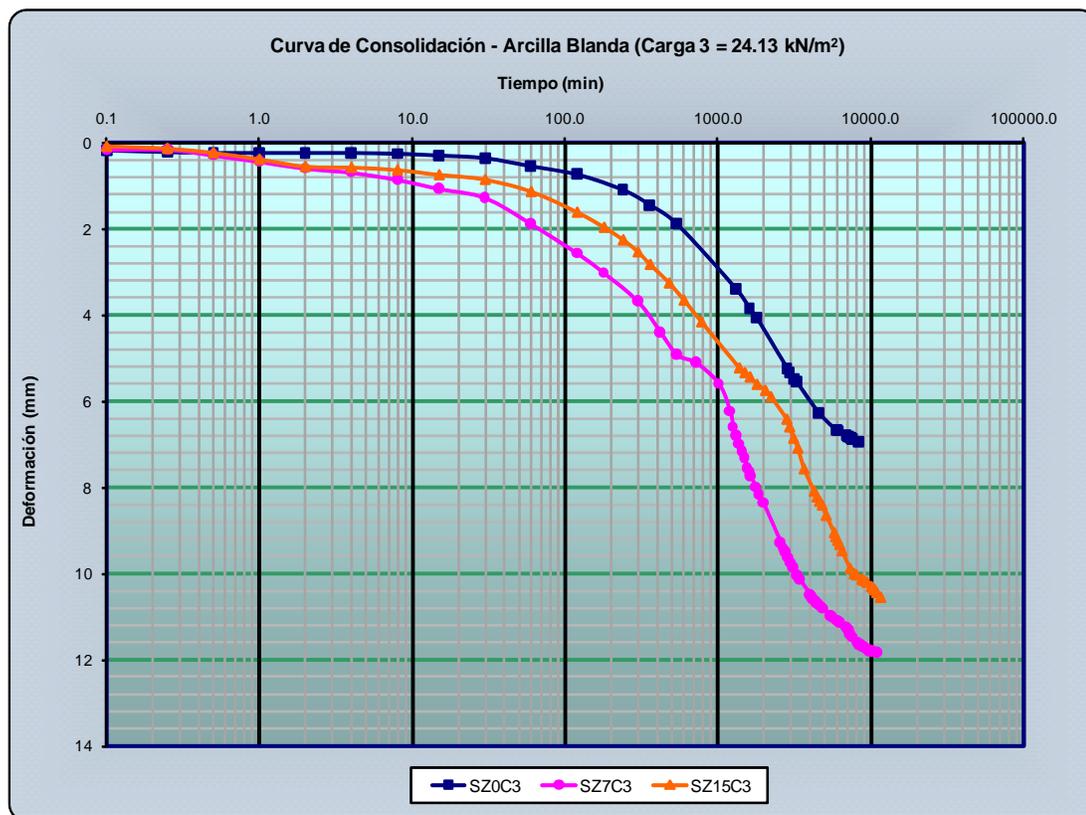


Figura III.4. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano obtenidas durante el tercer intervalo de carga.



En la Figura III.14 se observa que las curvas correspondientes a la arcilla marina con gas metano presentan una parte cóncava durante la consolidación primaria, que está asociada al desarrollo de alta presión dentro de la estructura y se genera debido al confinamiento generado por la arcilla, distribuyéndose con el tiempo a la estructura del suelo compuesta por el gas, el agua y las partículas de arcilla. La sobrepresión está representada por un sector circular en la curva SZ7C3 y por una concavidad en la curva SZ15C3 y para que se distribuya el exceso de presión se requieren (3) tres y 1.83 días, respectivamente.

En el tercer intervalo de carga se obtuvo una deformación vertical de 6.95, de 11.83 y de 10.55 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Estas deformaciones equivalen aproximadamente al 70 y al 52 por ciento de mayor deformación vertical para la arcilla con el 7 y 15 por ciento de gas, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia entre la arcilla con gas es de aproximadamente 11 por ciento de menor deformación en la arcilla con el 15 por ciento de gas. Esto indica que a mayor cantidad de gas la nueva estructura (gas metano, agua y suelo) es capaz de soportar mayor carga, obteniéndose como resultado de esta interacción una estructura más compresible y, por lo tanto más débil.

El tiempo empleado para consolidar la arcilla durante el tercer intervalo de carga fue de 8 430 minutos (140.5 horas), de 11 100 minutos (185.0 horas) y de 11 580 minutos (193.5 horas) para la arcilla sin gas y con el 7 y 15 por ciento de gas, respectivamente. Durante este intervalo de carga se incrementaron los tiempos para consolidar la arcilla con gas y se asocia a la resistencia generada por el gas e implica que el gas soporta parte de la carga aplicada, requiriéndose mayor tiempo para transferir parte de la carga a la estructura del agua-suelo.

En la Figura III.15a se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina blanda sin y con gas metano, obtenidas durante el último intervalo de carga (48.27 kN/m^2) y se observa que la arcilla con mayor contenido de gas (SZ15C4) se presenta una parte cóncava al final de la consolidación primaria (Figura III.15b). Esta concavidad se asocia al desarrollo de alta presión, que se genera debido a que la carga aplicada reacomoda y agrupa las burbujas de gas metano, generando mayor presión dentro de ellas, pero sin presentarse flujo de gas hacia el exterior, es decir, que la carga cambia y «*acomoda las cavidades de las burbujas*», Wheeler, 1986, formando una nueva estructura con una «*deformación que no es a volumen constante*», Sills et al., 1991, por lo tanto, la carga es soportada por las tres fases del suelo, i.e. gas metano-agua-suelo. En estas condiciones el comportamiento del gas es similar al de un amortiguador, ya que si se retira la carga aplicada las burbujas de gas recuperan su volumen, que es parcial en la nueva estructura, debido a la expulsión del agua de poro.

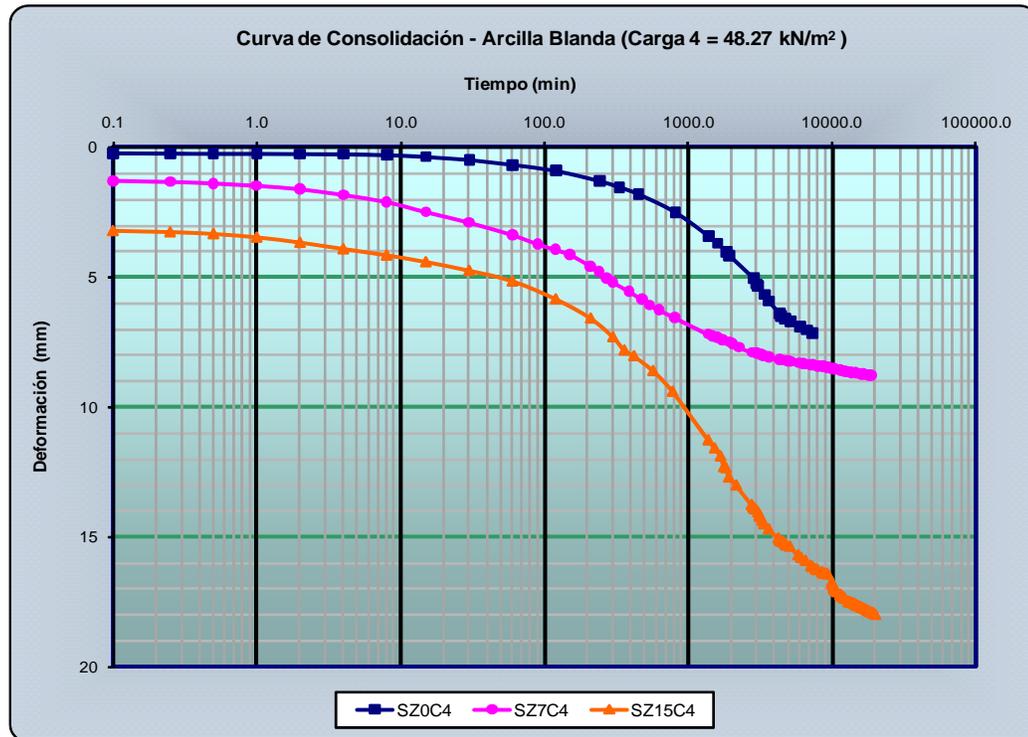


Figura III.15a. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano obtenidas durante el cuarto intervalo de carga.

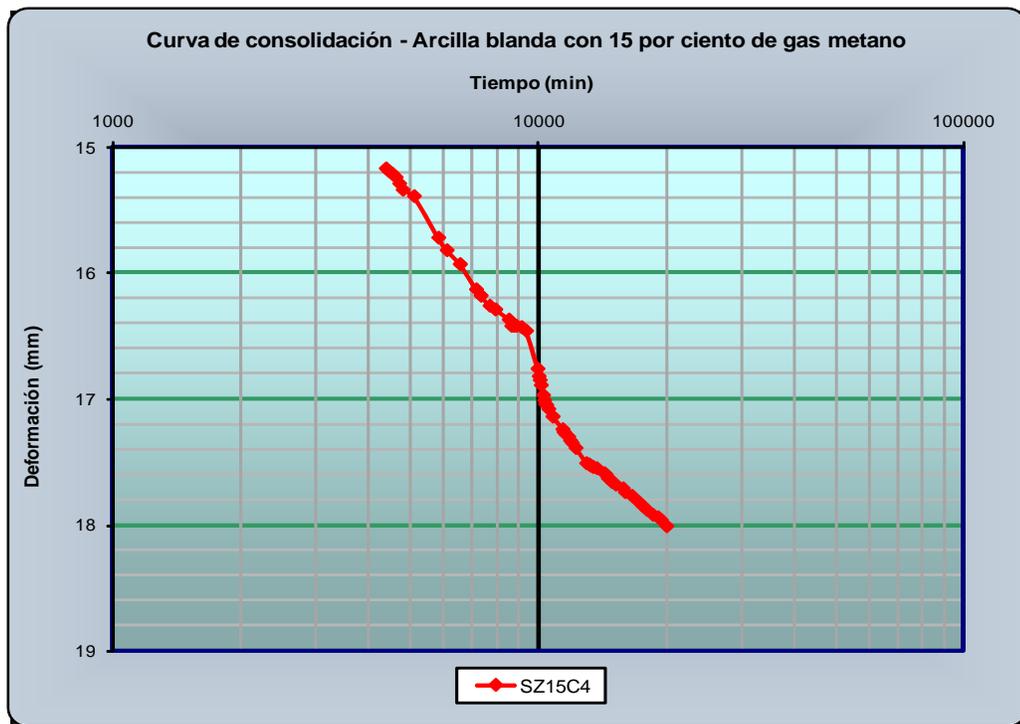


Figura III.15b. Parte de la curva de consolidación SZ15C4.



Durante la aplicación del último intervalo de carga en la arcilla blanda se obtuvo una deformación vertical de 7.18, de 8.81 y de 18.01 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Estas deformaciones equivalen aproximadamente al 23 y al 151 por ciento de mayor deformación, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Esto indica, que la deformación generada por la carga es debida, principalmente, a la reducción del volumen de gas, una vez que este es estable dentro de la estructura y que la arcilla le proporciona mayor confinamiento, por lo que, se requiere mayor carga para obtener la misma consistencia que en la arcilla sin gas, a medida que la cantidad de gas se incrementa.

El tiempo empleado para consolidar la arcilla durante el último intervalo de carga fue de 7 260 minutos (121.0 horas), de 18 780 minutos (314.5 horas) y de 20 010 minutos (333.5 horas) para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Por lo tanto, los tiempos para consolidar la arcilla con gas se incrementaron, aunque la consolidación primaria para la arcilla con el 7 por ciento de gas terminó aproximadamente a los 9 000 minutos (150.0 horas). Durante este intervalo de carga se incrementó notablemente el tiempo de consolidación en la arcilla con el 15 por ciento de gas metano, se infiere que este incremento es debido a que, posiblemente, el gas soporta parte de la carga, por lo tanto, se requiere mayor tiempo para consolidar la arcilla a mayor cantidad de gas.

III.3.2.1. Etapa de descarga de la arcilla marina blanda sin y con gas.

En la Figura III-16 se presentan las curvas de descarga de la arcilla marina sin y con gas metano y se observa que la arcilla sin gas metano presenta menor deformación a medida que se descarga el suelo, como normalmente ocurre en esta etapa de la prueba de consolidación. El mismo comportamiento se presenta en la arcilla con el 7 por ciento de gas, exceptuando que en el último intervalo de descarga la muestra de arcilla se expande ligeramente por arriba del segundo intervalo de descarga. En lo que respecta a la arcilla con el 15 por ciento de gas, se observa que la expansión final es mayor a medida que se descarga la muestra, aunque la primera descarga presenta la mayor expansión inicial.

De estos resultados se deduce que la expansión de los suelos con gas es mayor cuando se ha quitado el pistón de carga a la muestra, permitiendo la libre expansión, es decir, que la expansión del gas está limitada por cuanto se levanta el pistón durante el intervalo de descarga y este fenómeno es más notorio a mayor cantidad de gas. También los resultados muestran que pequeñas variaciones de presión no afectan significativamente a un suelo gaseoso, ya que se conserva la presión relativa de las burbujas de gas, debido al confinamiento proporcionado por la

arcilla. Este fenómeno, como se ha visto en muchas pruebas, no se presenta en la arcilla que no tiene gas. También, se observa que la expansión inicial disminuye con cada etapa de descarga, tal como sucede en la arcilla sin gas metano, por lo tanto, la arcilla sin gas o con gas se comporta de la misma manera ante la descarga.

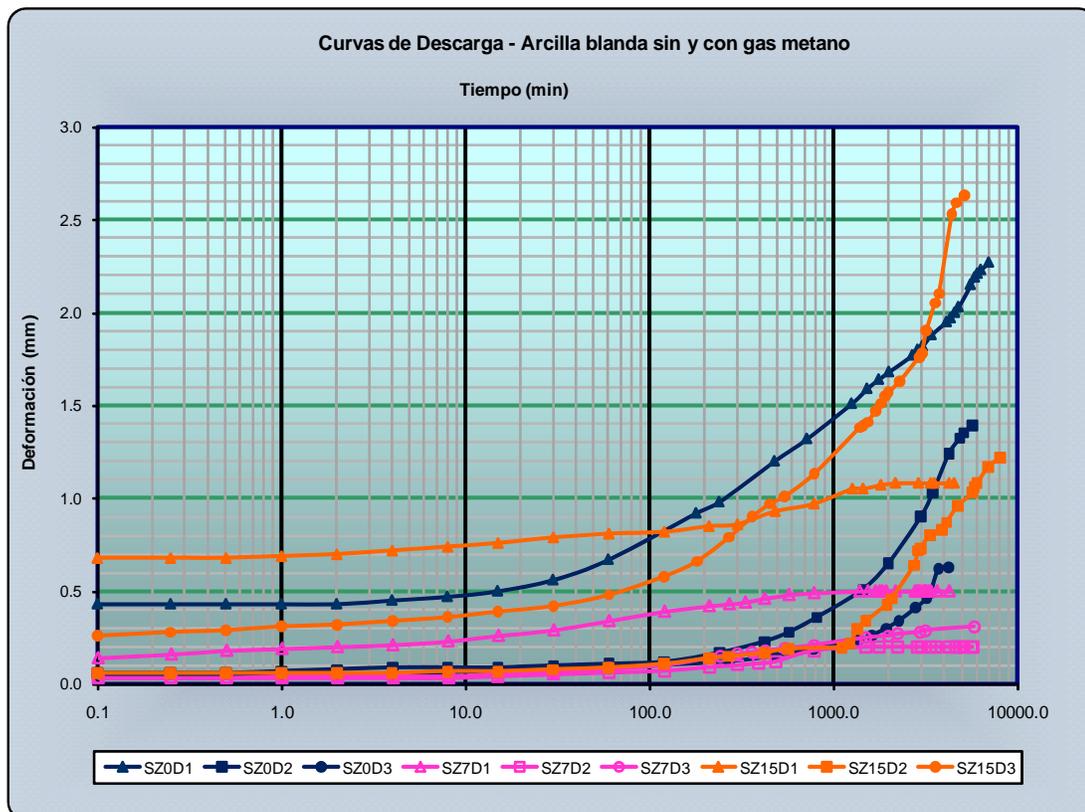


Figura III.16. Curvas de descarga de la arcilla blanda sin y con gas metano.

III.3.2.2. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas.

En la Figura III.17 se presentan las curvas de compresibilidad de la arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que a medida que se incrementa la cantidad de gas metano en la arcilla esta presenta mayores valores de deformación al final del ensaye. En cuanto a la arcilla con gas al 7 por ciento, se observa (Figura III.17) que la deformación obtenida es menor en los dos primeros intervalos de carga y ligeramente mayor en los dos últimos intervalos de carga, con respecto a la arcilla sin gas. En lo que respecta a la arcilla con gas al 15 por ciento se observa que solamente el segundo intervalo de carga es menor que el de la arcilla sin gas, mientras que los tres restantes, generalmente, son mayores.

Al comparar la arcilla con gas metano, se observa (Figura III.17) que la de mayor contenido presenta en el segundo y tercer intervalo de carga menores valores que la arcilla con menor contenido de gas, posiblemente, porque el gas está soportando parte de la carga inducida.

En lo que respecta a la etapa de descarga, se observa que en la arcilla sin gas los valores decrecen a medida que se descarga el suelo, mientras que los correspondientes a la arcilla con gas se incrementan al final del ensaye, siendo mayor la deformación a mayor contenido de gas. Otra característica del tramo de descarga, es que la arcilla con menor contenido de gas presenta los menores valores de expansión.

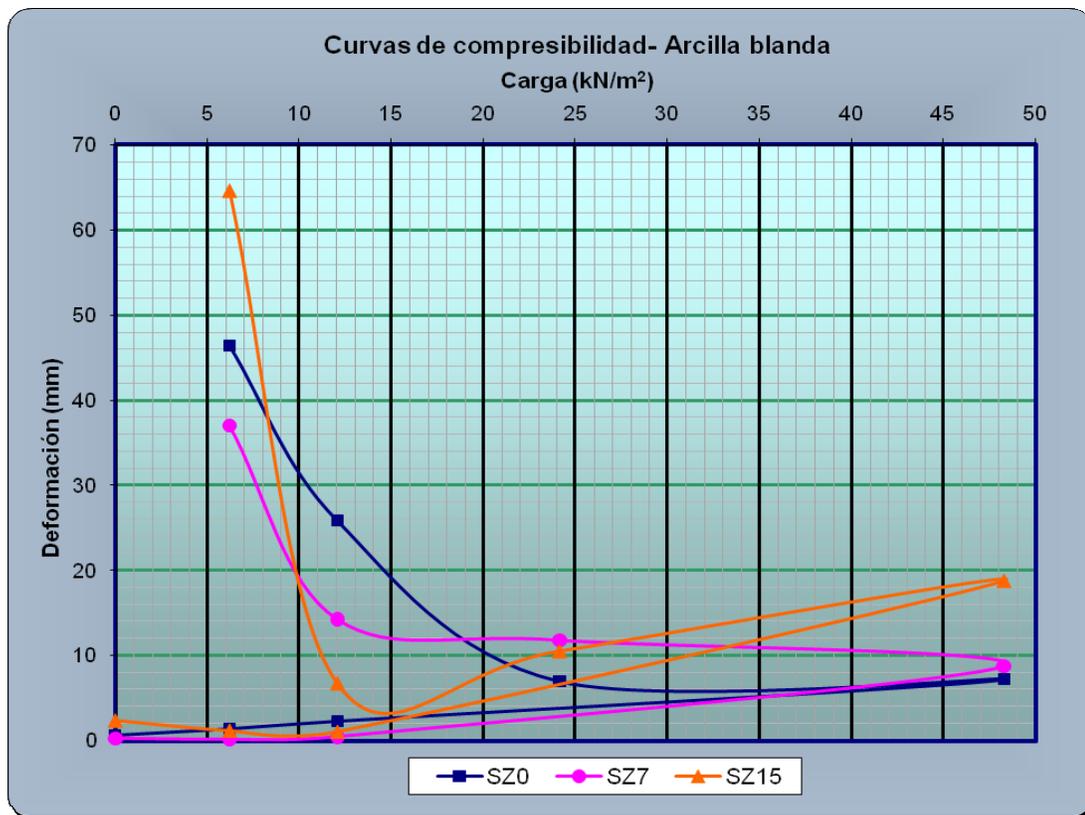


Figura III.17. Curvas de compresibilidad de la arcilla blanda sin y con gas metano.

III.3.3. Análisis de los resultados de la arcilla marina media sin y con gas metano

En la Figura III.18 se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el primer intervalo de carga (6.21 kN/m^2). En la Figura III.18 se observa que el tramo recto de la consolidación primaria de las curvas de consolidación de la arcilla con gas se prolonga y una vez que se sobrepasan los esfuerzos soportados por las burbujas de gas metano, la curva cambia su configuración abruptamente,

formándose una sección cóncava en cada una de las curvas de la arcilla con gas, estas concavidades, como se mencionó anteriormente, representan una transferencia parcial de carga, durante determinado intervalo de tiempo. También se observa, que el tramo recto es mayor a mayor contenido de gas metano, de este comportamiento se deduce que el gas metano es capaz de soportar mayor carga a mayor contenido del mismo. Además se observa que después de la concavidad las curvas de la arcilla con gas metano siguen la configuración de la arcilla sin gas, es decir, presentan un comportamiento uniforme después de la liberación de la presión del gas, lo que indica que la nueva estructura (gas metano, agua y partículas de arcilla) está en equilibrio.

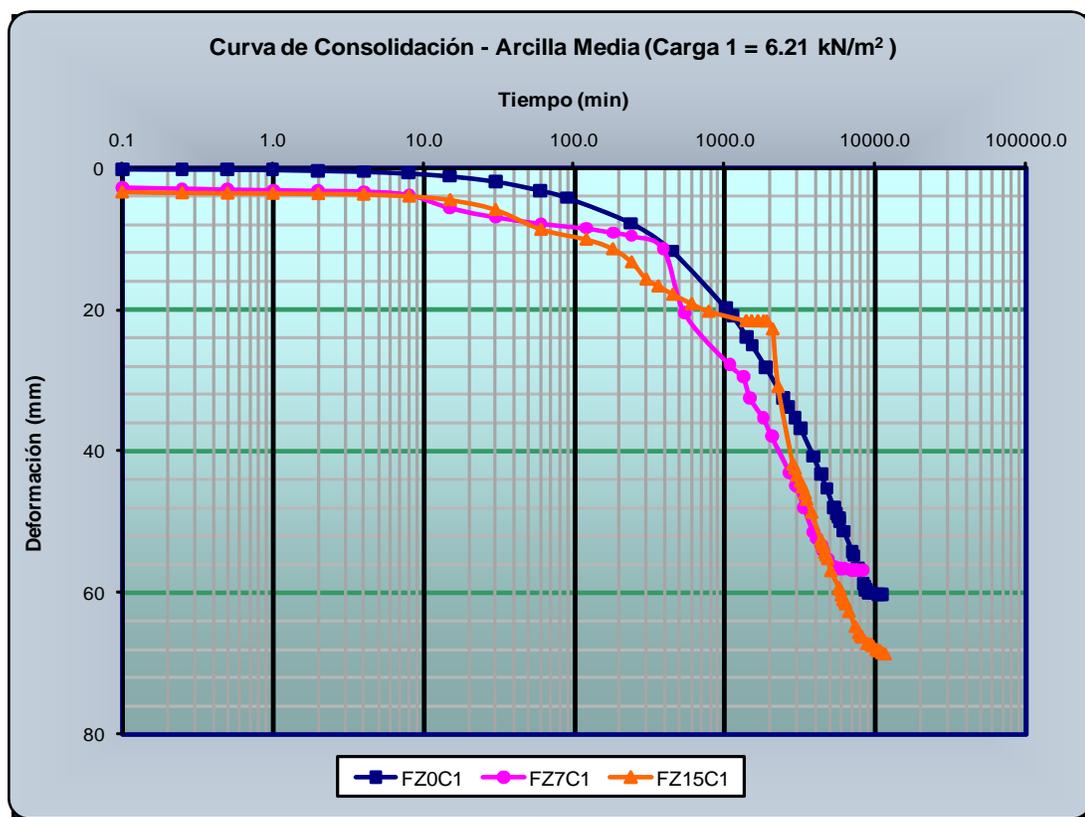


Figura III.18. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el primer intervalo de carga.

Para el primer intervalo de carga se obtuvo una deformación vertical de 60.16, de 56.86 y de 68.58 mm para la arcilla sin gas y con el 7 y 15 por ciento de gas metano, respectivamente. Estas deformaciones equivalen aproximadamente al 6 por ciento de menor deformación para la arcilla con el 7 por ciento de gas y al 14 por ciento de mayor deformación vertical para el 15 por ciento de gas, ambos porcentajes con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con el 15 por ciento de gas se obtuvo aproximadamente el 21 por ciento de mayor deformación con respecto



a la arcilla con el 7 por ciento de gas. Las deformaciones de la arcilla con gas indican que el gas interactúa con el agua de poro y las partículas de arcilla para soportar la carga inducida, reflejándose esto en una menor deformación, para el caso de la arcilla con el 7 por ciento de gas. En el caso de la arcilla con el 15 por ciento de gas metano se obtuvo una deformación relativamente igual a la arcilla sin gas.

El tiempo empleado para consolidar la arcilla durante el primer intervalo de carga fue de 11 100 minutos (185.5 horas), de 8 220 minutos (137.0 horas) y de 11 520 minutos (192.0 horas) para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Por lo tanto, se empleó menor tiempo para consolidar la arcilla con el 7 por ciento de gas y mayor tiempo para la arcilla con el 15 por ciento de gas, ambas con respecto a la arcilla sin gas.

En la Figura III.19 se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el segundo intervalo de carga (12.07 kN/m^2).

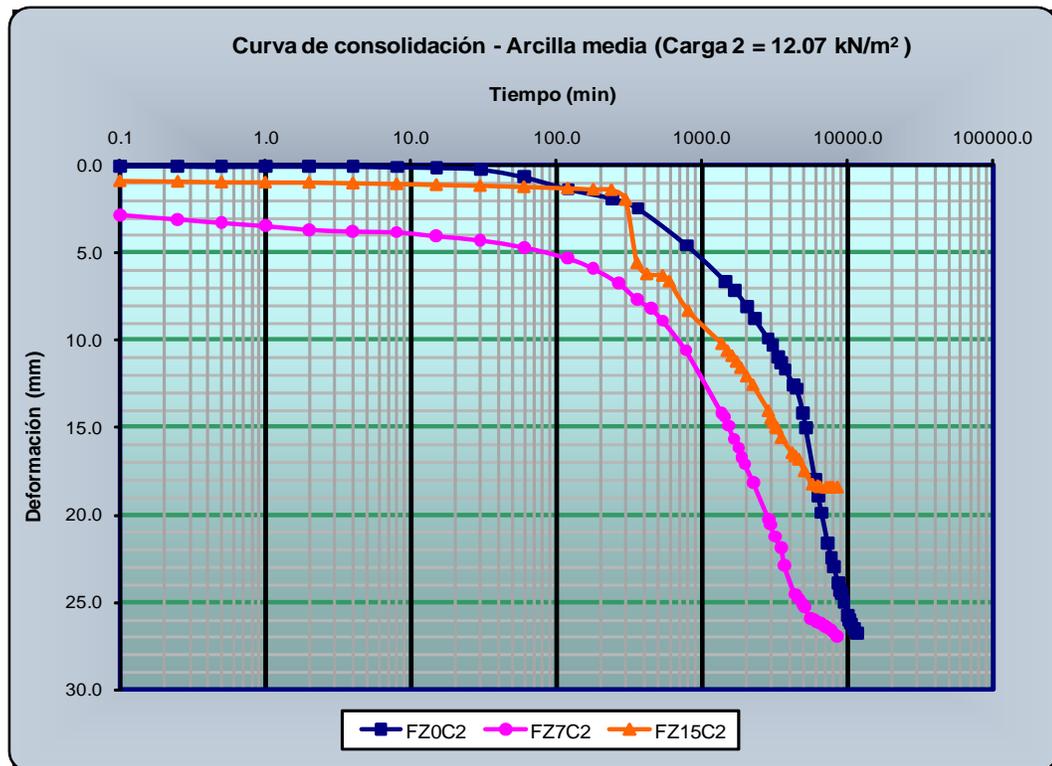


Figura III.19. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el segundo intervalo de carga.



En la curva FZ7C2 se observa un comportamiento similar a la arcilla sin gas, pero con mayor deformación al inicio de la carga, este comportamiento puede estar influenciado por el escape de gas libre durante el reajuste del pistón de carga, pero no influyó en las características finales de la arcilla con gas, tal como se observa en los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio (Capítulo IV) y con base a la configuración de las curvas de consolidación obtenidas durante la aplicación de los siguientes intervalos de carga. En la curva FZ15C2 se observa que el gas soporta parte de la carga inducida, esto se induce porque el inicio de la curva de consolidación es prácticamente recto. También se observa que se presenta una disipación de presión, generada porque los esfuerzos soportados por el gas han sido rebasados, esto está representado por una sección convexa en la curva de consolidación primaria.

Durante el segundo intervalo de carga se obtuvo una deformación vertical de 26.78, de 27.01 y de 18.44 mm para la arcilla sin y con gas metano el 7 y 15 por ciento, respectivamente, esto equivale aproximadamente al uno por ciento de mayor deformación para la arcilla con el 7 por ciento de gas y al 31 por ciento de menor deformación vertical para el 15 por ciento de gas, ambos porcentajes con respecto a la arcilla sin gas. Para el caso de la arcilla con el 15 por ciento de gas se obtuvo aproximadamente el 31.7 por ciento de menor deformación, con respecto a la arcilla con el 7 por ciento de gas.

El tiempo empleado para consolidar la arcilla durante el segundo intervalo de carga fue de 11 580 minutos (193.0 horas), de 8 580 minutos (143.0 horas) y de 8 580 minutos (143.0 horas) para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. El tiempo empleado para consolidar a la arcilla con el 15 por ciento de gas produjo una deformación menor que en la arcilla sin gas, pero definiéndose los dos tramos de la consolidación, esto implica que la nueva estructura de suelo (i. e. gas metano-agua-arcilla), es más compresible y por lo tanto más débil.

En la Figura III.20 se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el tercer intervalo de carga (24.13 kN/m^2). En la curva FZ15C3 se observa una porción cóncava desarrollada durante la consolidación primaria, esta concavidad indica mayor presión dentro de las burbujas de gas así como el intervalo de tiempo en el que se presenta una transferencia parcial de carga del gas hacia la estructura del suelo, ya que las burbujas de gas siguen soportando parte de la carga inducida, esta deducción es con base a los resultados obtenidos en el cuarto intervalo de carga.

Durante el tercer intervalo de carga se obtuvo una deformación vertical de 7.56, de 11.00 y de 19.54 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Estas

deformaciones equivalen aproximadamente al 45 y al 158 por ciento de mayor deformación para la arcilla con el 7 y 15 por ciento de gas metano, respectivamente, ambos porcentajes con respecto a la arcilla sin gas. Para el caso de la arcilla con el 7 por ciento de gas se obtuvo aproximadamente el 43 por ciento de menor deformación, con respecto a la arcilla con el 15 por ciento de gas. Con respecto al tiempo, se emplearon 8 430 minutos (140.5 horas), 10 020 minutos (167.0 horas) y 12 270 minutos (204.5 horas) para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. El hecho de que se requiera mayor tiempo para consolidar la arcilla con gas indica que el gas se reacomoda por la presión inducida, así como también indica que interactúa con el agua y el suelo para soportar la carga aplicada.

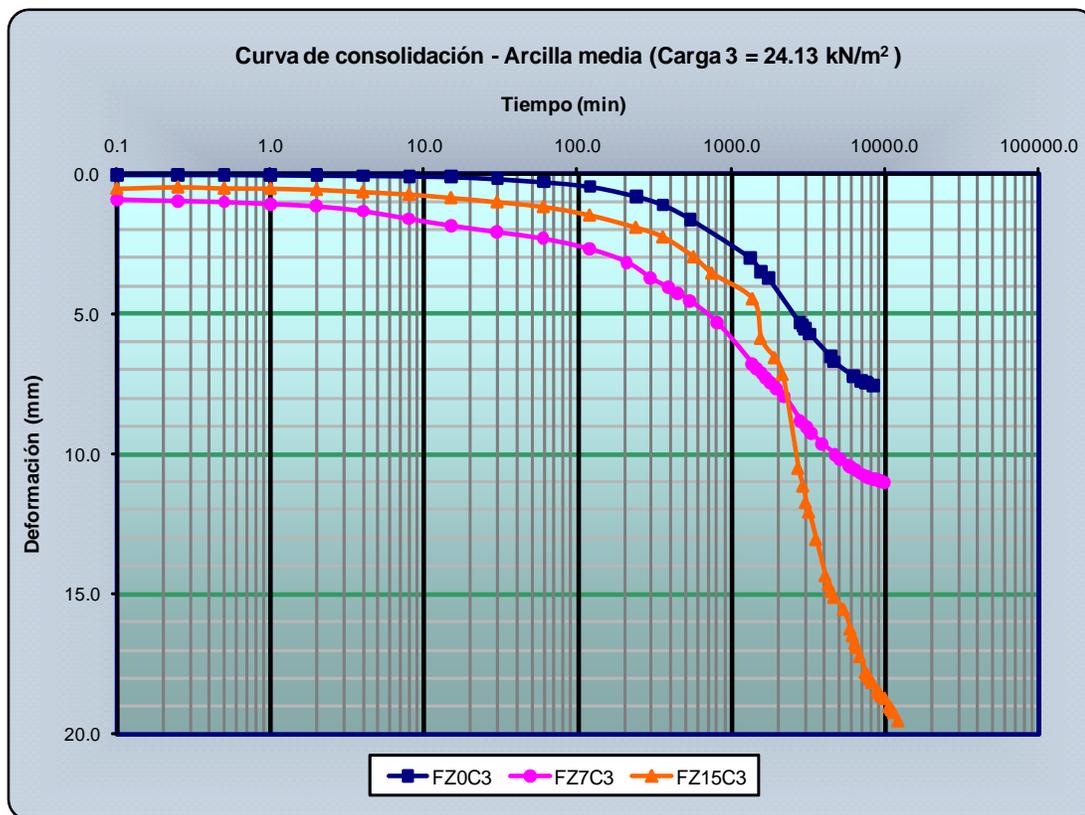


Figura III.20. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el tercer intervalo de carga.

En la Figura III.21 se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el cuarto intervalo de carga (48.27 kN/m²). En la curva FZ15C4 se observa que el inicio de la consolidación primaria describe una curvatura y posteriormente se forma una concavidad, esto es debido a que el gas se reacomoda por la carga aplicada, desarrollándose alta presión dentro de las burbujas de gas, así mismo indica el tiempo en el que se transfiere parcialmente la carga soportada por el gas a la estructura del suelo.

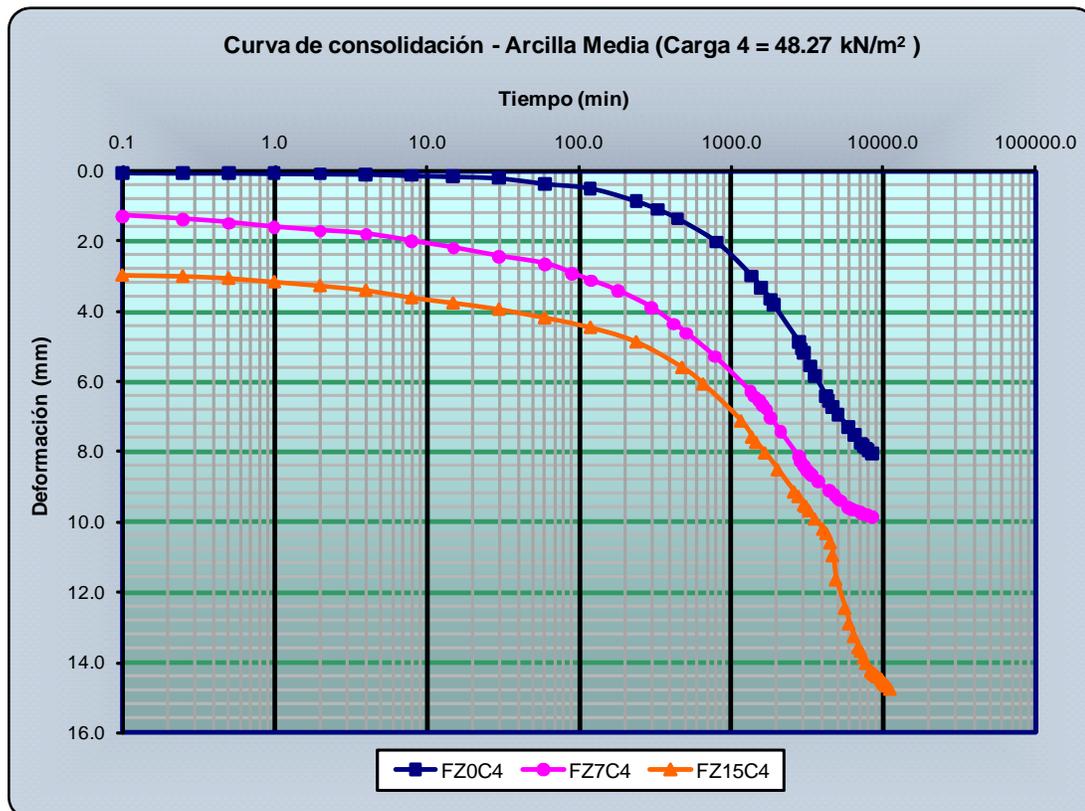


Figura III.21. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el cuarto intervalo de carga.

Durante el cuarto intervalo de carga se obtuvo una deformación de 8.08, de 9.88 y de 14.76 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y el 15 por ciento, respectivamente. Estas deformaciones equivalen aproximadamente al 22 y al 83 por ciento de mayor deformación para la arcilla con el 7 y el 15 por ciento de gas, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto al tiempo, se emplearon 8 580 minutos (143.0 horas), 8 490 minutos (141.5 horas) y 11 190 minutos (186.5 horas) para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. El hecho de requerirse mayor tiempo para consolidar la arcilla con gas metano es debido a que el gas se reacomoda, por la presión inducida, e interactúa con el agua y el suelo para soportar la carga aplicada.

En las Figuras III.22a y III.22b se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano; obtenidas durante el quinto intervalo de carga (96.53 kN/m²). En la curva FZ15C5, Figura III.22a, se observan que durante el ensaye se desarrollaron dos concavidades en la etapa de la consolidación primaria, que inician a los 480 y 1 860 minutos y terminan a los 1 380 y 3 330 minutos para la primera y segunda concavidad,

respectivamente. Estas concavidades se asocian a una transferencia parcial de la carga soportada por el gas hacia el agua y las partículas de arcilla. En la curva FZ7C5, Figuras III.22a y III.22b, se observa que después de la deformación inicial, no se produce más deformación, se induce que este comportamiento es debido a que el gas metano se reacomoda (dentro de los vacíos formados por las láminas de arcilla) e interactúa con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga aplicada.

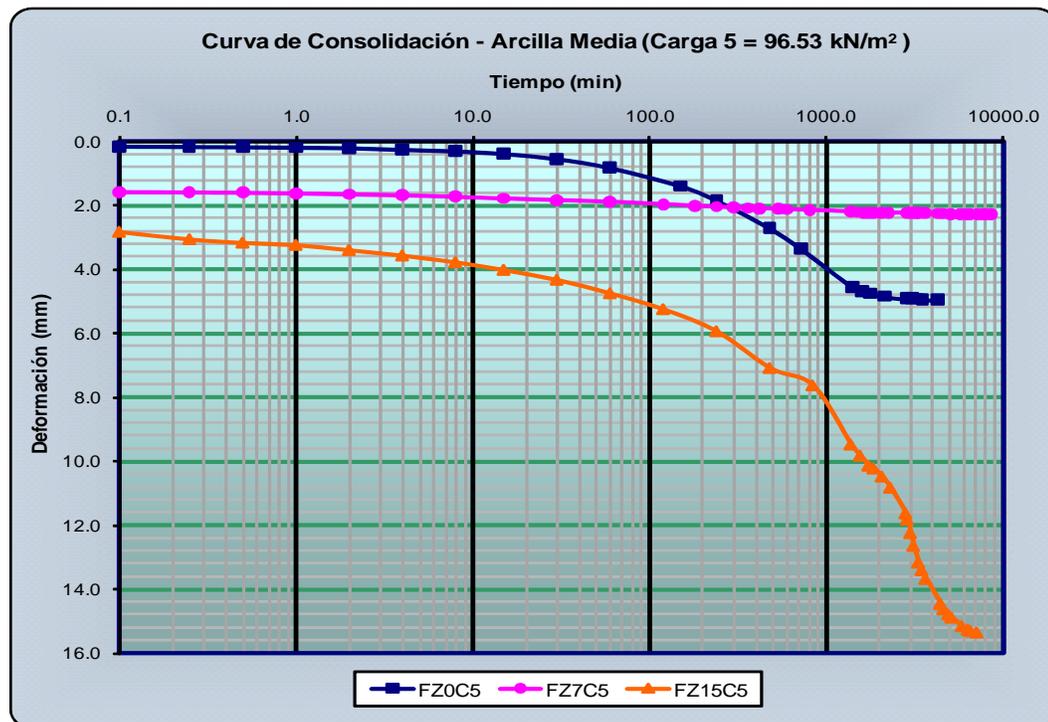


Figura III.22a. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el quinto intervalo de carga.

En las curvas de consolidación de la arcilla sin gas y con el 7 por ciento de gas que se presentan en la Figura III.22b se observa que la deformación inicial es mayor para la muestra con gas, pero la deformación total es mayor para la muestra sin gas, esto se asocia a que la muestra con gas reacciona junto con la arcilla y el agua para soportar la carga.

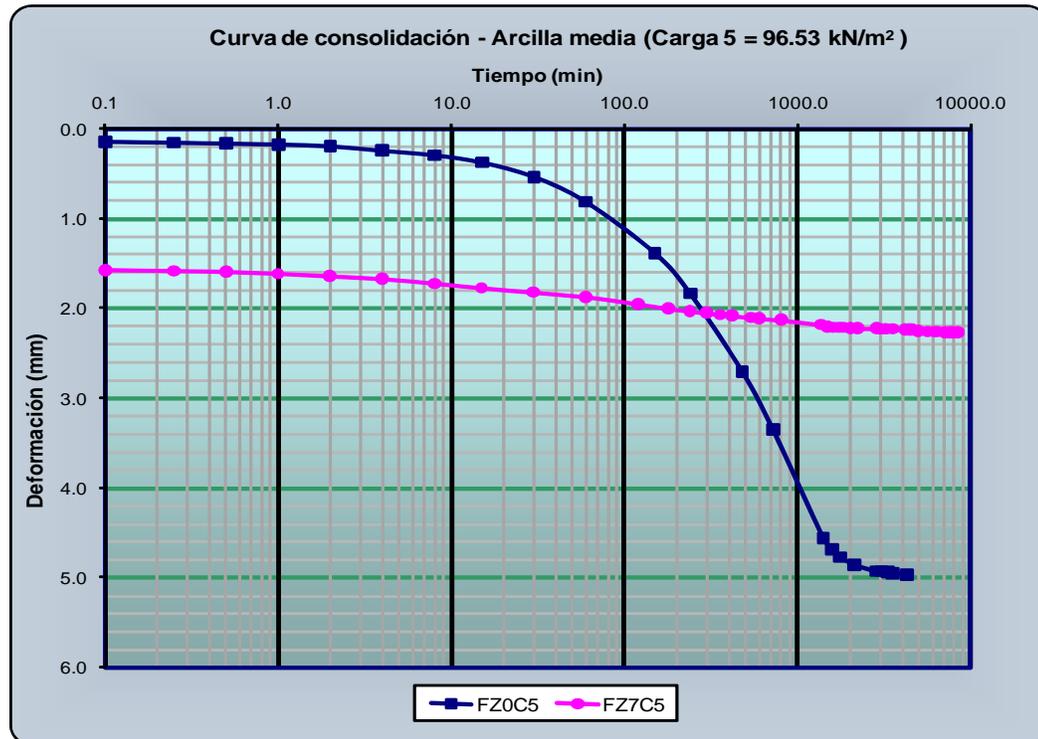


Figura III.22b. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano al 7 por ciento, obtenidas durante el quinto intervalo de carga.

En la Figura III.23a se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el último intervalo de carga (96.53 kN/m^2). En la Figura se observa que la curva de consolidación FZ7C6 es, prácticamente, una línea recta (ver Figura III.23b). Este comportamiento es generado por el confinamiento proporcionado por la arcilla, es decir, que el gas interactúa con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga aplicada. En lo que respecta a la curva FZ15C6 se observa que la carga aplicada no es lo suficientemente alta como para generar zonas de alta presión, indicando que el gas se ha acomodado y es capaz de soportar mayor carga, posiblemente, porque las burbujas de gas han aumentado su rigidez.

Para el último intervalo de carga se obtuvo una deformación vertical de 0.88, de 0.72 y de 14.5 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Estas deformaciones equivalen aproximadamente al 18 por ciento de menor deformación para la arcilla con el 7 por ciento de gas y de 1 548 por ciento de mayor deformación para la arcilla con el 15 por ciento de gas, ambos porcentajes con respecto a la arcilla sin gas, estas deformaciones indican que la arcilla con mayor contenido de gas todavía es más compresible y, por lo tanto, más débil.

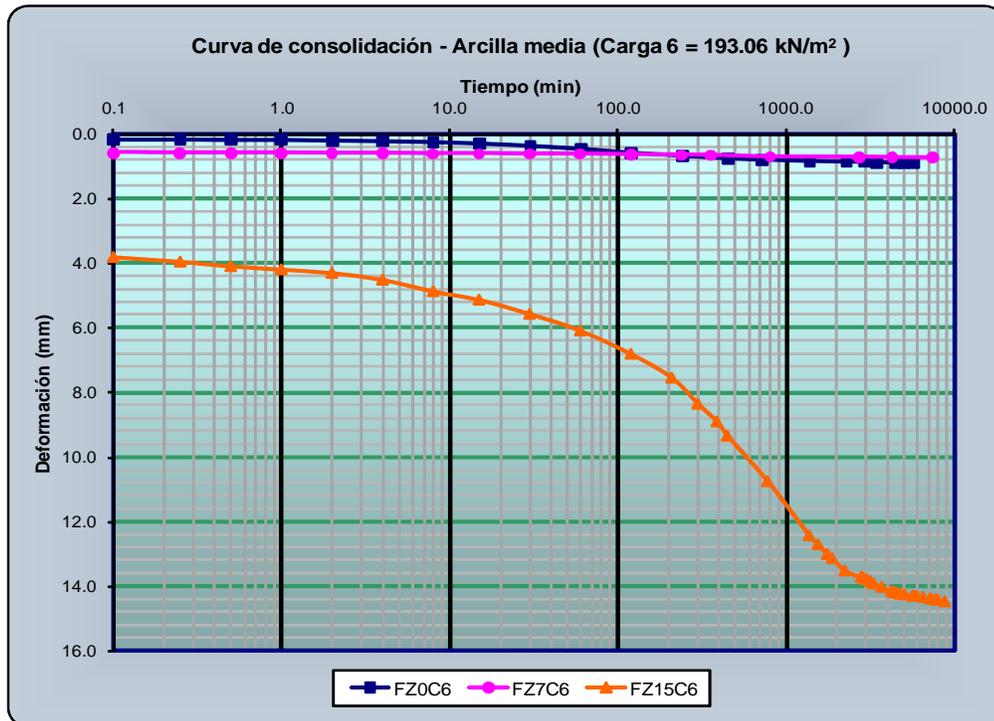


Figura III.23a. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante el sexto intervalo de carga.

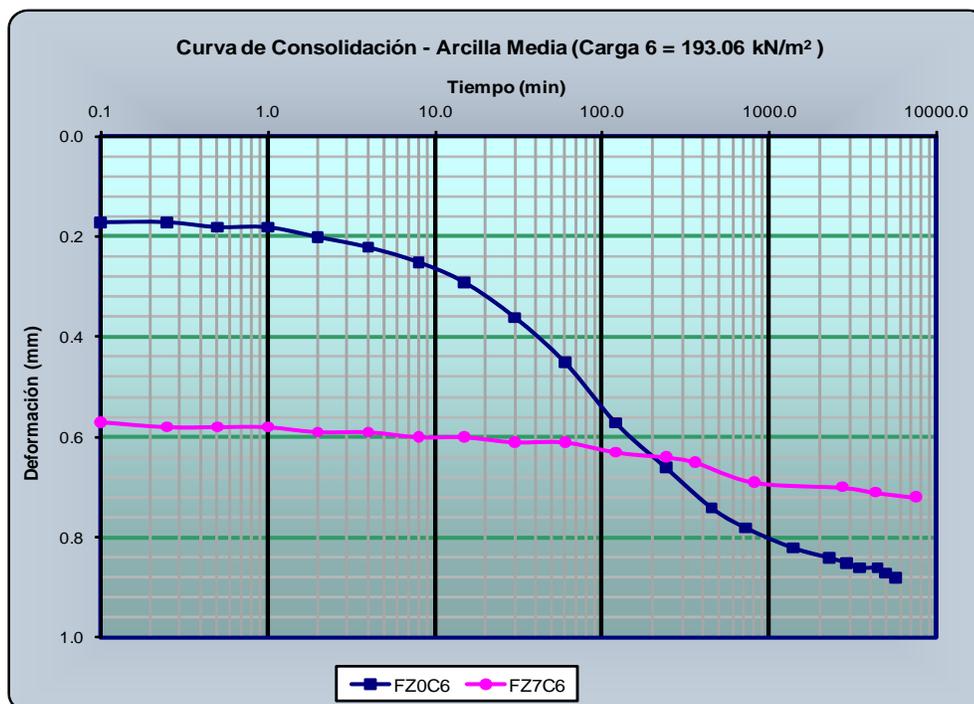


Figura III.23b. Curvas de consolidación de la arcilla marina media sin y con el 7 por ciento de gas metano, obtenidas durante el último intervalo de carga.



En lo que respecta al tiempo, se emplearon 5 700 minutos (95.0 horas), 7 530 minutos (125.5 horas) y 8 850 minutos (147.5 horas) correspondientes a la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. El hecho de que se requiera mayor tiempo para consolidar la arcilla con gas indica que este interactúa con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga aplicada, por lo que, se opone una reacción en sentido contrario a la dirección de la carga aplicada.

III.3.3.1. Curvas de descarga de la arcilla media sin gas y con gas metano

En la Figura III.24 se presentan las curvas de descarga de la arcilla marina media sin y con gas y se observa que la arcilla con gas metano presenta menor expansión inicial, pero mayor expansión final a medida que se descarga el suelo.

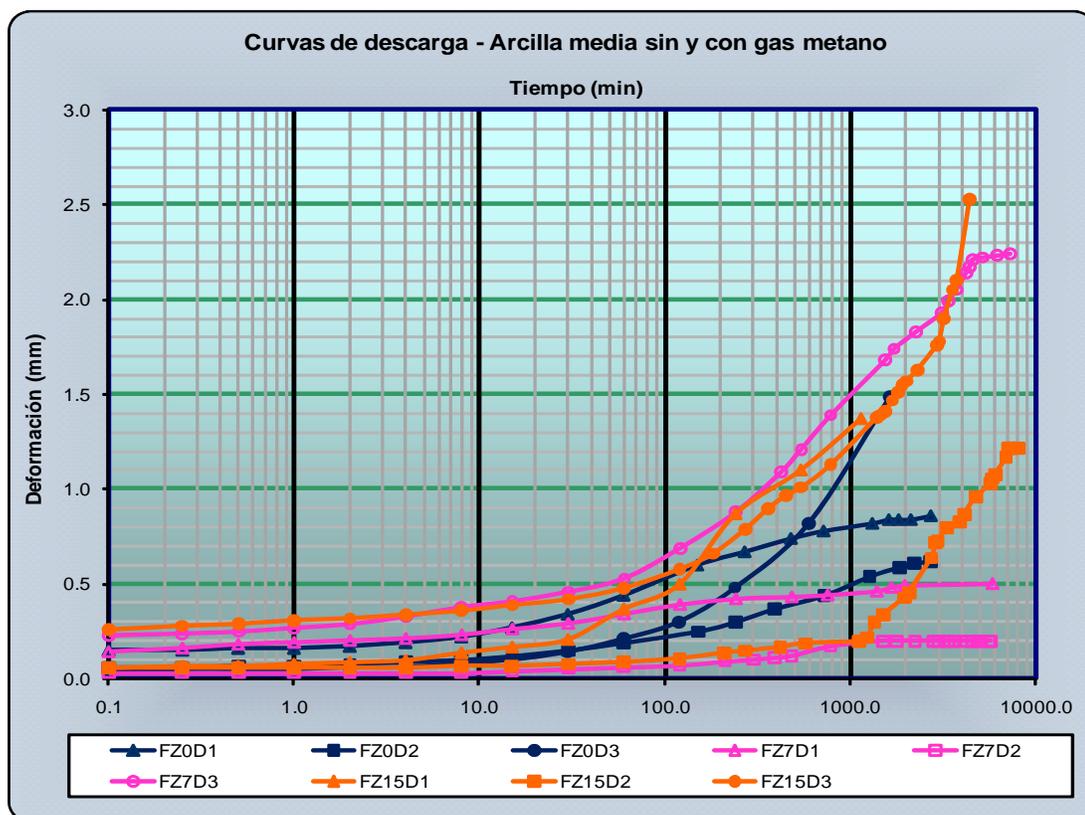


Figura III.24. Curvas de descarga de la arcilla marina media sin y con gas metano.

De los resultados obtenidos de la etapa de descarga, se deduce que la expansión en los suelos con gas es mayor cuando se ha quitado el pistón de carga a la muestra, permitiendo la libre expansión, es decir, que la expansión está limitada por cuanto se levanta el pistón durante el

intervalo de descarga y este fenómeno es más notorio a mayor cantidad de gas. En este caso, se observa que la expansión inicial aumenta con cada etapa de descarga, esto es debido a que el gas tiene mayor confinamiento y, por lo tanto, presenta mayor expansión a medida que se descarga la muestra.

III.3.3.2. Curva de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas.

En la Figura III.25 se presentan las curvas de compresibilidad de la arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que, en la arcilla con menor contenido de gas los dos últimos intervalos de generan menor deformación que la arcilla sin gas, mientras que en la arcilla con mayor contenido de gas los cuatro últimos intervalos de carga presentan mayores valores de deformación que los de la arcilla sin gas. En lo que respecta a etapa de descarga, se observa que los menores valores de expansión corresponden a la arcilla con menor contenido de gas metano, mientras que los correspondientes a la arcilla con el mayor contenido de gas solo el último intervalo de descarga es menor, mientras que los dos iniciales son los que presentan mayor expansión.

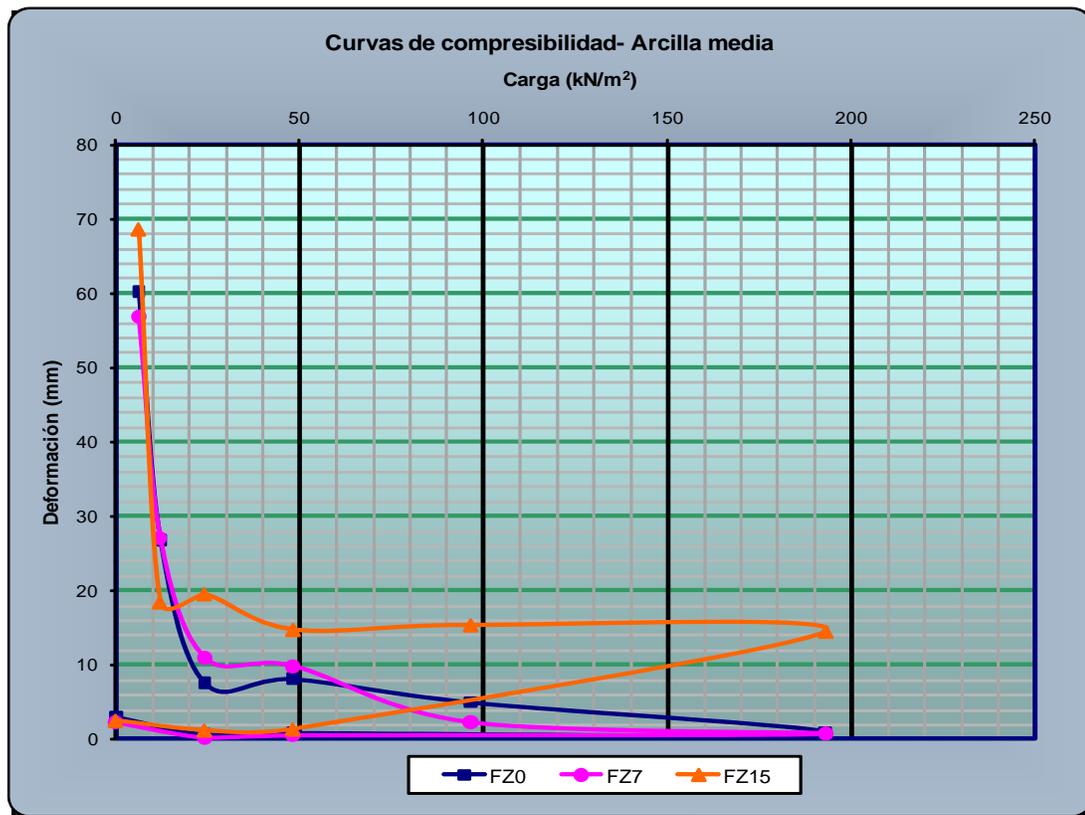


Figura III.25. Curvas de compresibilidad de la arcilla media sin y con gas metano.



CAPÍTULO IV

ENSAYES DE LABORATORIO



En diversos estudios realizados costa fuera alrededor del mundo se ha registrado la presencia de gas en los sedimentos marinos, de los cuales solo algunos han sido dados a conocer y en los que se han medido las propiedades mecánicas de los suelos, se ha encontrado que las propiedades cambian debido a la presencia del gas (Whelan, et al., 1975 y 1977; Esrig y Kirby, 1977; Coleman et al., 1978; Nelson, et al. 1978; y Denk et al., 1981), así mismo, en investigaciones realizadas en arenas y limos arcillosos se ha encontrado que la presencia del gas influye en las características mecánicas de los suelos (Nageswaran, 1983; Wheeler, 1986; Thomas, 1987; Rad, et al., 1994).

Siguiendo la pauta de las investigaciones mencionadas, en este estudio se efectuaron ensayos de laboratorio para conocer la posible variación de las propiedades mecánicas de la arcilla marina del Golfo de México, generada por la presencia de gas metano. La variación se obtiene al comparar los resultados de los ensayos realizados en la arcilla marina sin gas con los resultados obtenidos de las pruebas en la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento.

Los ensayos de laboratorio tuvieron como objetivo conocer tanto las características de compresibilidad como de resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas metano, para tal efecto, se realizaron los siguientes ensayos:

- a. Pruebas de consolidación a deformación constante,
- b. Pruebas de veleta miniatura,
- c. Pruebas triaxiales no drenadas no consolidadas, con medición de presión de poro, y
- d. Pruebas estáticas y rápidas de corte simple directo.

IV.1. Pruebas de consolidación a deformación constante

Para conocer la posible variación de las características de compresibilidad y de la presión de preconsolidación de la arcilla sin y con gas metano, se efectuaron ensayos de consolidación a deformación constante (CRS, por sus siglas en inglés); este ensaye permite definir mejor la curva de compresibilidad y se caracteriza por generar una deformación constante en la muestra de arcilla, aplicando carga continuamente, hasta obtener la deformación requerida.

Los ensayos de CRS realizados en este estudio siguieron las recomendaciones indicadas en la norma ASTM D4186-06 y se desarrollaron en dos etapas continuas. En la primera etapa la arcilla marina sin y con gas metano se deformó hasta el 15 por ciento y se descargó por



aproximadamente un ciclo logarítmico de carga. En la segunda etapa, la muestra se volvió a cargar para deformarla hasta el 25 por ciento, concluyendo el ensaye con la descarga del espécimen. Este procedimiento se siguió tanto para la arcilla blanda como para la arcilla media.

En términos generales, el desarrollo de la prueba consiste en saturar la muestra y someterla a carga, generando una deformación constante en el espécimen ensayado durante el tiempo que dura la prueba, terminando el ensaye con la descarga de la muestra. Durante la etapa de saturación de la muestra, existe la posibilidad de que se haya escapado una mínima cantidad de gas, pero que no repercute significativamente debido a que el gas permanece confinado por las láminas de arcilla, según se deduce de los resultados obtenidos de las pruebas de consolidación para reconstituir las muestras (Capítulo III y Apéndice A). Por otra parte, debido a que existe un equilibrio en los esfuerzos entre el gas, el agua y el suelo, se asume un suelo parcialmente saturado y en equilibrio, ya que durante la etapa de carga los esfuerzos inducidos son soportados, principalmente, por las partículas sólidas del suelo a través de los contactos entre las láminas de arcilla y parcialmente por el agua de poro y el gas metano (Capítulo III y Apéndice A).

Los resultados obtenidos de las pruebas de consolidación a deformación constante son principalmente la «presión de preconsolidación, (P_o), los índices de compresión y la velocidad de consolidación» (Crowford, 1986), del ensaye también se obtiene el coeficiente de consolidación (C_v), la conductividad hidráulica o permeabilidad (k) y la relación de vacíos (e), entre otros resultados. Adicionalmente durante el ensaye se mide la presión de poro, pero debido a la diferencia en la velocidad de deformación empleada en las diferentes pruebas, esta solo se compara con fines ilustrativos.

En las siguientes secciones se comentan y presentan grupalmente los resultados obtenidos de los ensayes realizados a la arcilla blanda y media sin y con gas metano; los detalles y consideraciones del ensaye, así como los resultados individuales de cada una de las pruebas se presentan en el Apéndice B.

IV.1.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano

En la Figura IV.1a se presentan las curvas de compresibilidad correspondientes a la arcilla marina blanda sin y con gas metano, obtenidos durante la primera etapa de la prueba (15 por ciento de deformación), con su respectivo tramo de descarga, en la Figura IV.1a se grafica el esfuerzo vertical efectivo versus el porcentaje de la deformación, mientras que en la Figura IV.1b

se presentan las curvas de compresibilidad obtenidas con el método de Becker (Becker et al., 1987), en escala aritmética.

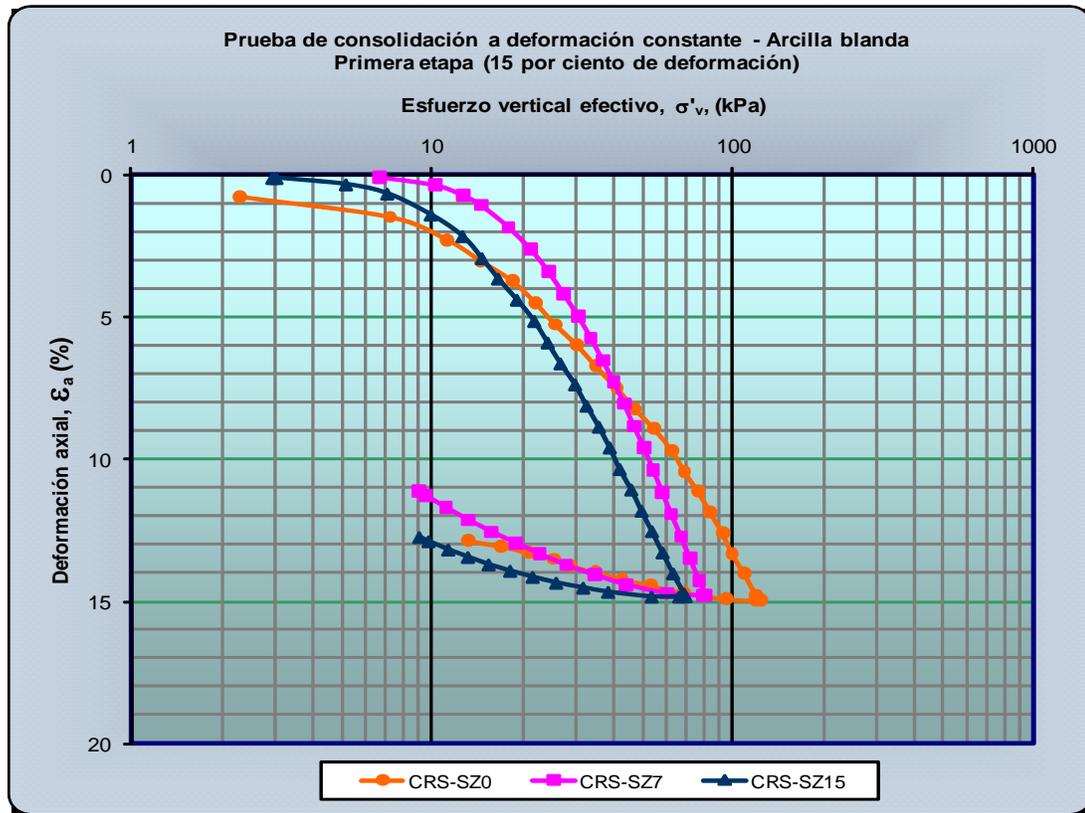


Figura IV.1a. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

En las Figuras IV.1a y IV.1b se observa que a medida que se incrementa el contenido de gas metano en la arcilla, se requiere menor esfuerzo vertical efectivo, σ'_{v} , para obtener el 15 por ciento de deformación, como es de esperarse para una arcilla conteniendo gas metano. También se observa (Figura IV.1a) que la parte final del tramo virgen de la curva de la arcilla con gas al 15 por ciento se acerca al tramo virgen de la curva de la arcilla con gas al 7 por ciento, este comportamiento se manifiesta mejor en la Figura IV.1b y se observa que el tramo final del tramo virgen de la curva CRS-SZ15 se sobrepone en el tramo virgen de la curva CRS-SZ7, con tendencia a desplazarse hacia la derecha de esta última.

El esfuerzo vertical efectivo aplicado durante la primera etapa del ensaye fue de 124 (mejor estimado), 81 y 69 kPa para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. La diferencia obtenida equivale al 35 y 44 por ciento de menor esfuerzo vertical efectivo para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. En



cuando a la diferencia obtenida entre la arcilla con gas, se obtuvo un menor esfuerzo vertical efectivo que equivale aproximadamente al 15 por ciento en la arcilla con gas al 15 por ciento. El hecho de que el esfuerzo vertical empleado en la primera etapa del ensaye para la arcilla con gas al 15 por ciento no sea el doble o mayor que el requerido para la arcilla con gas al 7 por ciento, indica que el gas opone resistencia ante la carga aplicada, es decir, las fuerzas intermoleculares de las láminas de arcilla mantienen encapsuladas a las burbujas de gas metano y, en consecuencia, estas interactúan con la arcilla y el agua de poro para soportar la carga aplicada, generando una fuerza en sentido contrario a la dirección de la carga. Este comportamiento, posiblemente, es debido a que las burbujas de gas aumentan su rigidez durante el desarrollo del ensaye, hasta que se sobrepasan los esfuerzos soportados por el gas o hasta que se sobrepasan los esfuerzos proporcionados por el confinamiento generado por la arcilla.

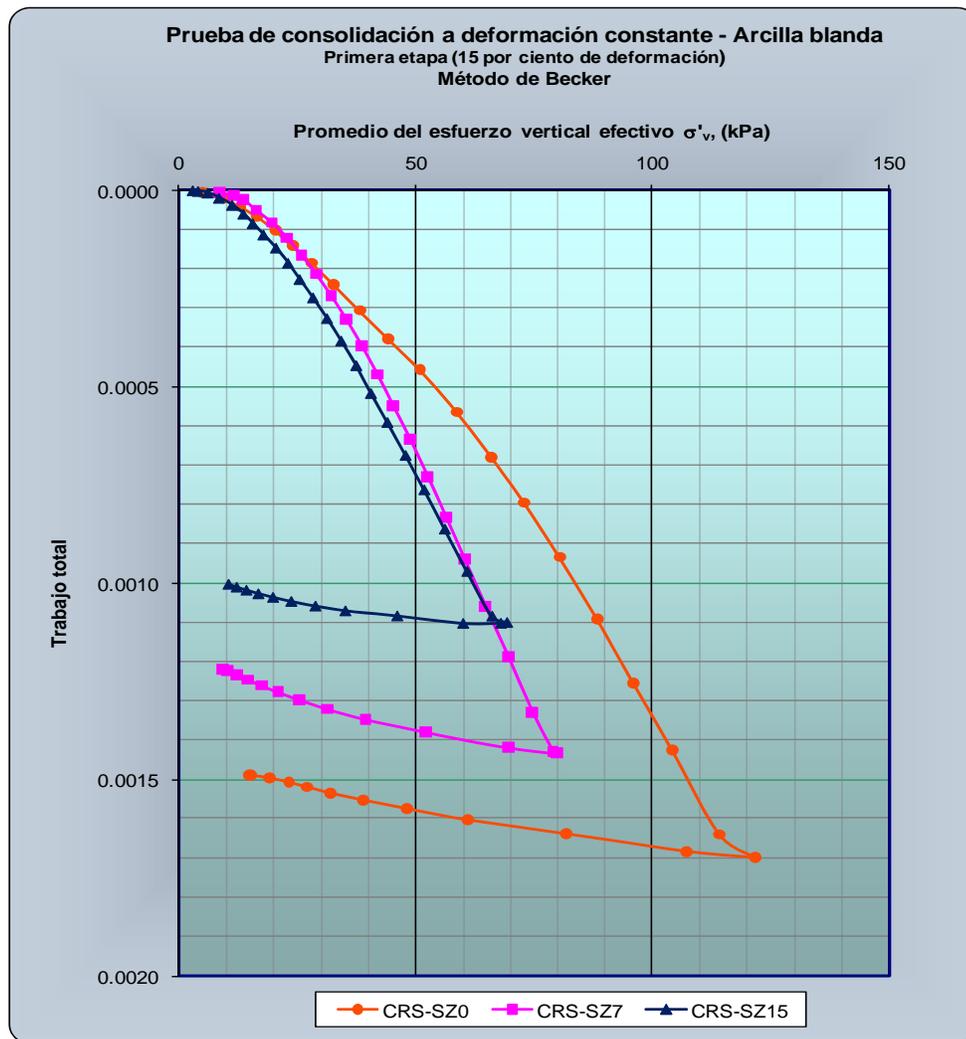


Figura IV.1b. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.



De la Figura IV.1b se deduce que la deformación obtenida en la arcilla con gas corresponde principalmente a la reducción del volumen de gas y en menor parte a la expulsión del agua de poro, representando este comportamiento por el menor trabajo realizado para obtener el 15 por ciento de la deformación en la arcilla con gas metano, a mayor contenido de este, asimismo, indica que la carga no es lo suficientemente alta como para generar cambios importantes en la estructura de la arcilla gaseosa al término de la primera etapa del ensaye.

En cuanto a la etapa de descarga, se observa (Figuras IV.1a y IV.1b) que la expansión obtenida fue de aproximadamente 2.0, 4.0 y 2.0 por ciento para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. La baja expansión de la arcilla con gas al 15 por ciento indica que el gas no fue sobre presionado por la carga aplicada, debido a que el 15 por ciento de la deformación ocurre muy rápido, es decir, la carga no fue lo suficientemente alta para generar altas presiones en las burbujas de gas y obtenerse mayor expansión en la arcilla con mayor contenido de gas, lo que revela que el gas solo fue reacomodado (Wheeler, 1986) dentro de la estructura de la arcilla, al menos durante la primera etapa de la prueba.

El efecto del gas sobre presionado se observa mejor en la arcilla con gas al 7 por ciento, en ella la expansión es debida principalmente a la expansión del gas, este comportamiento indica que la expansión de la arcilla con gas es mayor siempre que la carga aplicada sobrepresione las burbujas de gas y que las láminas de arcilla sean capaces de mantener al gas confinado.

La duración de la etapa de descarga fue de 995, 476 y 192 minutos para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente, que equivalen aproximadamente al 52 y 81 por ciento de menor duración para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia obtenida en la arcilla con gas es de aproximadamente 59 por ciento de menor tiempo, para la arcilla con gas metano al 15 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

La deformación y expansión obtenidas durante la primera etapa del ensaye, no pueden ser comparadas totalmente debido a que la velocidad de deformación empleada es diferente para cada uno de los ensayes y, por lo tanto, los intervalos de tiempo obtenidos en cada una de las pruebas de CRS en las muestras de arcilla sin y con gas metano son diferentes, mas sin embargo, durante la comparación de resultados se consideran representativas de las condiciones naturales de los suelos arcillosos marinos sin y con gas metano.

La presión de preconsolidación y algunos resultados obtenidos de las pruebas de CRS correspondientes a la arcilla sin y con gas metano se presentan en la Tabla IV.1.



Tabla IV.1. Presión de preconsolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

Parámetro	Muestra CRS-SZ0	Muestra CRS-SZ7	Muestra CRS-SZ15
Método de Casagrande 1936			
Presión de preconsolidación interpretada (σ'_p), kPa	45.5	26.8	17.7
Deformación axial (ε_a) en porcentaje, a σ'_p	8.04	4.04	4.00
Relación de compresión (CC)	0.194	0.243	0.201
Relación de recompresión (RR).	0.025	0.041	0.026
Relación de expansión (SR)	0.029	0.035	0.020
Duración de la Prueba (min)	2 946	956	836
Método de trabajo por unidad de volumen, Becker et al., 1987			
Presión de preconsolidación interpretada (σ'_p), kPa	41.7	33.0	21.1

Comparando la presión de preconsolidación estimada con el método de Casagrande se obtiene una diferencia de aproximadamente 41 y 61 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. En cambio, con el método de Becker la presión de preconsolidación estimada es menor en aproximadamente 21 y 49 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En lo que respecta a la arcilla con gas al 15 por ciento se obtuvo una diferencia aproximada del 34 y 36 por ciento empleando el método de Casagrande y de Becker, respectivamente, con respecto a la arcilla con menor contenido de gas.

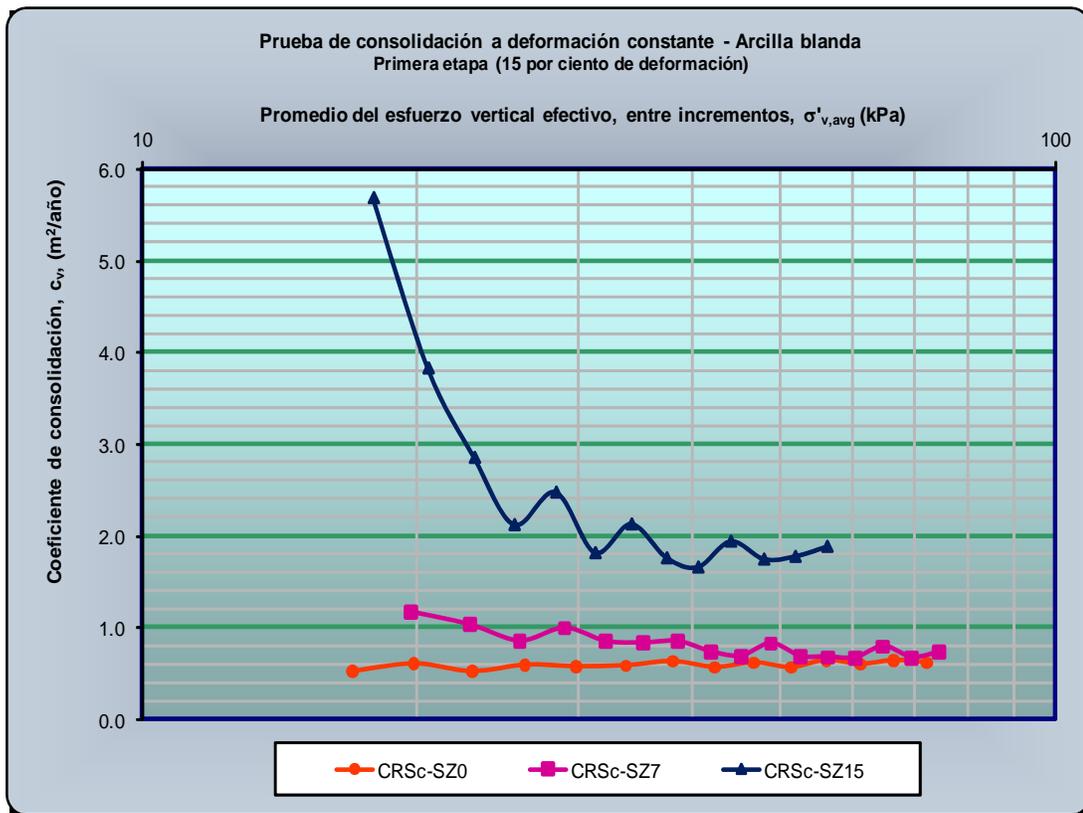
Los cambios obtenidos en la presión de preconsolidación indican que el gas metano soporta parte de la carga inducida, pero, probablemente, la influencia del gas se reflejaría mejor en una prueba de consolidación unidimensional por incrementos, por lo que, una combinación de estas pruebas con las de consolidación a deformación constante proporcionarían una mejor evaluación de la variación de la presión de preconsolidación en cierto intervalo de esfuerzos, por lo tanto, una combinación de ambos ensayos proveerán mejores resultados para evaluar las propiedades esfuerzo deformación de la arcilla con gas metano.

Otro indicio de que el gas metano soporta parte de la carga inducida es que la presión de preconsolidación estimada para la arcilla con gas metano es, prácticamente, al mismo porcentaje de deformación, esto es, el 50 por ciento con respecto a la arcilla sin gas, indicando también que la mayor parte de la deformación es debida principalmente a la reducción del volumen del gas.



En la Tabla IV.1 se observa que el tiempo empleado para obtener una deformación vertical del 15 por ciento disminuye conforme aumenta la cantidad de gas metano, pero no de manera proporcional a la misma. El tiempo empleado es menor en aproximadamente 68 y 72 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas se observa que se empleó menor tiempo en la arcilla con mayor contenido de gas y equivale aproximadamente al 13 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento. El hecho de que la diferencia en el tiempo sea relativamente pequeña indica que el gas opone resistencia ante la carga.

En la Figura IV.2 se presenta el coeficiente de consolidación, c_v , obtenido para la arcilla sin y con gas metano obtenido durante la primera etapa del ensaye de CRS.



Nota: La letra c minúscula al final de la palabra CRS indica etapa de carga.

Figura IV.2. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

En la Figura IV.2 se observa que al inicio de la prueba el valor del c_v es mayor conforme aumenta la cantidad de gas metano en el suelo, es decir, la velocidad inicial de compresión se reduce a medida que disminuye la cantidad de gas en la arcilla, como es de esperarse para este



tipo de suelos. También se observa que el coeficiente de consolidación de la arcilla sin y con gas al 7 por ciento es muy similar o prácticamente igual al final de la primera etapa de la prueba, esto indica que el gas opone resistencia ante la carga inducida y, hasta cierto punto, se obtienen las mismas características de compresibilidad, es decir, que una vez que la nueva estructura de la arcilla con gas se equilibra (mientras las láminas de arcilla mantienen confinado al gas), el coeficiente de consolidación prácticamente se uniformiza, al menos en lo que respecta al 7 por ciento de deformación de la muestra. De este comportamiento se deduce que cuando la arcilla contiene el 7 por ciento de gas metano el valor de c_v no se altera significativamente, mientras que cuando contiene el 15 por ciento de gas, entonces se genera una variación en el coeficiente de consolidación (c_v .)

En las curvas CRSc-SZ7 y CRSc-SZ15 (Figura IV.2) se observa que el coeficiente de consolidación varía poco después de iniciarse el ensaye, formando secciones cóncavas, que son mayores para la arcilla con mayor contenido de gas, este comportamiento indica que el gas se reacomoda dentro de la estructura del suelo e interactúa con el agua de poro y las partículas de arcilla, generando resistencia ante la carga aplicada, pero dado que esta aumenta para obtenerse cierta velocidad de deformación, el gas no logra reacomodarse y equilibrarse, generándose varias zonas de alta presión durante el ensaye.

En la Figura IV.3 se presenta la permeabilidad obtenida durante la primera etapa del ensaye de CRS de la arcilla sin y con gas metano durante la primera etapa del ensaye y se observa que la permeabilidad de la arcilla con gas metano al 7 por ciento es menor al final de la primera etapa que al inicio del ensaye de la arcilla sin gas metano, pero con mayor relación de vacíos al 50 por ciento de la consolidación en la primera. En lo que respecta a la arcilla con gas metano al 15 por ciento, la permeabilidad es mayor que en la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, como es de esperarse para un suelo con mayor contenido de gas, pero con similar relación de vacíos al 50 por ciento de la consolidación que en la arcilla con gas al 7 por ciento.

En la Figura IV.3 también se observa que se genera la misma permeabilidad en la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento, en el rango aproximado de 0.01 a 0.015 m/año, pero con mayor relación de vacíos al 50 por ciento de la consolidación en la arcilla con gas al 7 por ciento.

La configuración de las curvas de permeabilidad indica que el flujo del fluido es prácticamente uniforme o lineal en la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento, mientras que en el caso de la arcilla con gas al 15 por ciento la permeabilidad varía solamente al inicio de la curva, indicando que el flujo empieza muy rápidamente, para posteriormente normalizarse.

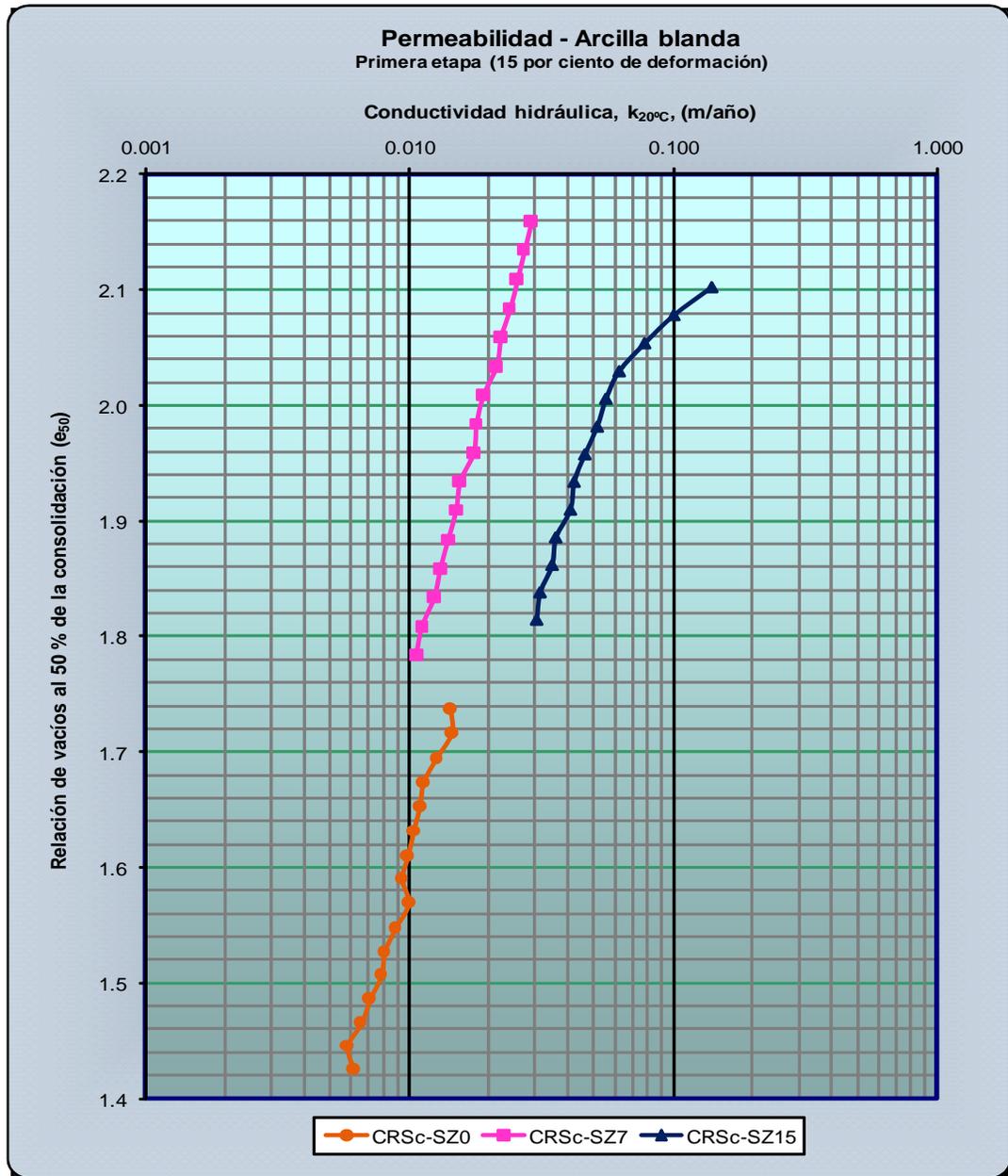


Figura IV.3. Conductividad hidráulica de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

En la Figura IV.4 se presenta la presión de poro desarrollada durante la primera etapa de la prueba de consolidación a deformación constante y se observa que a diferentes velocidades de deformación se desarrolla diferente presión de poro, siendo la mayor la que se desarrolla en la arcilla con gas al 7 por ciento y es debido a que se sobrepresionaron las burbujas de gas, generando alta presión en el fluido de poro. Este comportamiento se genera debido a que *la presión del gas está influenciada por el esfuerzo total principal* (Wheeler et al., 1989) y por el

confinamiento proporcionado por las láminas de arcilla. En el caso de la arcilla con gas metano al 15 por ciento, la presión de poro no se incrementa debido a que se obtiene muy rápido el 15 por ciento de la deformación y porque la carga aplicada no sobrepresionó significativamente las burbujas de gas, durante ese intervalo de tiempo. Las comparaciones realizadas solo son ilustrativas del desarrollo de la presión de poro solo, debido a que los ensayos fueron efectuados a diferentes velocidades de deformación.

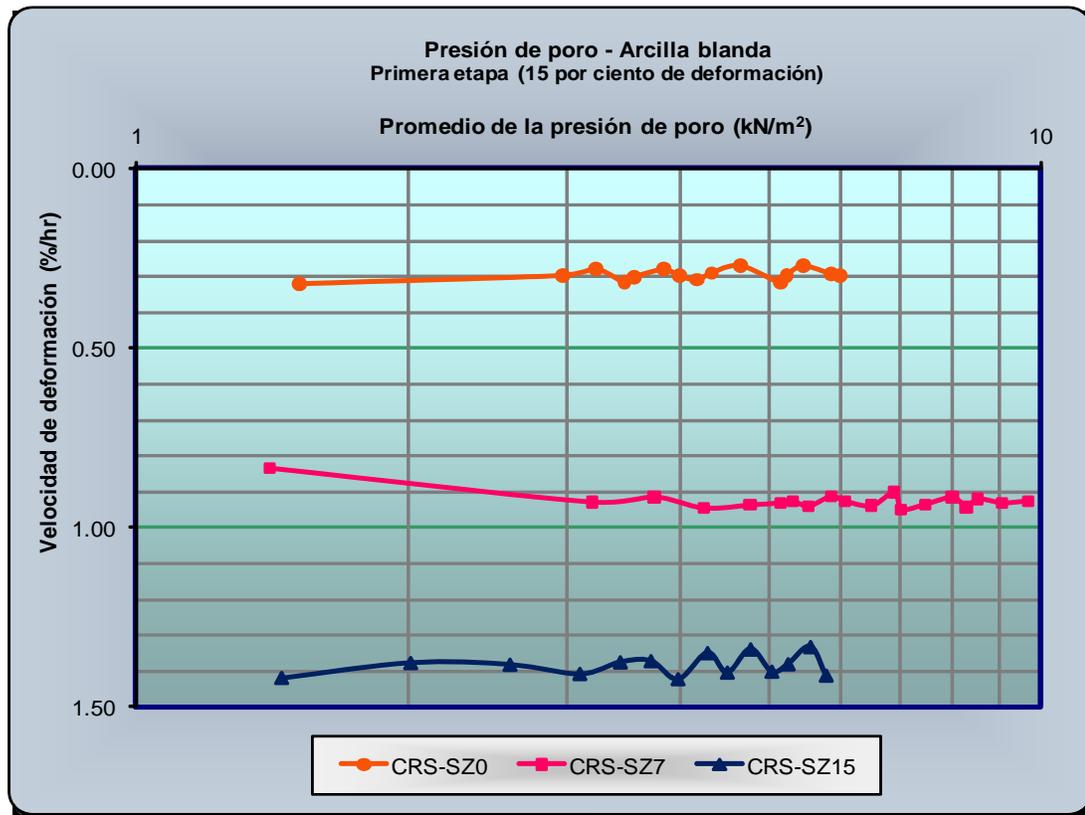


Figura IV.4. Presión de poro de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

En la curva CRSc-SZ15 se observa se presentan ligeras variaciones en la velocidad de deformación (principalmente disminuciones), formándose zonas cóncavas que indican el desarrollo de zonas de alta presión, estas se forman desde el inicio del ensaye, indicando que el fluido de poro opone resistencia ante la carga aplicada, pero debido a que la carga se incrementa, para obtenerse determinada deformación en el suelo, entonces el gas no se estabiliza dentro de la estructura de la arcilla.

Los resultados de la presión de poro indican que la presión del gas influye en el estado de esfuerzos de una arcilla parcialmente saturada con gas metano y, aparentemente, los resultados

muestran que la presión está relacionada con la tensión superficial (Schuurman, 1966) y con *los límites de expansión y compresión de las concavidades de las burbujas de gas* (Wheeler et al., 1989), pero también se relaciona con el confinamiento proporcionado por las láminas de arcilla que, a su vez, tiene relación con las fuerzas intermoleculares, con la capa de agua adsorbida, que es muy rígida y se comporta como el hielo (Low, 1961; Badillo, 1992) y con la interface agua-gas (Fredlund, 1977 y 1979), que se comporta como una membrana elástica y que está relacionada con la tensión superficial. El conjunto de estos tres componentes generan que el gas permanezca confinado y que la muestra de arcilla con gas disminuya su velocidad de deformación, asumiendo que, el gas es capaz de soportar carga, formándose capas o una capa muy rígida de gas a través del tiempo, dentro de la arcilla.

En la Figura IV.5a se presentan las curvas de compresibilidad correspondientes a la segunda etapa (15 a 25 por ciento de deformación) de la prueba CRS de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

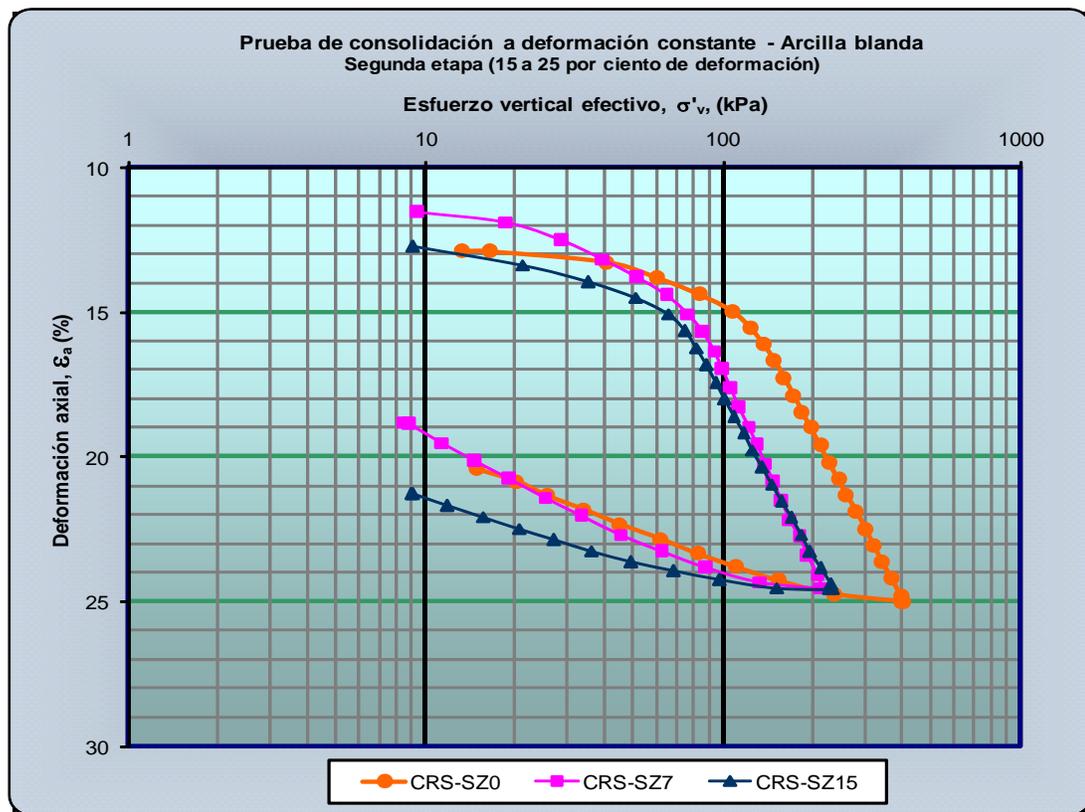


Figura IV.5a. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

En la Figura IV.5a se observa que la curva de la arcilla con gas al 15 por ciento se une con la curva de la arcilla con gas al 7 por ciento aproximadamente al 21 por ciento de la deformación,



para posteriormente sobrepasarla ligeramente. El hecho de que se requiera mayor esfuerzo vertical efectivo, σ'_v , para obtener el 25 por ciento de la deformación vertical en la arcilla con gas al 15 por ciento que para el de la arcilla con gas al 7 por ciento, indica que las burbujas de gas aumentan su rigidez durante el transcurso del ensaye y por lo tanto oponen mayor resistencia. Este comportamiento indica que las fuerzas intermoleculares de las partículas de arcilla y la carga sostenida mantienen encapsuladas a las burbujas de gas y, como consecuencia, estas interactúan junto con la arcilla para soportar la carga inducida (ver Figura IV.5.b).

El esfuerzo vertical efectivo aplicado para obtener el 25 por ciento de deformación fue de 405, 218 y 235 kPa para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 46 y 42 por ciento para la arcilla con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas al 15 por ciento el esfuerzo vertical efectivo es mayor en un 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

En la Figura IV.5b se presentan las curvas de compresibilidad obtenidas con el método de Becker y se observa que para la arcilla con gas al 15 por ciento se requiere mayor esfuerzo vertical efectivo (~20 kPa) que para la arcilla con gas al 7 por ciento; pero al mismo tiempo, se requiere menor trabajo en la primera para obtener el 25 por ciento de la deformación, debido a la mayor cantidad de gas. Este comportamiento sustenta la tesis de que el gas soporta parte de la carga inducida, al interactuar con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga aplicada; también indica que a mayor cantidad de gas se obtiene mayor resistencia a la compresión, siempre que el gas este confinado por las láminas de arcilla y que no se sobrepasen los esfuerzos soportados por las burbujas de gas.

Los resultados mostrados en la Figura IV.5b indican que la deformación obtenida es debida principalmente al cambio de volumen de las burbujas de gas metano, ya que esta se alcanza muy rápidamente a medida que aumenta la cantidad de gas en el suelo y secundariamente a la expulsión del agua de poro, reflejado esto en el menor trabajo realizado para alcanzar la deformación total de la muestra, comportamiento que posiblemente está influenciado por la expulsión del agua de poro por el gas y ,por lo tanto, existe un cambio en la presión de las burbujas de gas, produciéndose una concentración de esfuerzos en la misma forma que pasa en un agujero en una hoja de metal (Neuber, 1946).

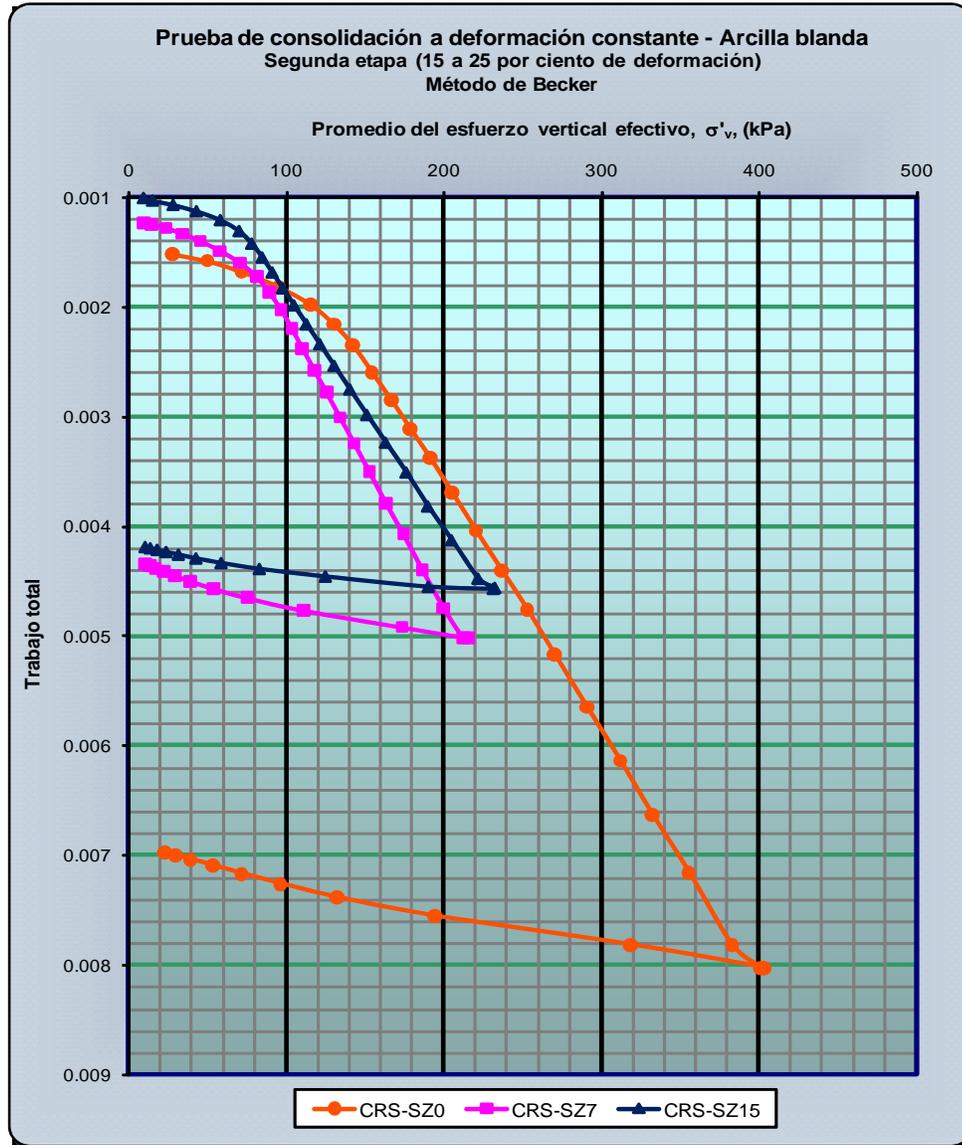


Figura IV.5b. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

Los resultados (Figura IV.5b) también indican que la carga no es lo suficientemente alta como para generar cambios importantes en la estructura del suelo, debido a que se alcanza muy rápidamente el 25 por ciento de deformación vertical, aunado a que la nueva estructura (i.e. burbujas de gas, agua de poro y láminas de arcilla) ejerce una fuerza en sentido contrario a la dirección de la carga aplicada

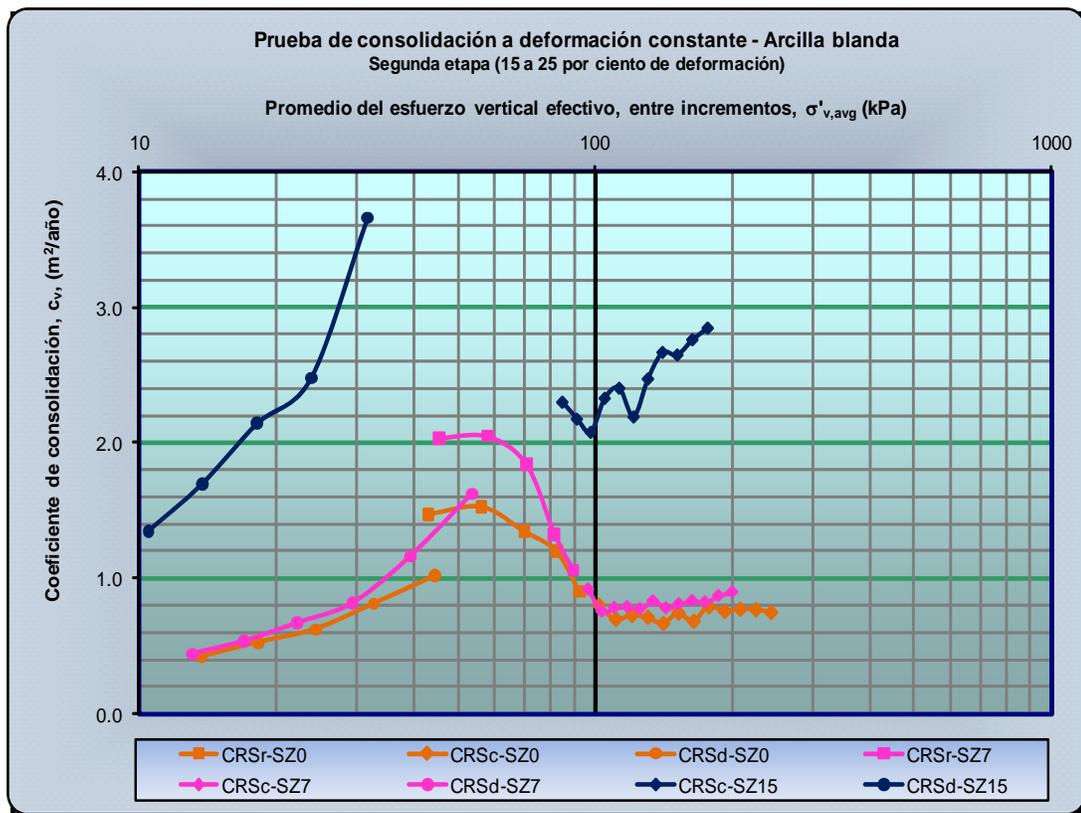
Aunque en la práctica común no se trabaja con deformaciones tan grandes, en el caso de la arcilla con gas metano debería ser reconsiderado este concepto, es decir, probablemente la



construcción de estructuras marinas deberá ser más lenta, permitiendo que el gas se reacomode dentro de la arcilla y estas confinen al gas e interactúen para trabajar con mayores deformaciones verticales.

La duración de la etapa de descarga fue de 2 078, 812 y 344 minutos para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente; en términos de expansión axial la recuperación fue de aproximadamente 5.0, 6.0 y 4.0 por ciento para la arcilla sin y con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente. En estos resultados se observa que la arcilla con gas al 15 por ciento presentó la menor expansión y probablemente se debe a que el esfuerzo vertical no fue lo suficientemente alto para sobrepresionar al gas, esto revela que el gas solo se reacomodado dentro de la arcilla. El efecto del gas sobre presionado se observa mejor en la arcilla con gas al 7 por ciento, es decir, que parte de la expansión corresponde al gas metano.

En la Figura IV.6 se presenta el coeficiente de consolidación, c_v , correspondiente a la arcilla sin y con gas metano, obtenido durante la segunda etapa de la prueba de CRS.



Nota: Las letras r, c y d minúsculas al final de la palabra CRS indican etapa de recarga, carga y descarga, respectivamente.

Figura IV.6. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.



En la Figura IV.6 se observa que el coeficiente de consolidación decrece para la arcilla sin gas y con gas al 7 por ciento a medida que se desarrolla la prueba, siendo mayor durante la etapa de recarga y se uniformiza en ambas arcillas durante el periodo de carga, en esta etapa el coeficiente de consolidación es similar para ambas arcillas. En lo que respecta a la arcilla con gas al 15 por ciento, el coeficiente de consolidación aumenta conforme se desarrolla el ensaye, indicando que la velocidad de compresión es mayor, como es de esperarse para un suelo gaseoso. Durante el desarrollo de la prueba se presentan ligeros incrementos y disminuciones en el valor del coeficiente de consolidación, lo que indica que el gas se reacomoda dentro de la estructura del suelo, pero dado la carga se aplica muy rápidamente, entonces el gas no logra reacomodarse ni equilibrarse dentro de la estructura de la arcilla.

En la Figura IV.7 se presenta la permeabilidad de la arcilla blanda sin y con gas metano, obtenida durante la segunda etapa de la prueba de CRS.

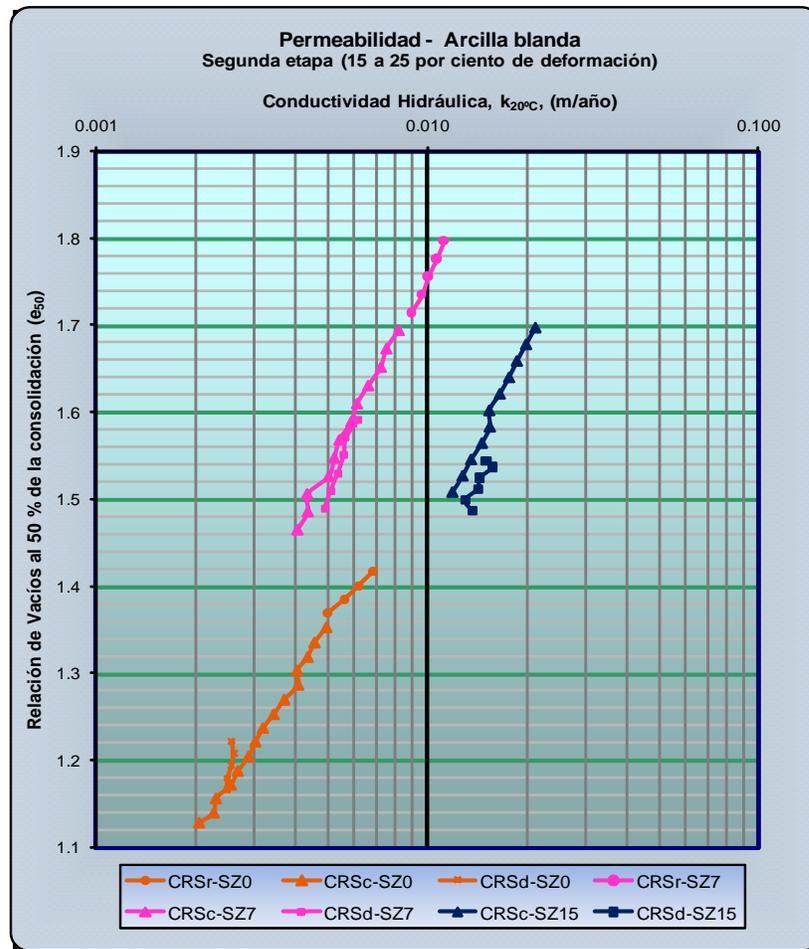


Figura IV.7. Conductividad hidráulica de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.



En la Figura IV.7 se observa que se obtuvo mayor permeabilidad para la arcilla con gas metano al 15 por ciento que para la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, como es de esperarse para un suelo gaseoso, pero con la misma relación de vacíos que la arcilla con gas al 7 por ciento. La configuración de las curvas de permeabilidad indica que el flujo del fluido es, prácticamente, uniforme.

En la Figura IV.8 se muestran los resultados de la presión de poro obtenidos durante la segunda etapa de la prueba de CRS y se observa que la arcilla con gas metano al 7 por ciento desarrolla mayor presión de poro, se considera que la presión de poro adicional se desarrolla por el gas metano. Mientras que la arcilla con gas al 15 por ciento no se desarrolla mayor presión debido a que la carga aplicada no fue lo suficientemente alta como para sobrepresionar las burbujas de gas y a que se alcanza rápidamente el 25 por ciento de deformación vertical.

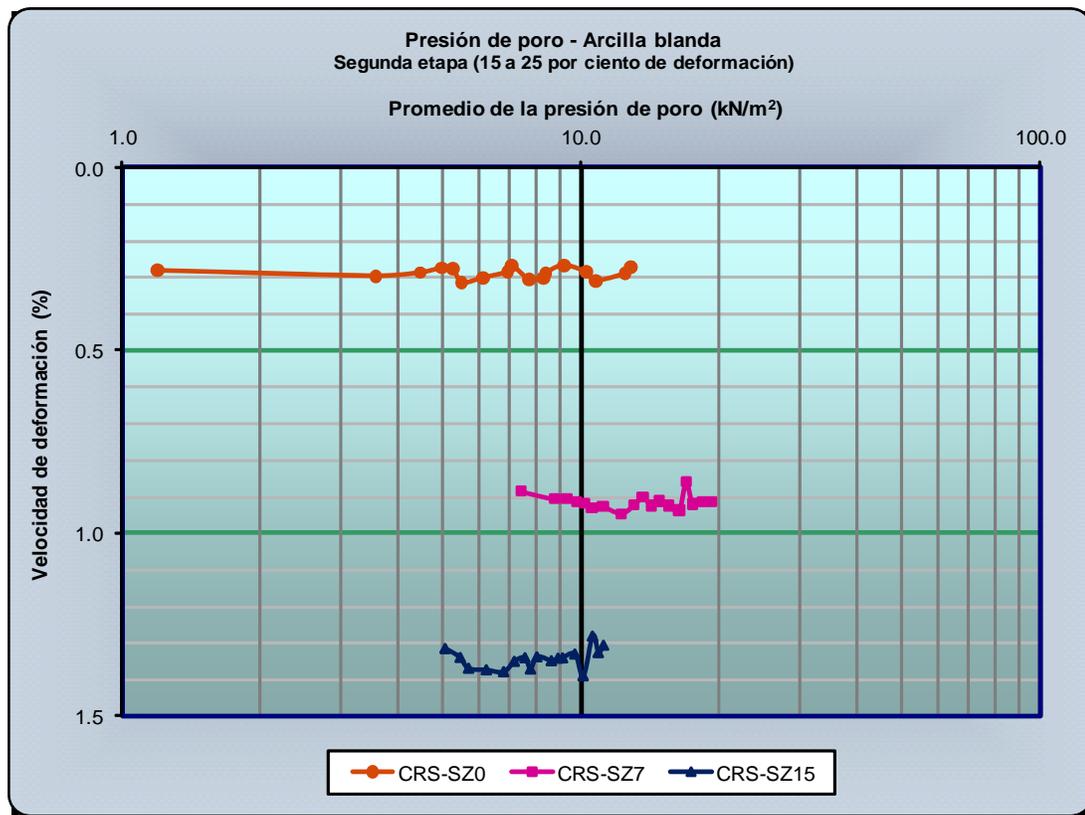


Figura IV.8. Presión de poro de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

En las curvas CRS-SZ7 y CRS-SZ15 (Figura IV.8) se observa como el gas reacciona ante la carga actuante, ya que la velocidad de deformación disminuye ligeramente hasta cierta presión de poro, indicando que se desarrolla una zona de alta presión, esto indica que el gas opone resistencia ante la carga aplicada, pero debido a que ésta se incrementa para obtenerse



determinada deformación en el suelo, entonces, el gas no se estabiliza dentro de la estructura de la arcilla.

En las Figuras IV.9 a IV.13 se presentan los resultados obtenidos de las dos etapas de la prueba de CRS y en la Figura IV. 9 se presentan las curvas de compresibilidad de la arcilla sin y con gas metano y se observa como la curva correspondiente a la arcilla con gas al 15 por ciento reduce notoriamente la diferencia del esfuerzo vertical con respecto a la curva CRS-SZ7, desde aproximadamente el 8 por ciento de deformación hasta ser ligeramente mayor al final de la prueba, este comportamiento indica que el gas reacciona ante la carga aplicada; este comportamiento se aprecia mejor en las curvas de compresibilidad trazadas con el método de Becker, Figura IV.10.

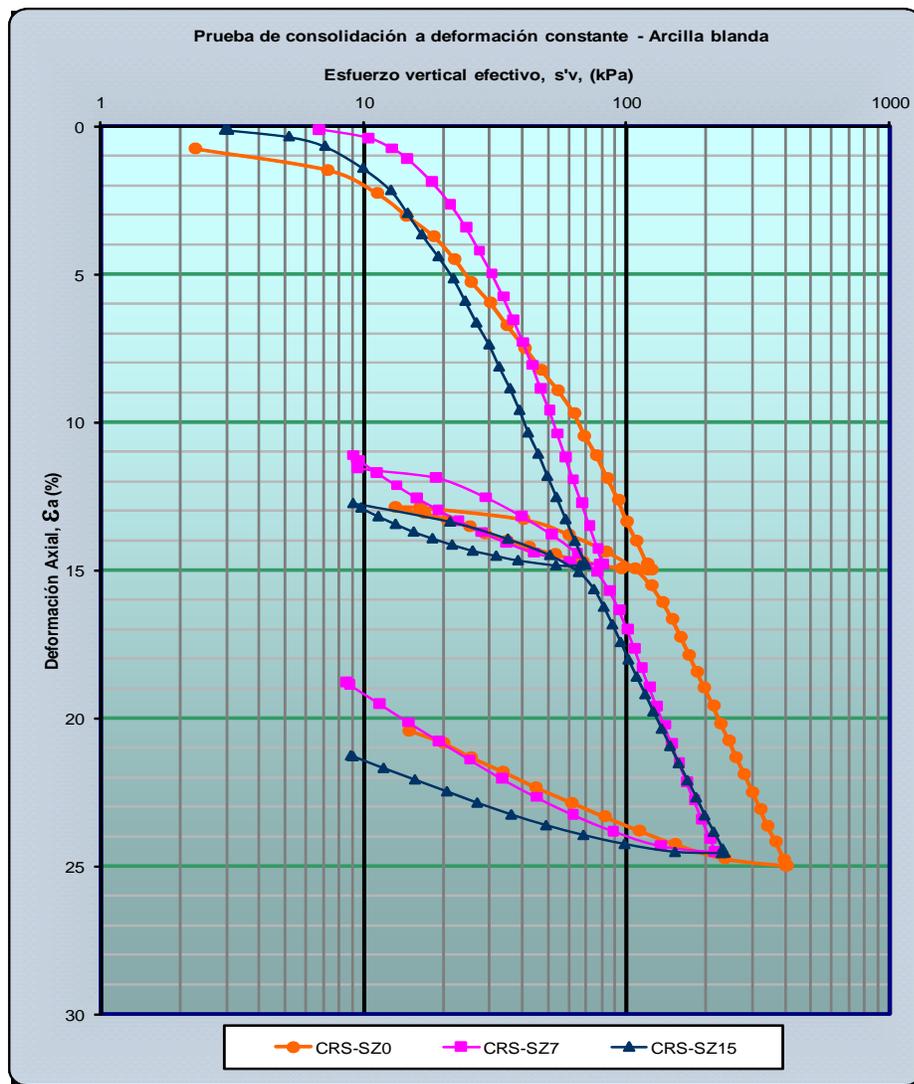


Figura IV.9. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano

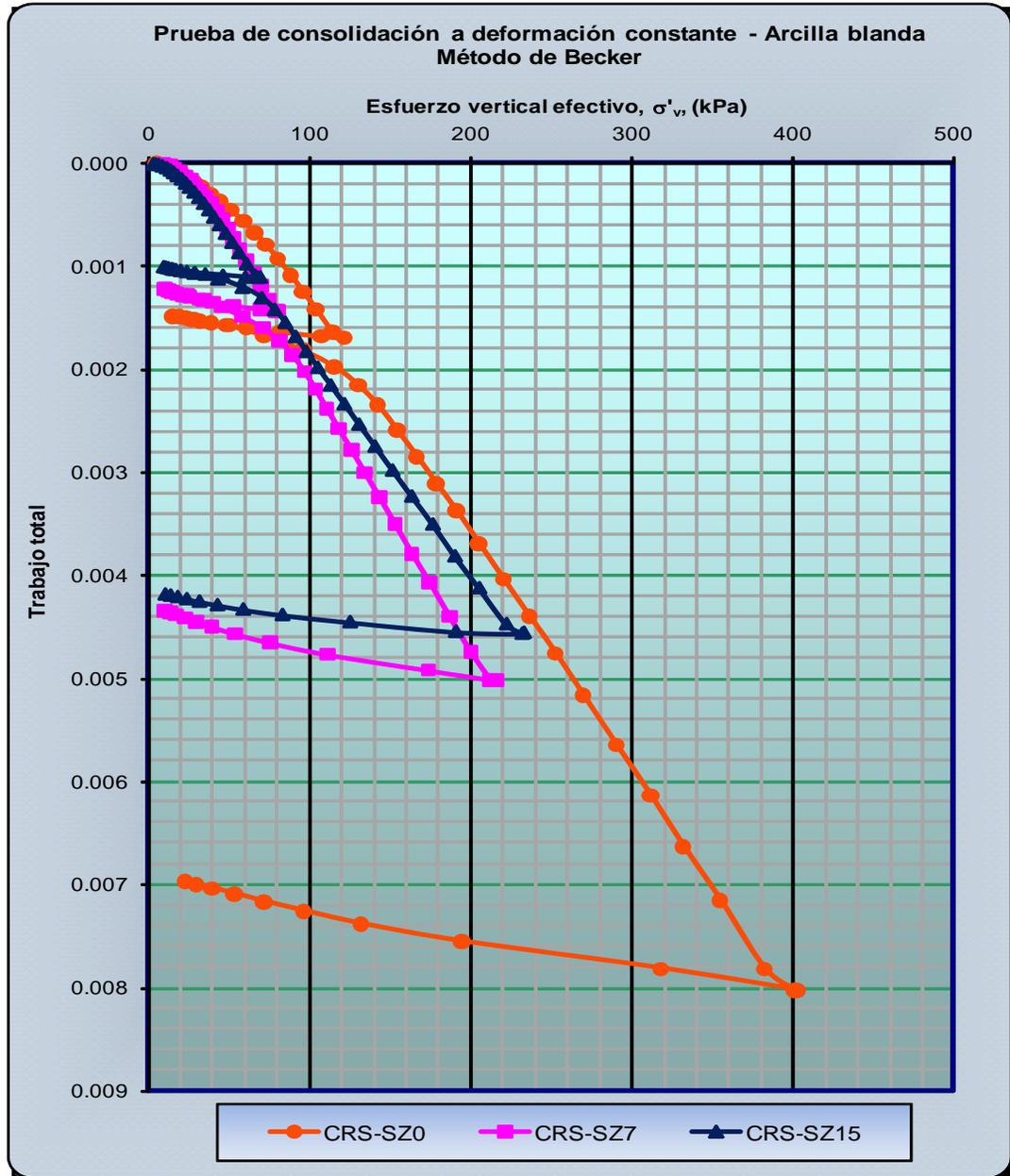


Figura IV.10. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

En lo que respecta a la descarga se observa que la arcilla con gas metano al 7 por ciento presenta mayor expansión (Figuras IV.9 y IV.10), se asume que este comportamiento es generado debido a que los vacíos o concavidades de gas son de menor tamaño que los de la arcilla con gas al 15 por ciento, por lo que, la carga aplicada sobrepresionó al gas, desarrollando zonas de alta presión durante la etapa de carga y, como resultado, se generaron mayores presiones de poro (ver Figura IV.13).



En el caso de la arcilla con gas metano al 15 por ciento, se asume que la poca expansión generada es debida principalmente a que la carga no fue lo suficientemente alta como para sobrepresionar al gas y también a que los vacíos o concavidades de gas son mayores, es decir, el gas tiene más espacio para acomodarse dentro de la estructura, dando como resultado una expansión muy similar a la de la arcilla sin gas.

En la Figura IV.11 se presenta el coeficiente de consolidación y se observa que es mayor en la arcilla con gas metano al 15 por ciento y no se uniformiza como en la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, se asume que este comportamiento es debido a la expansión experimentada durante la descarga de la muestra (al termino de la primera etapa de la prueba), lo que permitió que el gas aumentara su volumen, perdiendo el acomodo generado por la carga o por la presión del gas.

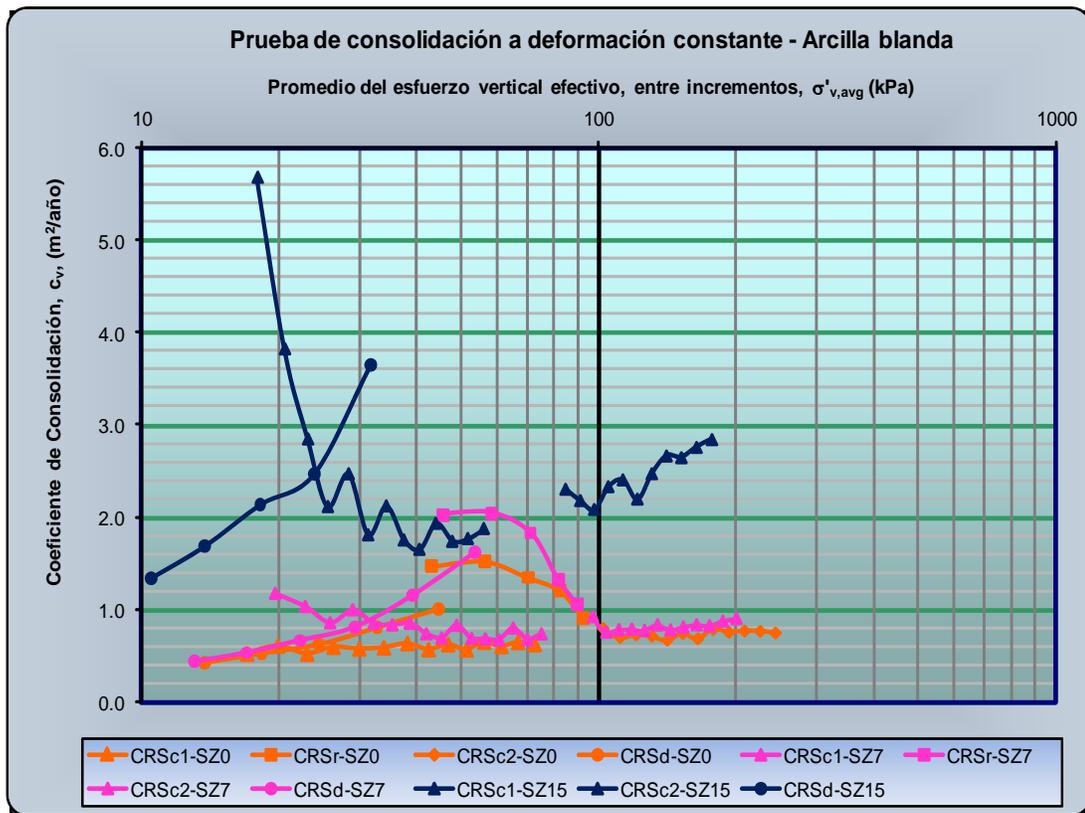


Figura IV.11. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

En la Figura IV.12 se presenta la permeabilidad de la arcilla y se observa que la relación de vacíos es similar en la arcilla con gas metano, pero la permeabilidad de la arcilla con gas al 15 por ciento es mayor durante la primera etapa de la prueba, mientras que la arcilla sin gas es la que presenta la menor permeabilidad después de la mitad de la segunda etapa de la prueba. En la



Figura también se observa que la permeabilidad de la arcilla con gas al 7 por ciento, es similar durante su segunda etapa a la arcilla sin gas durante su primera etapa. Además, la permeabilidad de la arcilla con gas al 15 por ciento en su segunda etapa es similar a la arcilla con gas al 7 por ciento (un poco después de la mitad de su primera etapa) y similar a la arcilla sin gas durante la primera etapa (hasta la mitad del ensaye), en ambos casos con diferente relación de vacíos.

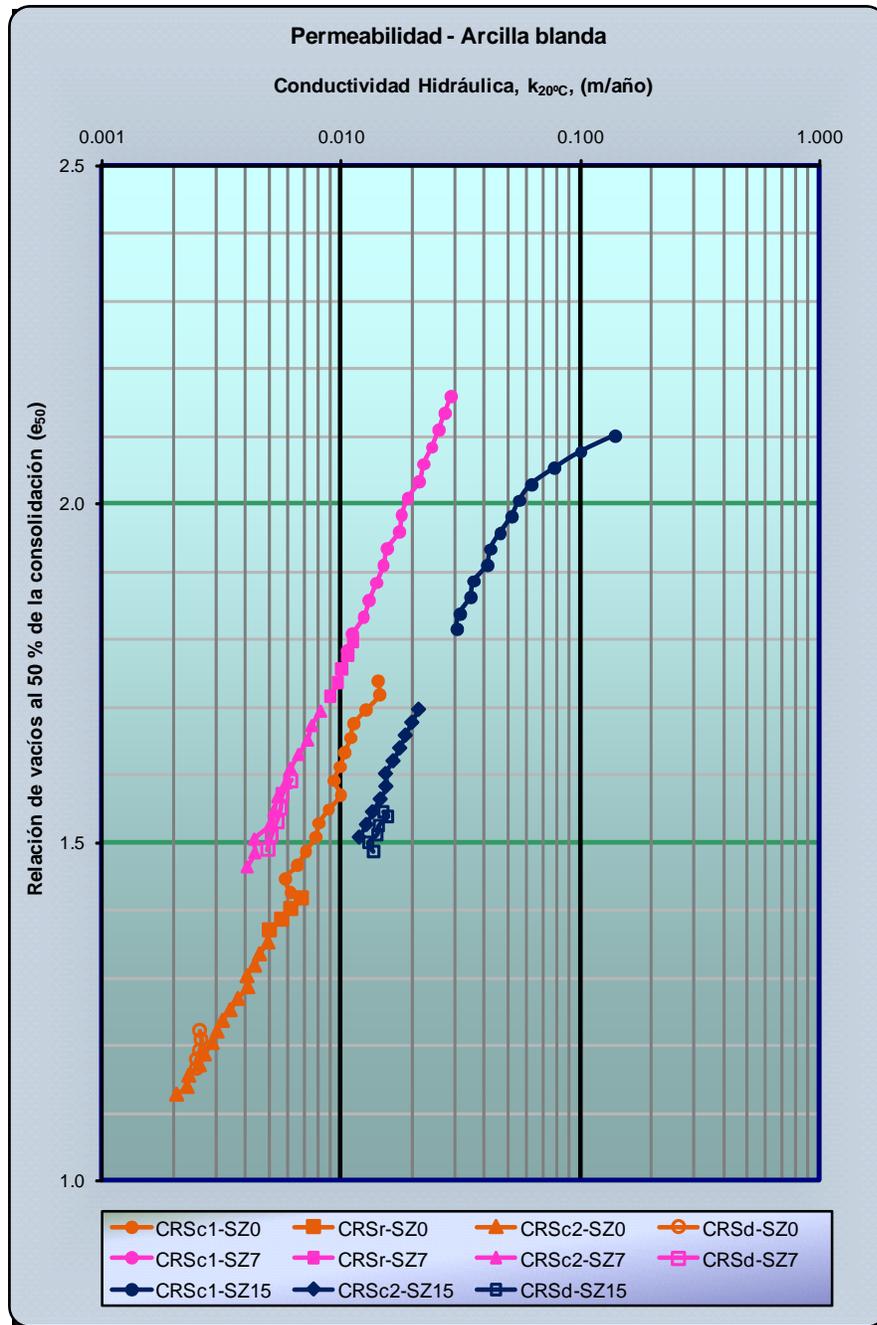


Figura IV.12. Conductividad hidráulica de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.



En la Figura IV.13 se presenta la presión de poro en escala aritmética y los resultados indican que mientras las láminas de arcilla mantengan confinado al gas metano, se desarrollaran mayores presiones de poro, como es el caso de la arcilla con gas al 7 por ciento, pero si las fuerzas moleculares entre las láminas de arcilla no son lo suficientemente fuertes, no se desarrollaran mayores presiones de poro como pasa con la arcilla con gas al 15 por ciento, además se asocia a que el gas no es sobrepresionado por la carga aplicada.

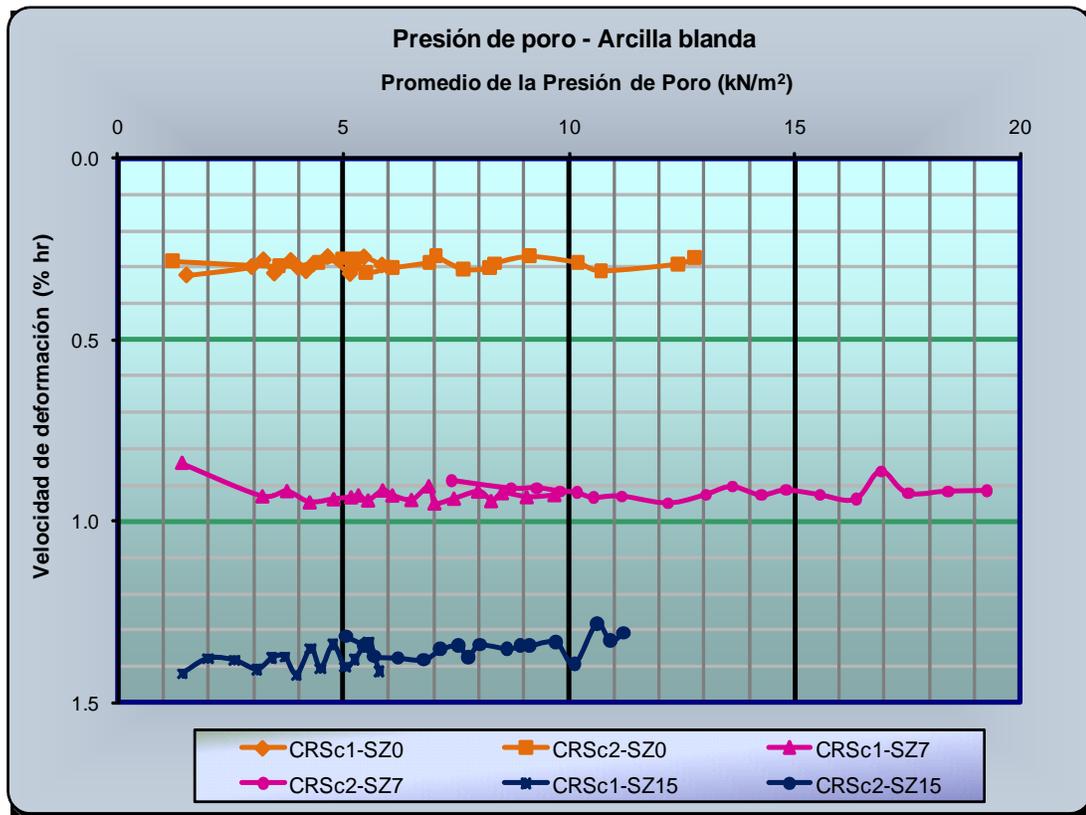


Figura IV.13. Presión de poro de la arcilla marina blanda sin y con gas metano.

Este comportamiento indica que la presión del gas metano influye en el estado de esfuerzos de una arcilla parcialmente saturada con gas, fenómeno que está asociado con el confinamiento proporcionado por las láminas de arcilla, con la tensión superficial, con el confinamiento proporcionado por la capa de agua adsorbida (que es muy rígida y se comporta como el hielo) y, finalmente, con la interface agua-gas (que se comporta como una membrana elástica), el conjunto de estos componentes generan que el gas permanezca confinado y soporte carga al interactuar con las láminas de arcilla y el agua de poro.

IV.1.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano

En la Figura IV.14a se presentan las curvas de compresibilidad correspondientes a la primera etapa del ensaye de CRS de la arcilla marina media sin y con gas metano, en la que se grafica el esfuerzo vertical efectivo, σ'_v , versus el porcentaje de la deformación, mientras que en la Figura IV.14b se presentan las curvas de compresibilidad obtenidas con el método de Becker, en escala aritmética. En las Figuras IV.14a y IV.14b se observa que se requiere menor esfuerzo vertical efectivo, σ'_v , para obtener el 15 por ciento de la deformación en la arcilla con gas metano, también se observa que se requiere mayor esfuerzo vertical efectivo para la arcilla con gas al 15 por ciento que para la arcilla con gas al 7 por ciento. Se asume que el comportamiento presentado es debido a que el gas soporta mayor parte de la carga inducida a mayor cantidad del mismo, generando que la presión en las burbujas de gas metano se incremente a medida que se incrementa el esfuerzo vertical.

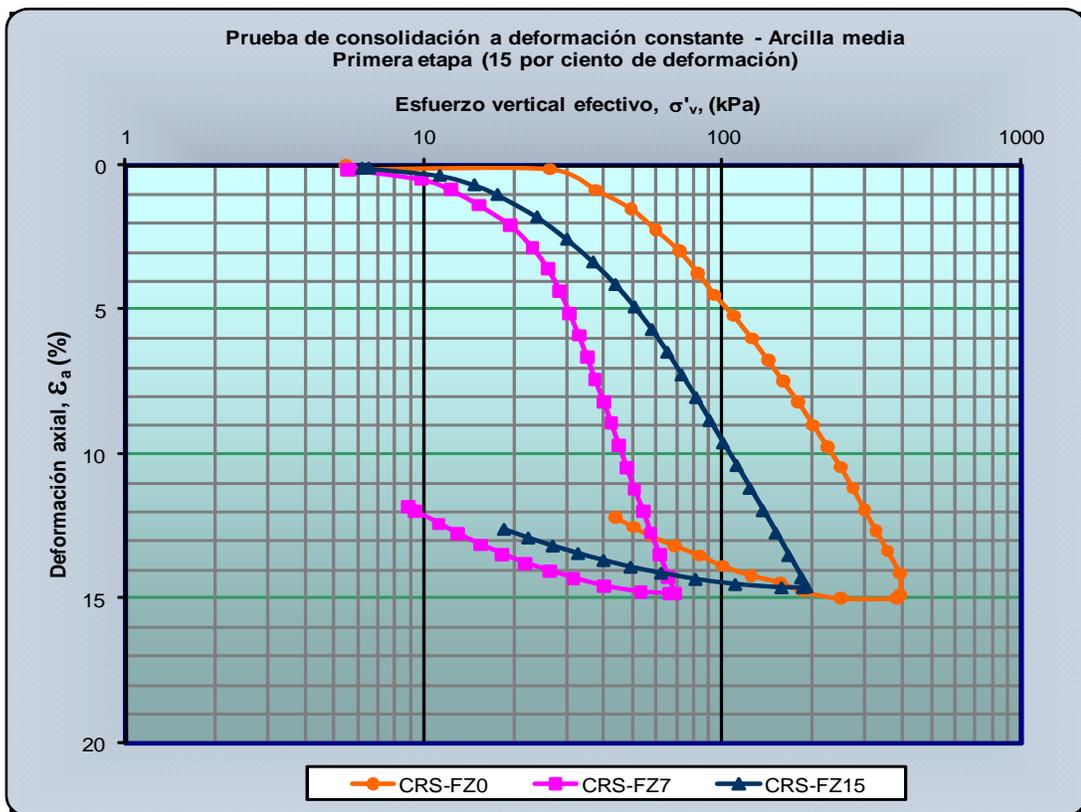


Figura IV.14a. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano.

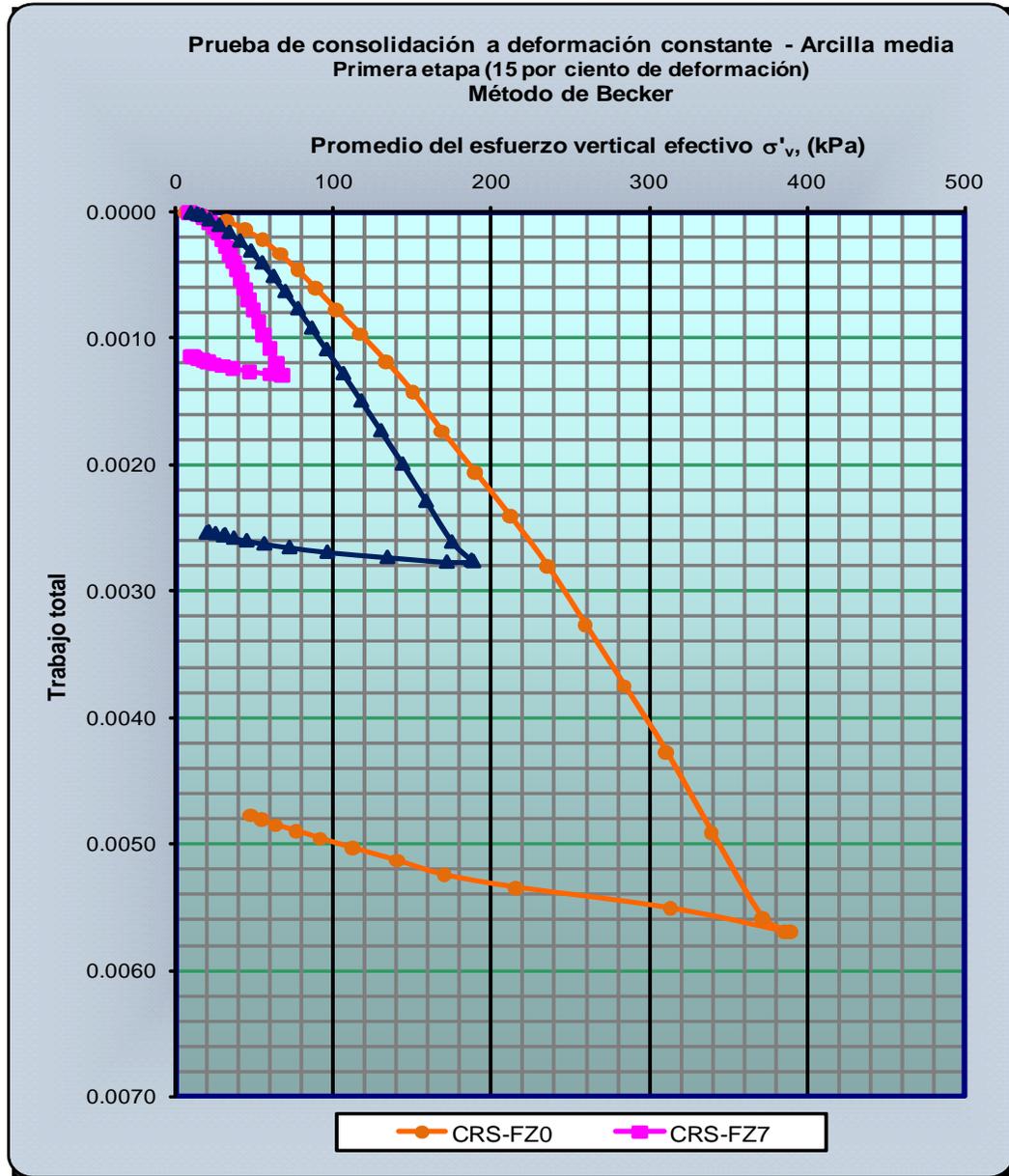


Figura IV.14b. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano.

El esfuerzo vertical efectivo aplicado para obtener el 15 por ciento de la deformación fue de 391, 69 y 191 kPa para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. El esfuerzo vertical efectivo correspondiente a la arcilla marina media con gas al 7 por ciento, es el mismo que el obtenido para la arcilla blanda con gas al 15 por ciento. Los esfuerzos verticales efectivos son menores en aproximadamente 82 y 51 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la diferencia del esfuerzo



vertical efectivo entre las muestras de arcilla con gas metano es de 122 kPa; esta diferencia equivale aproximadamente al 64 por ciento de menor esfuerzo para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con mayor contenido de gas metano.

Por otra parte, en la Figura IV.14b se observa que se requiere menor trabajo para obtener el 15 por ciento de la deformación en la arcilla con gas metano; pero es mayor el trabajo para la arcilla con mayor contenido de gas que el realizado para la arcilla con menor cantidad de gas.

El hecho de que el esfuerzo requerido para la arcilla con gas metano al 15 por ciento sea mayor que el empleado para la arcilla con gas al 7 por ciento indica que el gas interactúa con el agua y las láminas de arcilla para soportar la carga inducida, se asume que es debido a que las burbujas de gas aumentan su rigidez a medida que aumenta la carga y, por lo tanto, a mayor cantidad de gas se tendrá mayor rigidez en el medio, por lo que la arcilla soportara mayor carga a mayor consistencia de la misma. Estos resultados muestran que las fuerzas intermoleculares generadas entre las láminas de la arcilla media son capaces de mantener encapsuladas a las burbujas de gas y, como consecuencia, estas interactúan junto con la arcilla marina para soportar la carga aplicada.

La duración de la etapa de descarga fue de 1 215, 250 y 222 minutos para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento. En términos de deformación axial, la muestra se recuperó aproximadamente 3.0, 3.0 y 2.0 por ciento para la arcilla sin y con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente. La expansión obtenida para la arcilla con gas, indica que las burbujas de gas no fueron sobrepresionadas a tal grado como para reducir su volumen considerablemente y, posteriormente, expandirse al liberarse la carga. La expansión obtenida en la primer etapa del ensaye no puede ser comparada totalmente, debido a que los intervalos de tiempo requeridos para su desarrollo en cada una de las muestras son diferentes, mas sin embargo, se considera que la expansión de la muestra con gas es mayor siempre y cuando la carga aplicada sobre presione las burbujas de gas, por lo menos, en lo que respecta a un ciclo logarítmico.

La presión de preconsolidación y algunos resultados obtenidos de las pruebas de CRS se presentan en la Tabla IV.2 y comparando la presión de preconsolidación estimada con el método de Casagrande se observa que la de la arcilla sin gas es menor en aproximadamente el 77 y 60 por ciento con respecto a la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente. En cuanto a la presión de preconsolidación obtenida con el método de Becker, la de la arcilla sin gas es menor en aproximadamente 77 y 58 por ciento con respecto a la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente.



Tabla IV.2. Presión de preconsolidación de la prueba CRS para la arcilla media sin y con gas.

Parámetro	Muestra CRS-FZ0	Muestra CRS-FZ7	Muestra CRS-FZ15
Método de Casagrande 1936			
Presión de preconsolidación interpretada (σ'_p), kPa	108.2	25.4	43.6
Deformación axial (ε_a) en porcentaje, a σ'_p	5.95	3.46	4.15
Relación de compresión (CC)	0.204	0.282	0.176
Relación de recompresión (RR).	0.036	0.037	0.022
Relación de expansión (SR)	0.035	0.025	0.018
Duración de la prueba (min)	2 557	621	645
Método de trabajo por unidad de Volumen, Becker et al., 1987			
Presión de preconsolidación interpretada (σ'_p), kPa	123.1	28.2	52.2

Al comparar el tiempo se obtiene una disminución del 76 y 75 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, siendo prácticamente los mismos, esto indica que el gas metano interactúa con las láminas de arcilla, obteniéndose una mejor respuesta a mayor contenido de gas. En cuanto a la deformación a la que se estimó la presión de preconsolidación con el método de Casagrande se observa que es menor a menor cantidad de gas.

En la Figura IV.15 se presenta el coeficiente de consolidación, c_v , obtenido durante la primera etapa de la prueba de CRS para la arcilla media sin y con gas metano y se observa que los mayores valores iniciales corresponden a la arcilla con gas al 15 por ciento, mientras que el coeficiente de consolidación correspondiente a la arcilla con gas al 7 por ciento es ligeramente mayor que el de la arcilla sin gas. También se observa en ambas muestras de arcilla con gas, que el coeficiente de consolidación es ligeramente irregular aproximadamente después de la mitad de la prueba, esto indica que el gas trata de acomodarse y/o agruparse dentro de la estructura del suelo, generándose pequeñas concavidades en esta parte del ensaye. De los valores obtenidos se deduce que el 7 por ciento de gas metano no influye significativamente en el valor del coeficiente de consolidación, mientras que cuando la arcilla contiene un 15 por ciento, el valor del coeficiente de consolidación es influenciado significativamente por la presencia del gas metano.

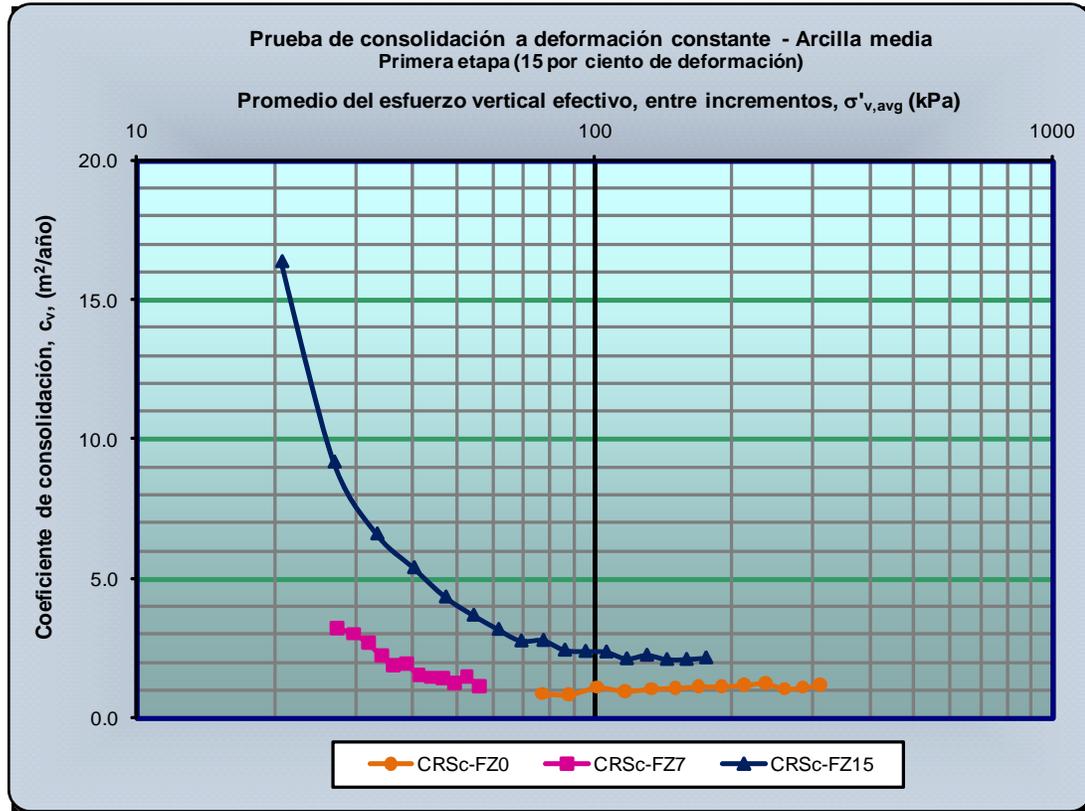


Figura IV.15 Coeficiente de consolidación de la arcilla marina media sin y con metano.

En la Figura IV.16 se presenta la permeabilidad o conductividad hidráulica obtenida durante la primera etapa de la prueba de CRS y se observa que la arcilla con mayor contenido de gas es la que exhibe una permeabilidad ligeramente mayor al inicio de la prueba, pero al mismo tiempo tiene menor relación de vacíos que la arcilla con gas al 7 por ciento. También se aprecia en la Figura IV.16 que la permeabilidad desarrollada por la arcilla con gas al 7 por ciento es igual a la conductividad hidráulica generada en la primera mitad de la arcilla con gas al 15 por ciento. Se asume que este comportamiento está influenciado porque la arcilla con gas al 7 por ciento proporciona mejor confinamiento al gas debido a su relativa poca cantidad y, por lo tanto, la relación de vacíos resultante es mayor, lo que genera una permeabilidad similar a la de la arcilla con mayor contenido de gas metano. También se observa que la permeabilidad de la arcilla sin y con gas al 7 por ciento es prácticamente lineal, mientras que la conductividad hidráulica desarrollada en la arcilla con gas al 15 por ciento inicia describiendo una parábola, para posteriormente uniformizarse hasta el final de la primera etapa de la prueba de consolidación a deformación constante.

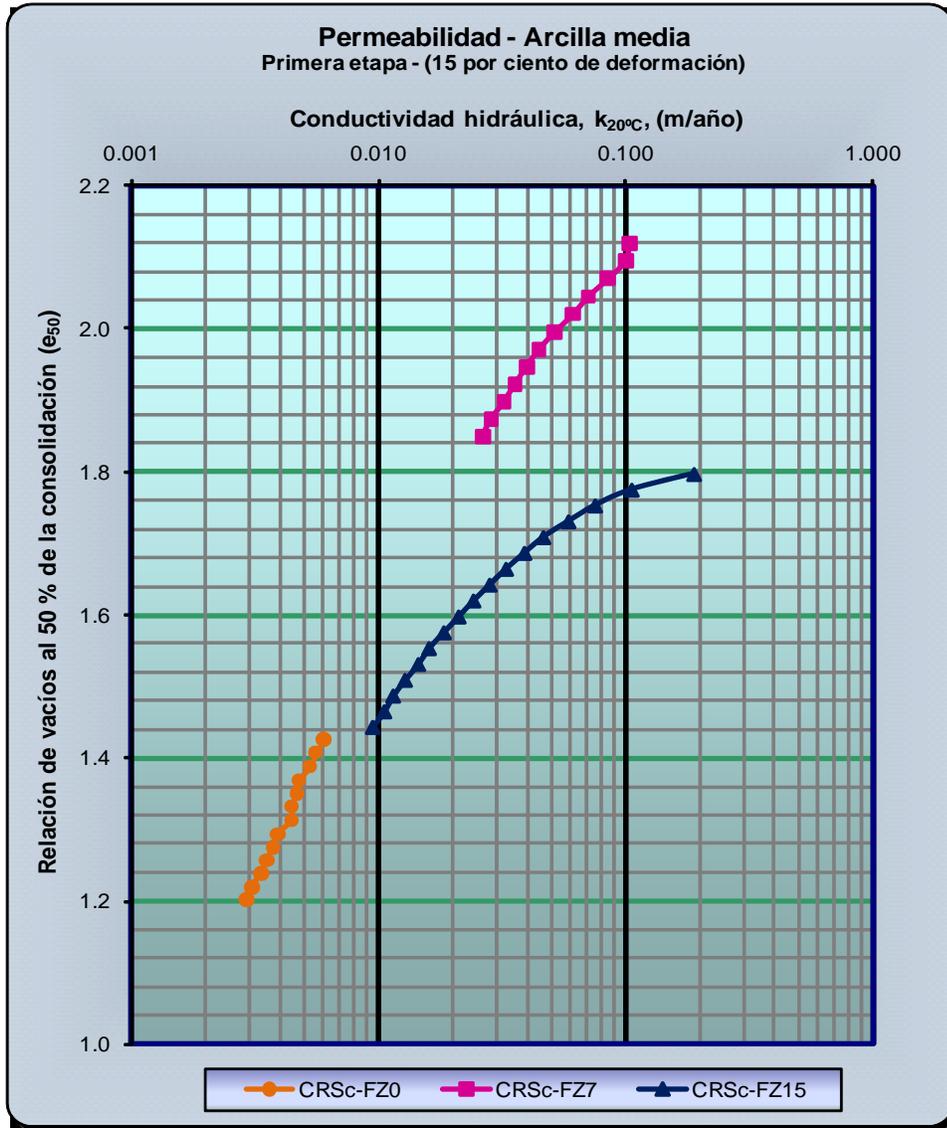


Figura IV.16. Conductividad hidráulica de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En la Figura IV.17a se presenta la presión de poro obtenida durante la primera etapa de la prueba de CRS, en ella se observa que la mayor presión de poro desarrollada corresponde a la arcilla sin gas y la menor presión de poro corresponde a la arcilla con mayor cantidad de gas, este comportamiento está influenciado porque la deformación vertical del 15 por ciento se desarrolla demasiado rápido en la arcilla con gas, por la compresibilidad del mismo, al compararse con lo que tarda en obtenerse en la arcilla sin gas.

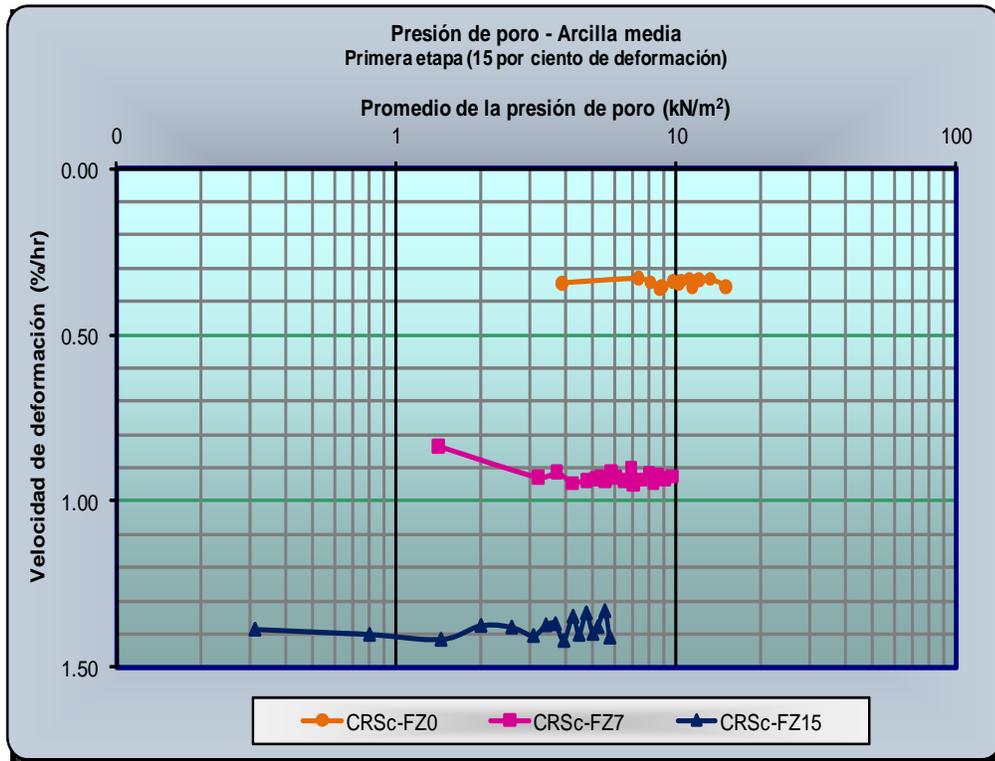


Figura IV.17a. Presión de poro de la arcilla marina media sin y con gas metano.

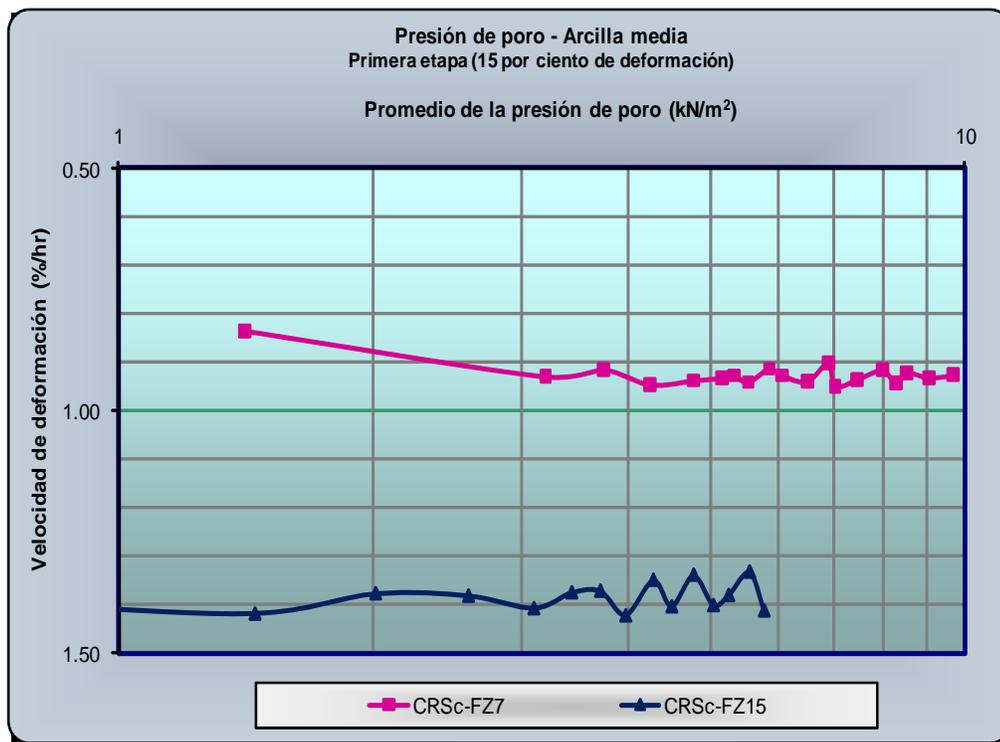


Figura IV.17b. Presión de poro de la arcilla marina media sin y con gas metano.



En la Figura IV.17a también se observa que la curva CRSc-FZ15 es irregular, es decir, presenta ligeras variaciones en la velocidad de deformación, mientras que en la arcilla con gas al 7 por ciento (ver Figura IV.17b) estas son menores, se asume que estas variaciones indican el desarrollo de zonas de alta presión durante la prueba, representando por la porción cóncava casi al inicio de la curva y por las reducciones en la velocidad de deformación, pero debido a estas que no se mantienen, existe disipación de la presión de poro.

En la Figura IV.18a se presentan las curvas de compresibilidad correspondientes a la arcilla marina media sin y con gas metano, obtenidas durante la segunda etapa (15 a 25 por ciento de deformación) del ensaye de CRS, mientras que en la Figura IV.18b se presentan las curvas de compresibilidad obtenidas con el método de Becker.

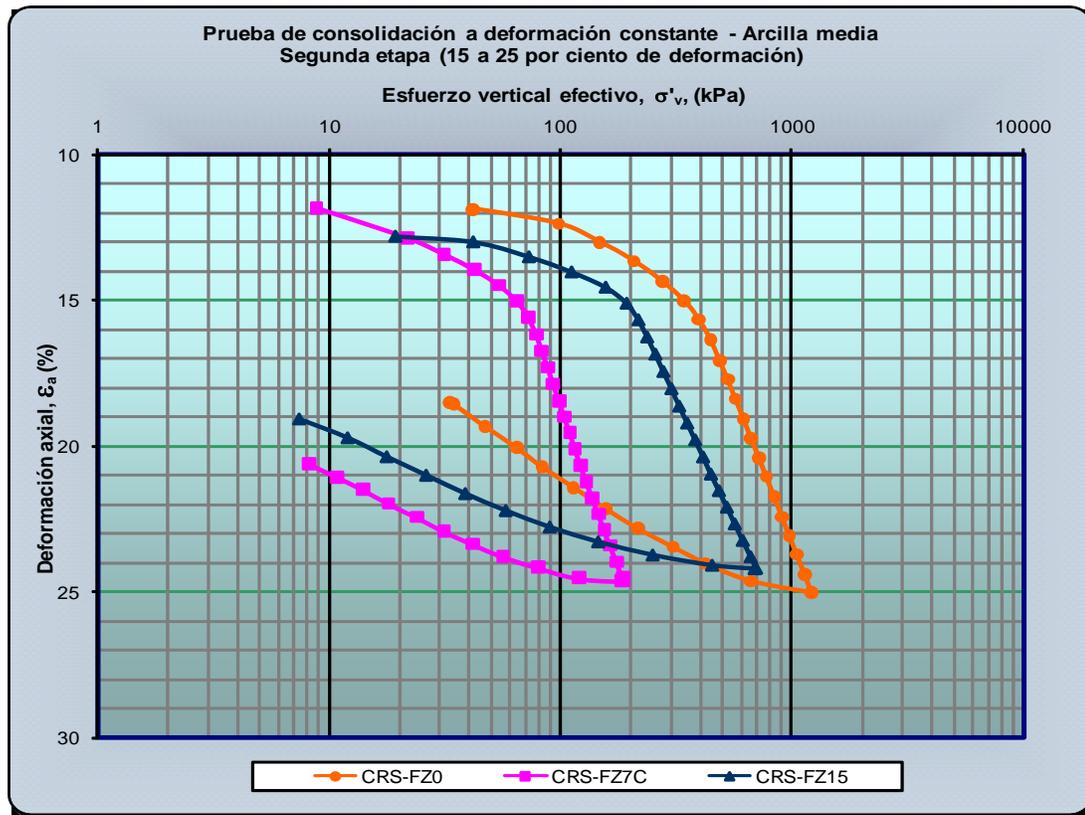


Figura IV.18a. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En la Figura IV.18a se observa que la curva correspondiente a la arcilla con gas al 15 por ciento se desplaza aún más a la derecha de la curva de la arcilla con gas metano al 7 por ciento y, por lo tanto, se acerca más a la curva de la arcilla sin gas; se asume que este comportamiento es debido a que la nueva estructura opone mayor resistencia ante la carga, por la mayor cantidad de gas. En el caso de la arcilla con gas al 7 por ciento se infiere que el gas está distribuido en toda la



muestra y la carga no es lo suficientemente alta como para que el gas reaccione ante la carga actuante, indicando que la carga es distribuida en la nueva estructura del suelo, pero sin modificar sus características mecánicas.

El esfuerzo vertical efectivo aplicado para alcanzar el 25 por ciento de la deformación fue de 1 215, 187 y 694 kPa para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Los esfuerzos equivalen aproximadamente al 85 y 43 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. La diferencia entre la arcilla con gas es de 507 kPa, lo que equivale aproximadamente al 271 por ciento de mayor esfuerzo para la arcilla con gas al 7 por ciento. El hecho de que el esfuerzo requerido para la muestra CRS-SZ15 sea mayor que el empleado para la muestra CRS-SZ7 indica que el gas opone resistencia ante la carga y es debido a que las burbujas de gas adquieren rigidez a medida que se incrementa la carga aplicada. Este comportamiento es un indicativo de que las fuerzas intermoleculares de las láminas de arcilla son capaces de mantener encapsulado al y, como consecuencia, estas interactúan junto con las láminas de arcilla para soportar la carga inducida.

En la Figura IV.18b se observa que se requiere mayor trabajo a medida que aumenta el contenido de gas metano en la arcilla, indicando la reacción del gas ante la carga aplicada, así mismo, se observa que la tendencia de la curva CRS-FZ15 es la de desplazarse hacia la derecha de la curva de la arcilla sin gas, posiblemente, a mayor deformación se obtendría mayor resistencia. Probablemente a una aplicación lenta de la carga se generarían mayores presiones de preconsolidación; posiblemente la mejor forma de evaluar las propiedades de las arcillas con gas metano es realizando ensayos de consolidación unidimensional por incrementos y empleando intervalos pequeños de carga para obtener curvas de compresibilidad detalladas.

Los tiempos empleados para obtener el 25 por ciento de deformación vertical fueron de 1 791, 388 y 408 minutos para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Estos tiempos corresponden al 78 y 77 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. En cuanto a la arcilla con gas al 15 por ciento, se obtuvo un incremento de aproximadamente el 5 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento. Esto indica que los resultados son prácticamente los mismos y, así mismo, muestra la interacción del gas metano con las láminas de arcilla y el agua de poro.

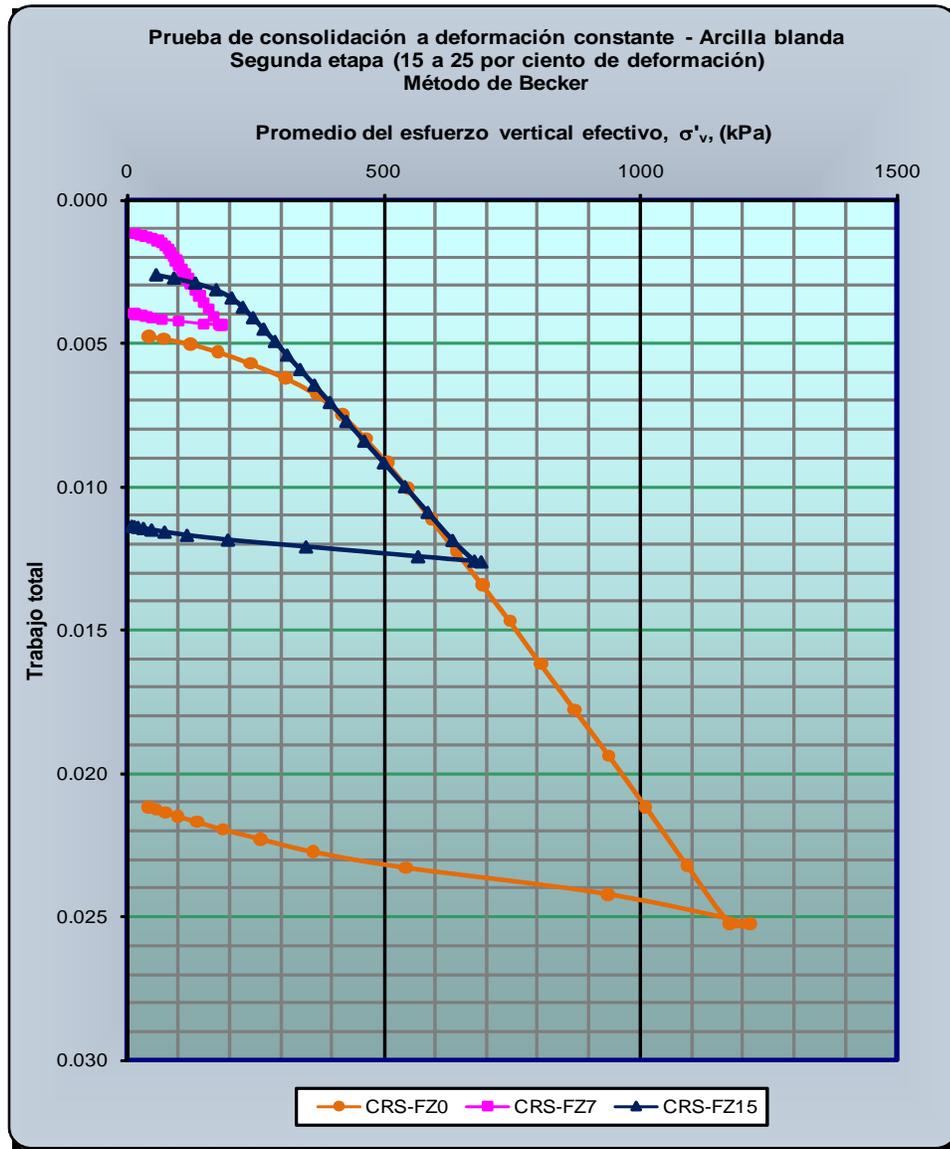


Figura IV.18b. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En cuanto a la etapa de descarga, se observa (Figuras 18a y 18b) que la arcilla con gas presenta la menor expansión, indicando que la carga aplicada no fue lo suficientemente alta como para generar sobre presión dentro de la muestra con gas; estos resultados también están influenciados por la liberación de la presión durante el ensaye, por lo tanto, el gas remanente al termino de la prueba no está altamente sobrepresionado. En ambas Figuras también se observa que la arcilla con gas al 15 por ciento presentó mayor expansión que la arcilla con gas al 7 por ciento, esto indica la influencia de la mayor cantidad de gas dentro de la arcilla. En lo que respecta al tiempo requerido para descargar a la muestra fue de 2 513, 400 y 542 minutos para la arcilla sin



gas y con gas al 7 y 15 por ciento, estos tiempos equivalen aproximadamente al 84 y 78 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la diferencia obtenida para la arcilla con gas, el tiempo es menor en aproximadamente el 26 por ciento, con respecto a la arcilla con mayor contenido de gas metano.

En la Figura IV.19 se presenta el coeficiente de consolidación, c_v , obtenido durante la segunda etapa de la prueba de CRS y se observa que su valor es similar para la arcilla sin gas y con gas al 7 por ciento, pero con mayor esfuerzo vertical para la primera. También se observa que el c_v es menor para la arcilla con gas al 15 por ciento durante la etapa de descarga, comparando los resultados con los de la arcilla con menor cantidad de gas, indicando que existe un reagrupamiento del gas dentro de la estructura del suelo, estos resultados muestran que el 7 por ciento de gas no modifica los valores del c_v considerablemente, mientras que el 15 por ciento de gas si los modifica significativamente.

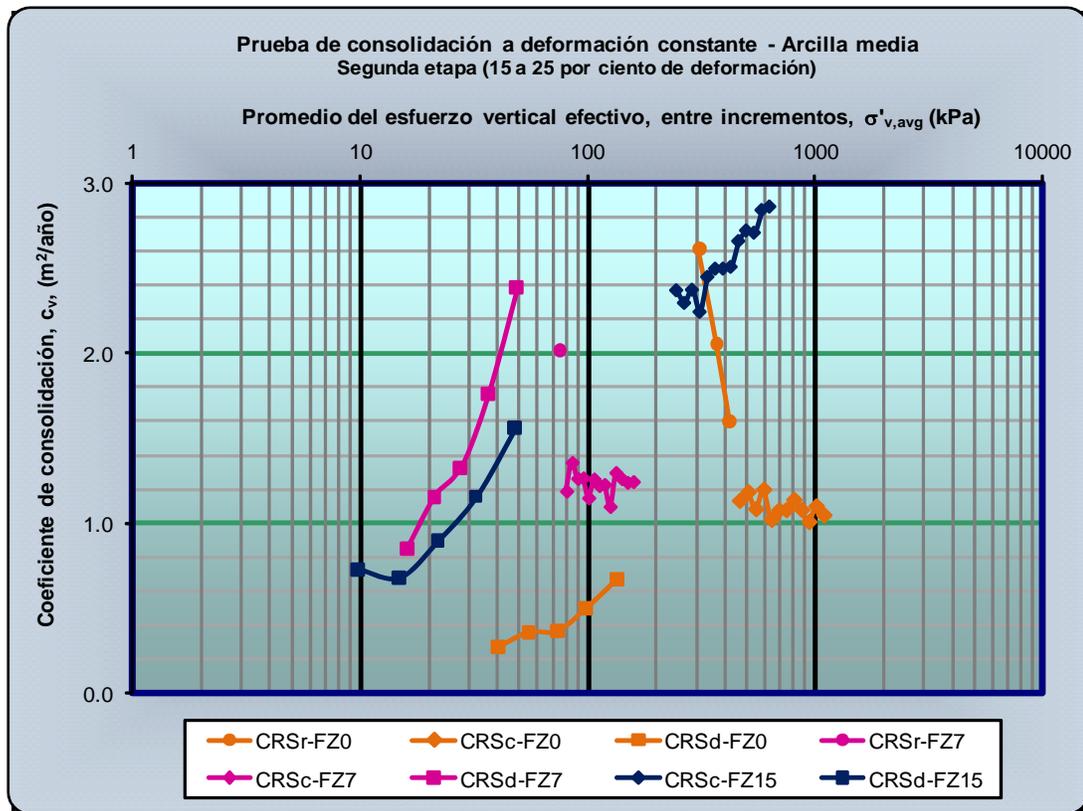


Figura IV.19. Coeficiente de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En la Figura IV.20 se presenta la permeabilidad obtenida durante la segunda etapa de la prueba de CRS y se observa que la permeabilidad es mayor en la arcilla con menor contenido de



gas, el hecho de que la permeabilidad no es mayor en la arcilla con el 15 por ciento, posiblemente es debido a que la carga no fue lo demasiado alta como para expulsar el fluido de poro a mayor velocidad, como en el caso de la arcilla con gas al 7 por ciento.

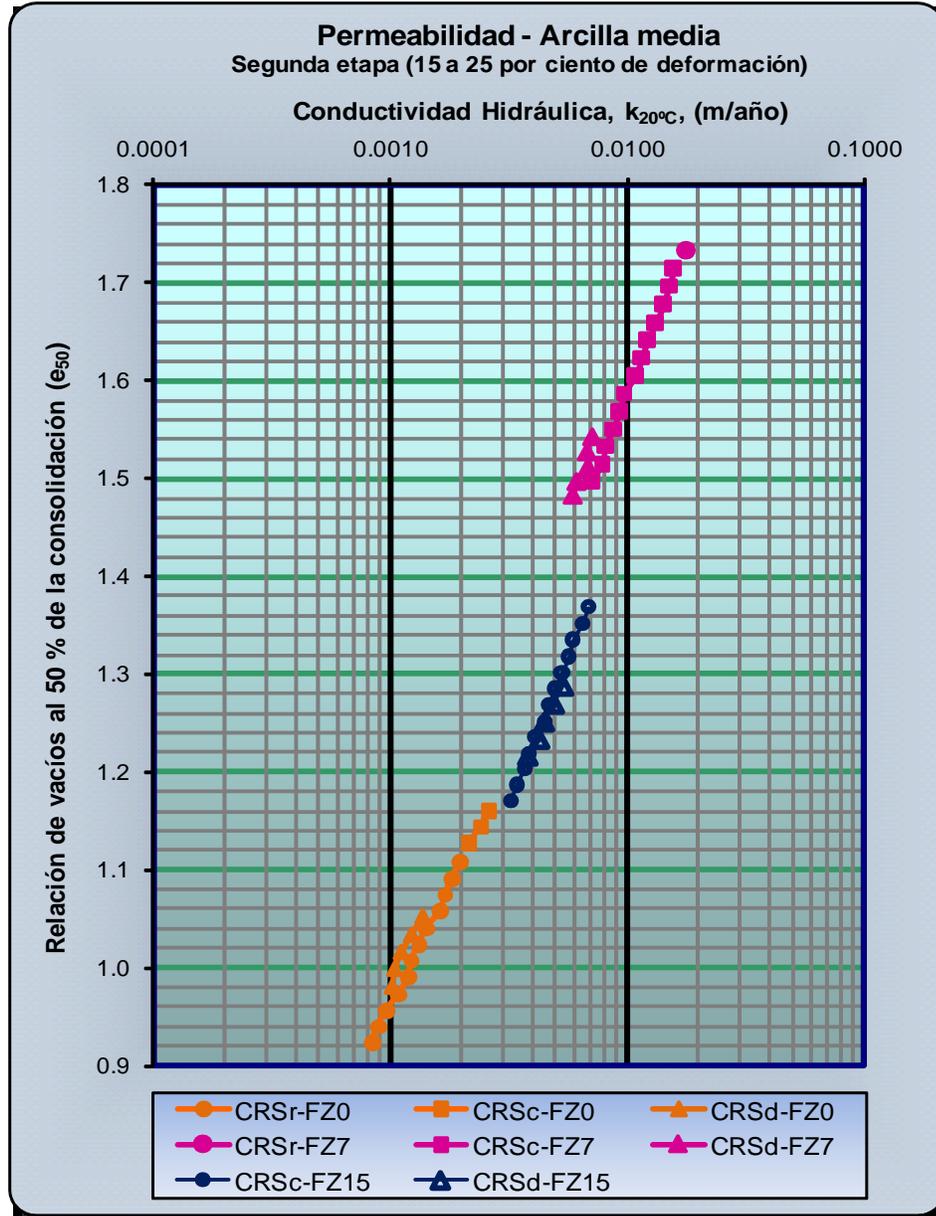


Figura IV.20 Curva de Conductividad hidráulica de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En la Figura IV.21 se presenta la presión de poro obtenida durante la segunda etapa (15 a 25 por ciento de deformación) de la prueba de CRS y se observa que se genera menor presión de poro en la arcilla conforme aumenta la cantidad de gas, posiblemente este comportamiento está

influenciado por la liberación de la presión durante el ensaye y por el rápido desarrollo de la prueba, en consecuencia, la carga no es lo suficientemente alta como para sobrepresionar a las burbujas de gas y crear mayor presión de poro. También se observa el desarrollo de dos concavidades en cada una de las muestras con gas, disminuyendo la velocidad de deformación al termino de la concavidad y para posteriormente estabilizarse, esto indica que el gas interactúa con las partículas de arcilla y el agua de poro y, por lo tanto, resiste parte de la carga aplicada.

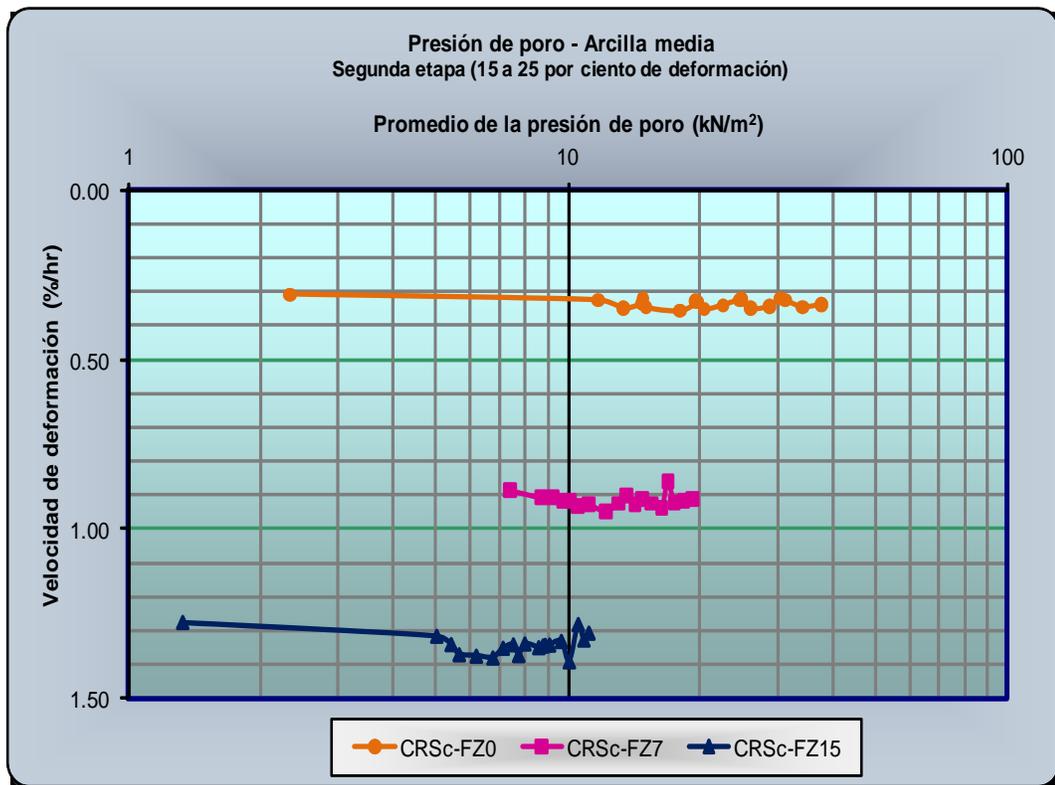


Figura IV.21. Presión de poro de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En las Figuras IV.22 a IV.25 se presentan los resultados obtenidos de las dos etapas de la prueba de consolidación a deformación constante. En la Figura IV.22 se observa que poco después del inicio de la prueba, la curva de la arcilla con gas al 15 por ciento se desplaza a la derecha de la curva de la arcilla con gas al 7 por ciento, acercándose a la curva de la arcilla sin gas; este comportamiento indica que el gas interactúa con el agua de poro y las láminas de arcilla para soportar la carga inducida. Así mismo, se observa que la expansión es mayor en la arcilla con mayor contenido de gas, pero solo al final de la segunda etapa de la prueba.

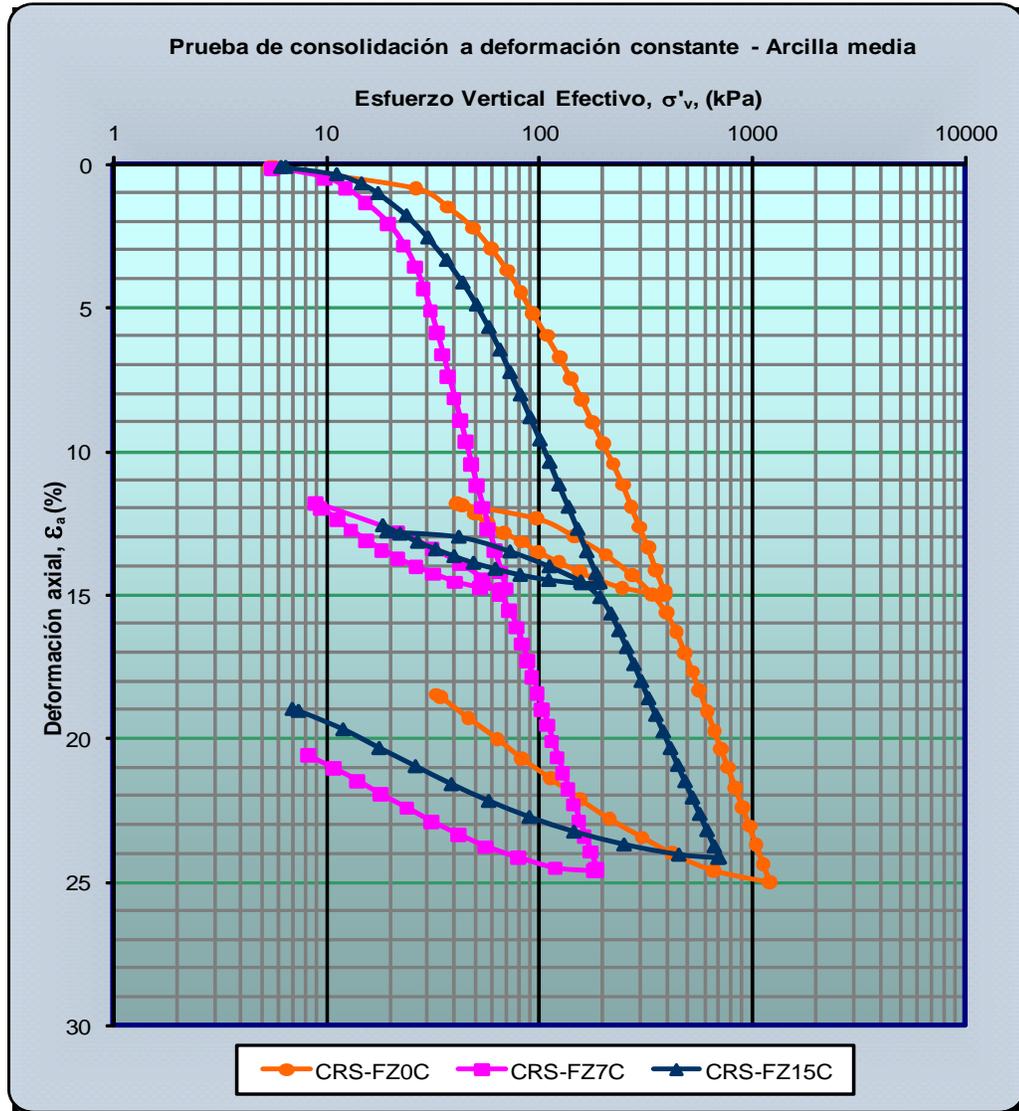


Figura IV.22. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En la Figura IV.23 se presentan las curvas de compresibilidad obtenidas con el método de Becker y se observa que la curva correspondiente a la arcilla con gas metano al 15 por ciento se desplaza ligeramente hacia la derecha de la curva de la arcilla sin gas, por lo que posiblemente, de continuarse con la deformación del suelo, esta curva se tendería a desplazarse hacia la derecha, indicando que el gas metano es capaz de soportar mayor carga, al interactuar con las láminas de arcilla y el agua de poro.

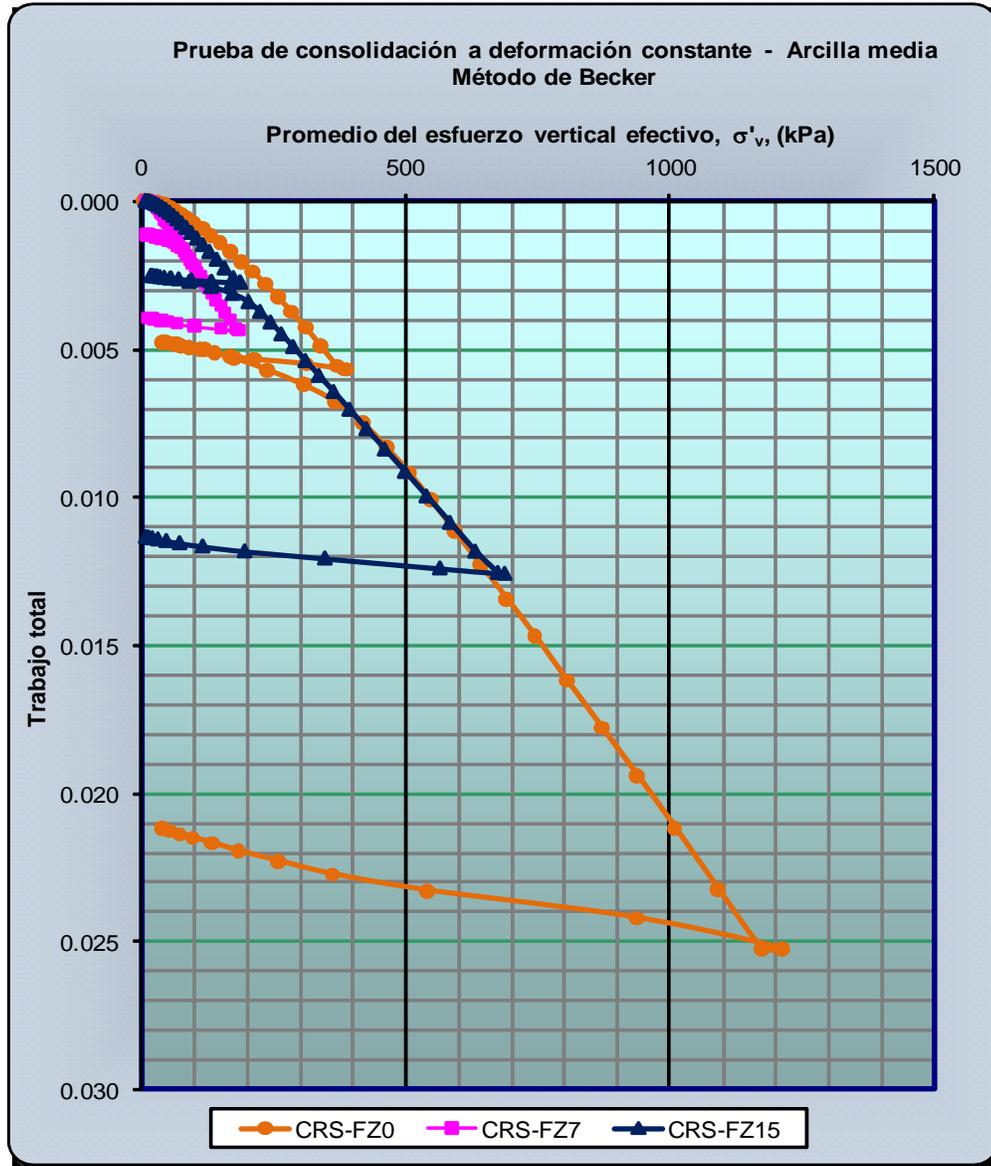


Figura IV.23. Curvas de compresibilidad de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En la Figura IV.24 se presenta el coeficiente de consolidación, c_v , y se observa que su valor es muy alto para la arcilla con gas metano al 15 por ciento, para posteriormente reducir considerablemente sus valores y estabilizarse, indicando que el gas se reacomoda dentro de la estructura del suelo.

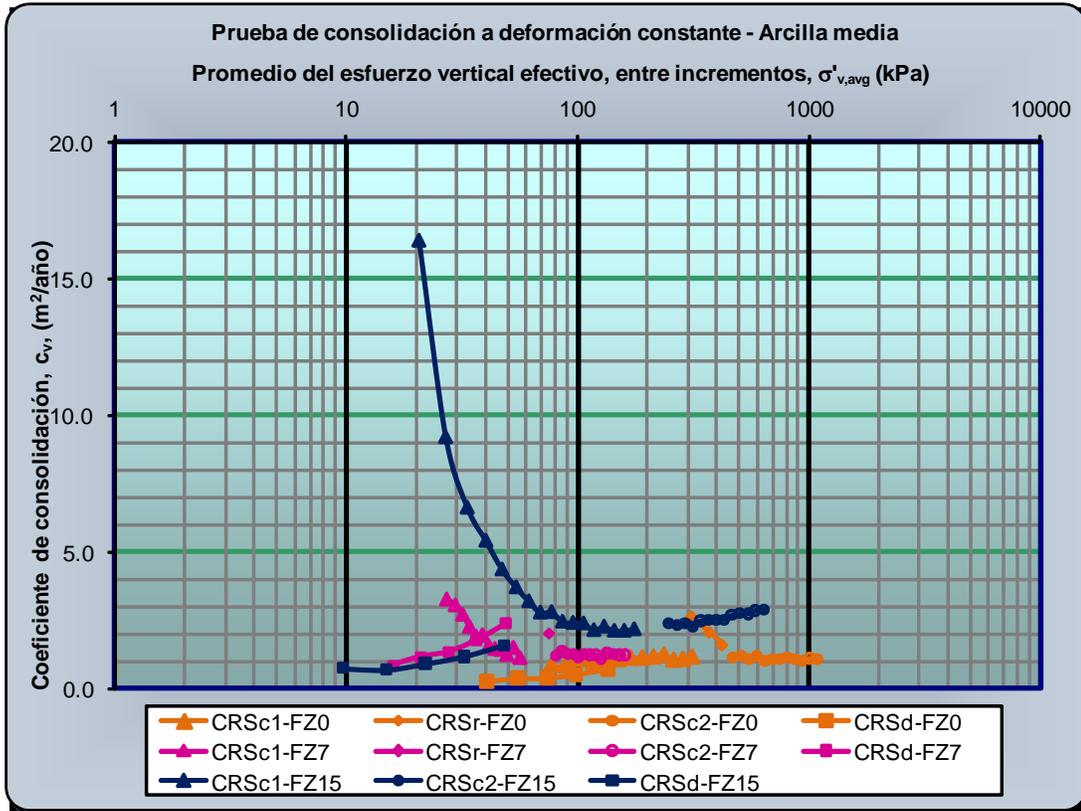


Figura IV.24 Coeficiente de consolidación de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En la Figura IV.25 se muestra la permeabilidad obtenida durante el ensaye y se observa que a medida que se desarrolla la prueba, generalmente, la permeabilidad se estabiliza, así mismo se observa que de la mitad al final de la permeabilidad obtenida para la arcilla con el 15 por ciento es similar a la primera etapa de la arcilla con gas al 7 por ciento y la permeabilidad de la segunda etapa de la prueba de la arcilla con gas al 15 por ciento, es similar a la permeabilidad obtenida para la primera etapa de la arcilla sin gas, indicando que la relación de vacíos coincide en esas etapas, además, esto ocurre a diferentes velocidad de deformación, siendo más lenta para la arcilla con mayor contenido de gas, lo que muestra que el desarrollo de la permeabilidad está influenciado por la presencia del gas.

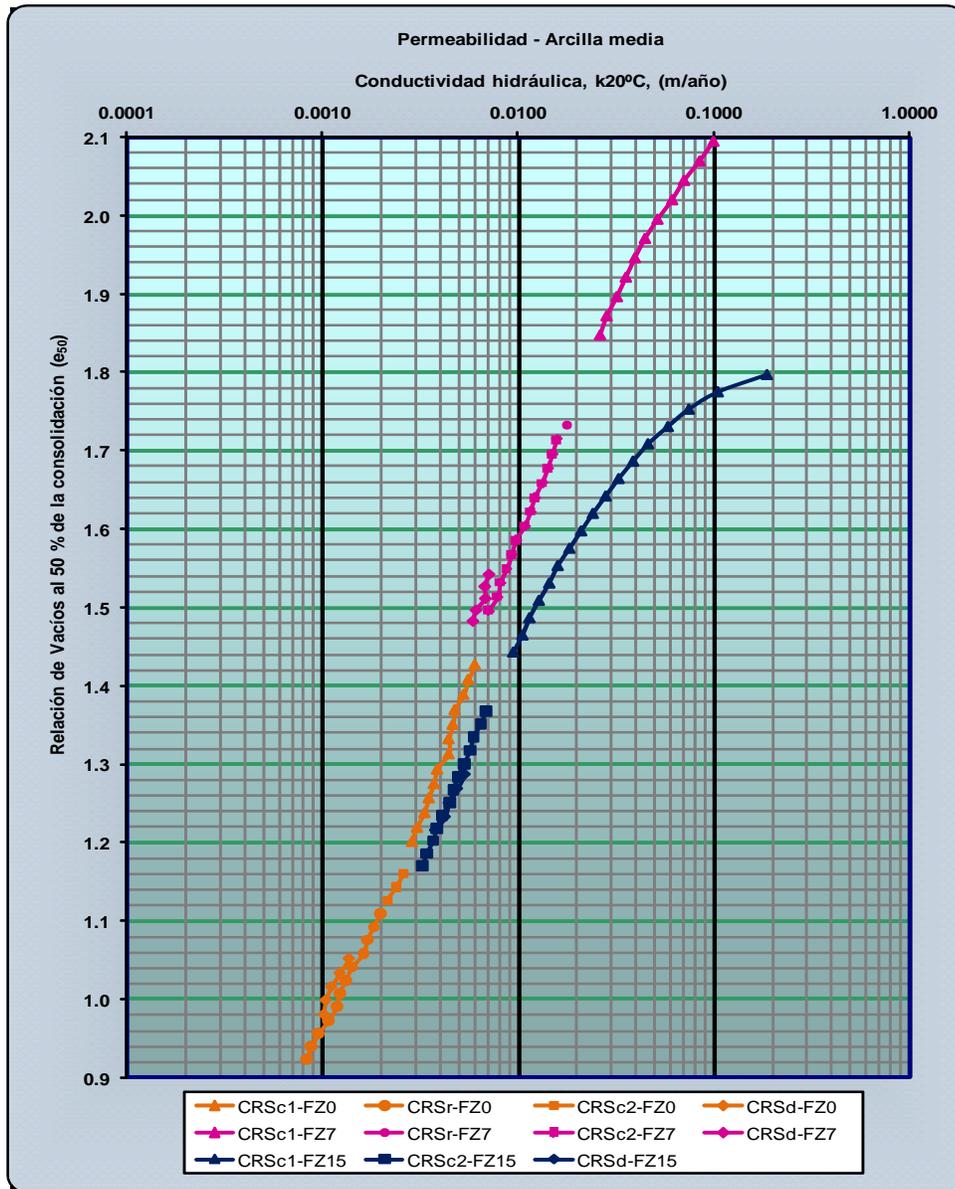


Figura IV.25. Conductividad hidráulica de la arcilla marina media sin y con gas metano.

En la Figura IV.26a se muestra la presión de poro desarrollada durante la prueba y se observa que a medida que se desarrolla la prueba se generan zonas de alta presión y puntos máximos en la arcilla con gas, indicando cambios en la velocidad de deformación y que se han sobrepasado los esfuerzos soportados por el fluido de poro, lo que es más evidente en la arcilla con gas al 15 por ciento (Figura IV.26b), esto sugiere la interacción del gas con la arcilla y el agua de poro para soportar la carga aplicada.

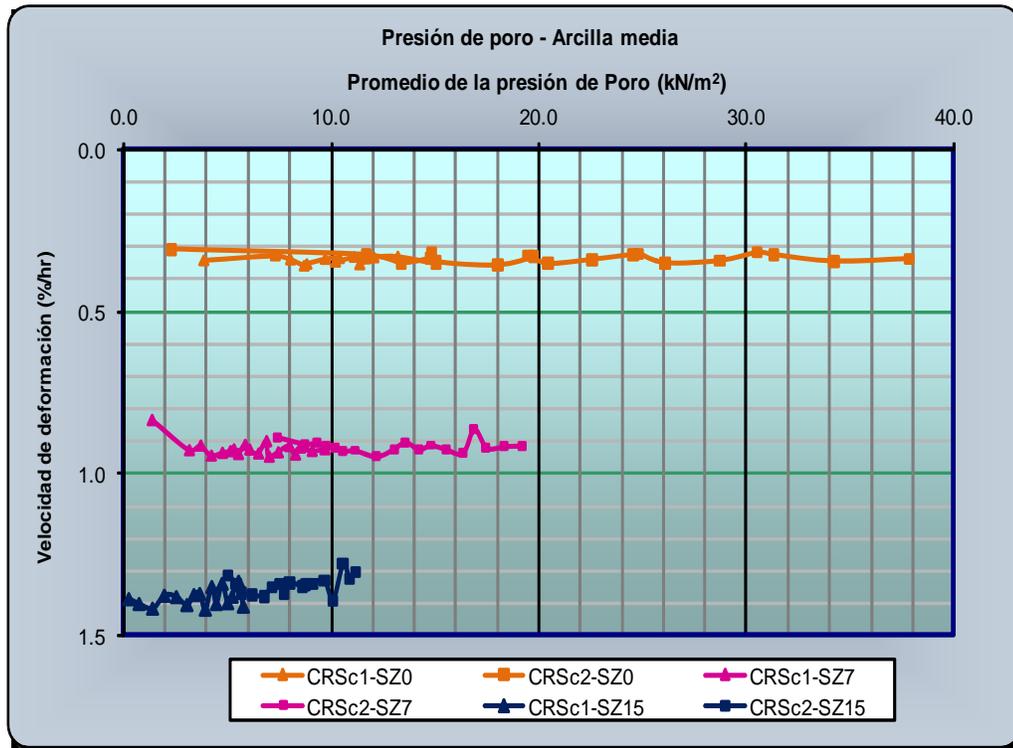


Figura IV.26a. Presión de poro de la arcilla marina media sin y con gas metano

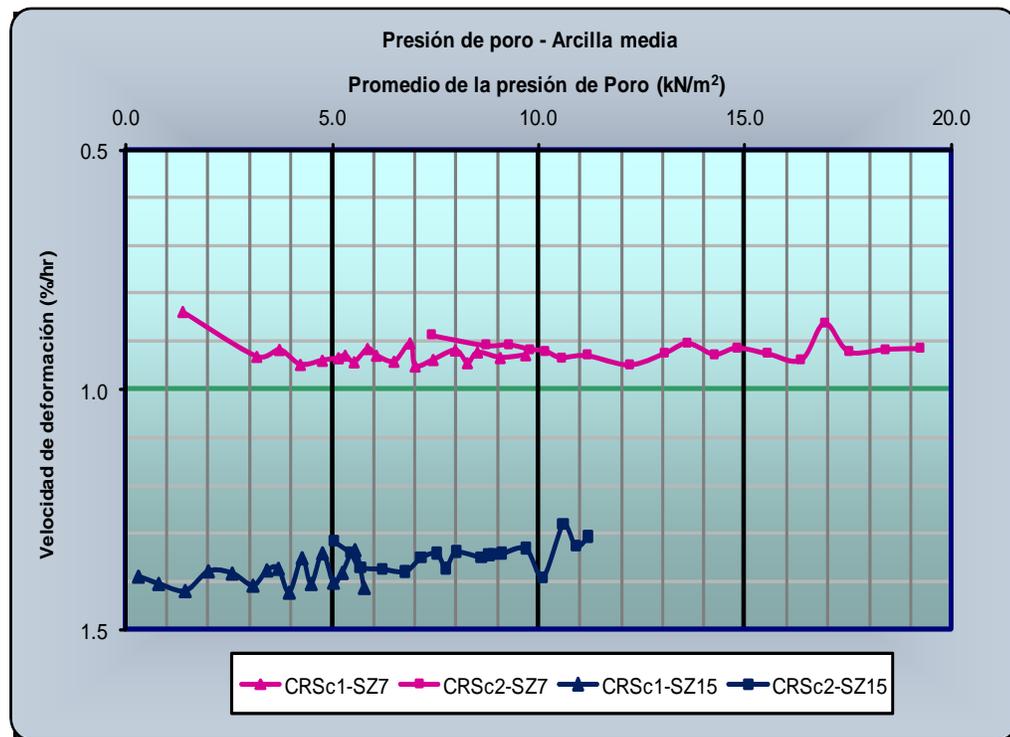


Figura IV.26b. Presión de poro de la arcilla marina media con gas metano.



Los resultados obtenidos de la presión de poro indican que la presión del gas influye en el estado de esfuerzos de una arcilla parcialmente saturada y, aparentemente, la presión está relacionada con la tensión superficial (Schurman, 1966) y los límites de expansión y contracción de las cavidades de las burbujas (Wheeler et. al 1989), pero adicionalmente se deben considerar las fuerzas intermoleculares desarrolladas entre las láminas de la arcilla, es decir, considerar el confinamiento desarrollado por la arcilla para mantener al gas encapsulado, fuerzas relacionadas con la interface agua-gas y posiblemente se relacionen con la extensión de la capa adsorbida en las esquinas de las láminas de las arcillas.



IV.2. Pruebas de Veleta Miniatura

La resistencia al esfuerzo cortante es una de las propiedades más importantes del suelo y se ha encontrado que está influenciada por diversos factores, entre ellos la relación de vacíos; por lo que su determinación adquiere mayor importancia cuando una arcilla contiene burbujas de gas, debido a que se crean concavidades o vacíos de gas de mayor tamaño que el de las láminas de arcilla, por lo tanto, es importante conocer la posible variación de las características de resistencia al esfuerzo cortante de una arcilla conteniendo gas.

La investigación del comportamiento de suelos conteniendo gas ha sido limitada, al comparar con lo realizado para suelos parcialmente saturados o no saturados y, aparentemente, la arcilla conteniendo gas metano se comporta ligeramente diferente a una arcilla no saturada con aire o cuando cambia su grado de saturación, por ejemplo, cuando se presentan variaciones en el nivel freático, en este mismo orden de comparación, lo realizado para estudiar a las arcillas conteniendo gas metano ha sido más limitado. Pero lo desarrollado para los suelos no saturados ha servido como base para los estudios realizados y ha permitido entender el comportamiento de un suelo conteniendo gas.

Para conocer las variaciones de la resistencia al esfuerzo cortante debido a la presencia del gas se han realizado diversos estudios de campo alrededor del mundo (Whelan et al., 1975; Bhasin y Leland, 1978; Denk et al., 1981; Christian y Cranston, 1997; Fugro 2001, 2002; Best, et al., 2003;) y se ha encontrado que la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos cohesivos, generalmente, disminuye con el contenido de gas; resultados similares se han encontrado en investigaciones de laboratorio, efectuadas en suelos limo arcillosos para conocer la variación de la resistencia al esfuerzo cortante debido a la presencia del gas metano (Nageswaran, 1983; Wheeler, 1986; Sills et al. 1991; Vanoudheusden, et al. 2003).

Algunos estudios de laboratorio realizados en muestras de suelo limo arcillosos (Nageswaran, 1983) y en investigaciones de campo en suelos arcillosos (Whelan et al., 1975; Whelan et al., 1977, 1978; Whelan, 1979) han empleando el equipo de veleta miniatura para conocer las características del esfuerzo cortante de un suelo fino conteniendo gas y se ha encontrado que los valores de resistencia al esfuerzo cortante varían, pero generalmente son menores.

En este estudio se realizaron pruebas de torcómetro, de veleta miniatura motorizada para efectuar mediciones de la resistencia inalterada, residual y remodelada al esfuerzo cortante de la



arcilla blanda y media sin y con gas metano; las pruebas siguieron las recomendaciones emitidas en la norma D4648 de la ASTM.

IV.2.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano

Los resultados obtenidos de las pruebas de torcómetro y de veleta miniatura para conocer la resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas metano se presentan en la Tabla IV.3. Los mismos resultados, versus el contenido de agua, se presentan gráficamente en la Figura IV.27.

Tabla IV.3. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

Resistencia al esfuerzo cortante				
Veleta miniatura (MV) – Torcómetro (TV)				
Arcilla blanda	Número de muestra	Inalterada S_u (kPa)	Residual $S_{u,res}$ (kPa)	Remoldeada $S_{u,rem}$ (kPa)
sin gas metano (SZ0)	MVSZ0-4	10.73	1.72	3.50
	TVSZ0-4	20.59		4.40
	MVSZ0-2	10.39	2.06	3.69
	TVSZ0-2	13.41		4.21
	MVSZ0-3	10.29	2.06	3.69
	TVSZ0-3	20.59		4.21
con gas metano al 7 por ciento (SZ7)	MVSZ7-10	6.37	2.15	3.78
	TVSZ7-10	6.13		3.83
	MVSZ7-9	6.13	1.87	3.78
	TVSZ7-9	2.87		2.11
	MVSZ7-7	6.08	2.35	3.73
	TVSZ7-7	7.66		4.02
con gas metano al 15 por ciento (SZ15)	MVSZ15-7	3.93	1.20	2.73
	TVSZ15-7	5.75		3.83
	MVSZ15-8	3.78	1.29	3.02
	TVSZ15-8	8.62		3.83
	MVSZ15-6	3.45	1.82	2.82
	TVSZ15-6	11.49		3.83

Considerando la mayor y menor resistencia inalterada al esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas metano, para propósitos de comparación, se obtiene una disminución en la resistencia inalterada de la arcilla sin gas de aproximadamente 41 y 65 por ciento, cuando la arcilla contiene el 7 y 15 por ciento de gas respectivamente.

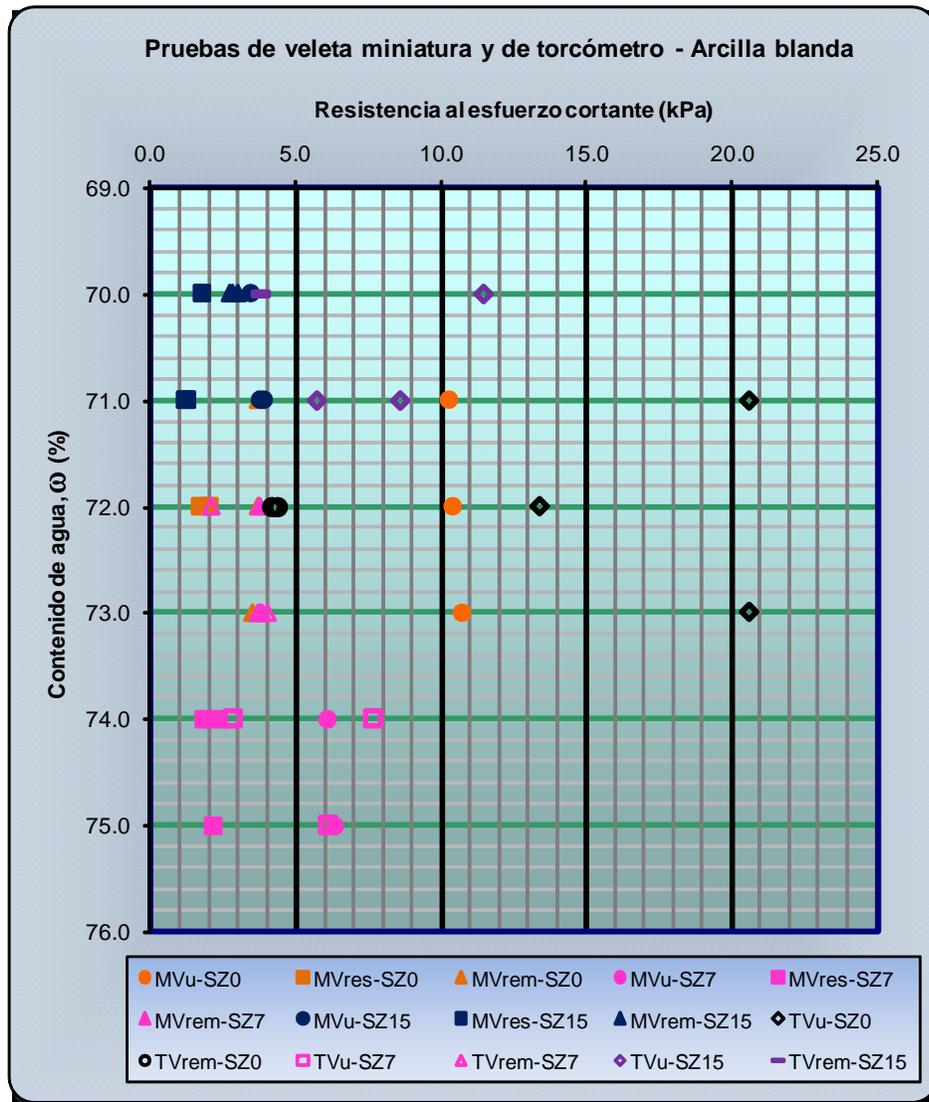


Figura IV.27. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En el caso de la resistencia residual al esfuerzo cortante, se observa que esta no varía significativamente con el contenido de gas metano, Figura IV.28; siendo ligeramente mayor para la arcilla con gas al 7 por ciento y ligeramente menor para la arcilla con gas al 15 por ciento, comparándolas con la arcilla sin gas. Se asume que la mayor resistencia de la arcilla con gas metano al 7 por ciento, es debido a que el gas interactúa con la arcilla y opone resistencia al

torque, aunado a que por la poca cantidad de gas, este está mejor confinado por la arcilla y, por lo tanto, forma parte de la estructura; mientras que en la arcilla con gas al 15 por ciento, se generan mayores concavidades de gas, obteniéndose una estructura más débil. Este comportamiento indica que las fuerzas de interacción entre las láminas de arcilla son menores para la arcilla blanda con mayor contenido de gas.

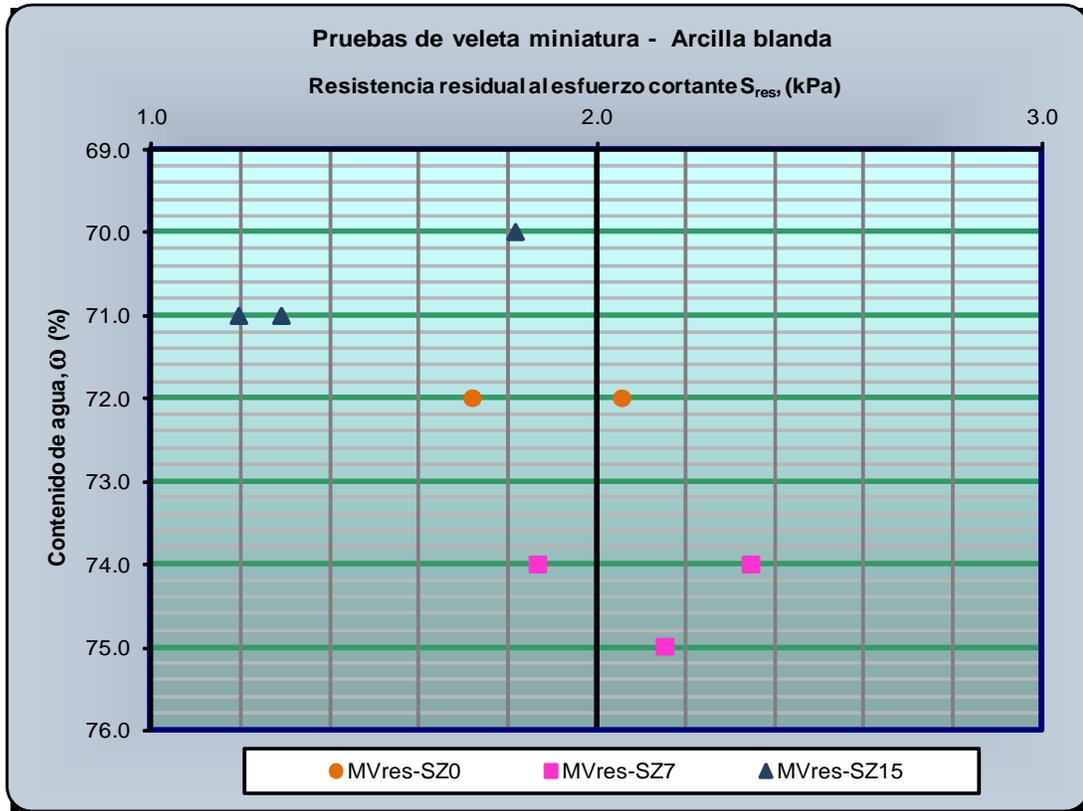


Figura IV.28. Resistencia residual al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En lo que respecta a la resistencia remoldeada al esfuerzo cortante, Figura 29, se observa que esta es, prácticamente, la misma para la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento y ligeramente menor para la arcilla con gas al 15 por ciento. También se observa que la resistencia remoldeada al esfuerzo cortante obtenida con las pruebas de torcómetro es prácticamente la misma. En términos generales, la resistencia remoldeada al esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas al 7 por ciento se reduce en un 26 por ciento cuando la arcilla contiene el 15 por ciento de gas metano, siendo la diferencia de aproximadamente 1.0 kPa.

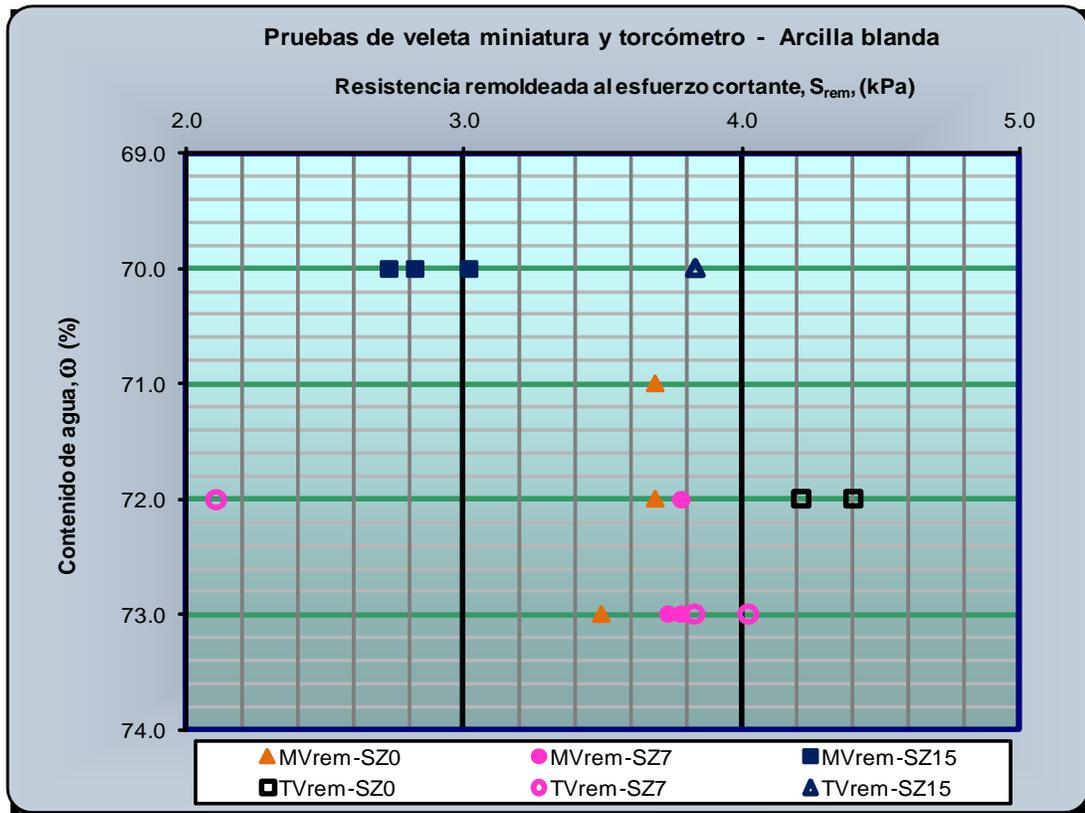


Figura IV.29. Resistencia remoldeada al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

Analizando la Figura IV.27 y la Tabla IV.3 se observa que los valores de la resistencia inalterada al esfuerzo cortante de la arcilla con gas metano al 15 por ciento, son similares a la resistencia remoldeada de la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, Figura IV.30.

Los valores del contenido de agua obtenidos en estas pruebas se presentan en el Apéndice B, y debido a que estos no varían significativamente entre las muestras de arcilla sin y con gas metano, se utilizan para graficar los valores de resistencia al esfuerzo cortante, como se presenta en las Figuras IV.27 a IV.29.

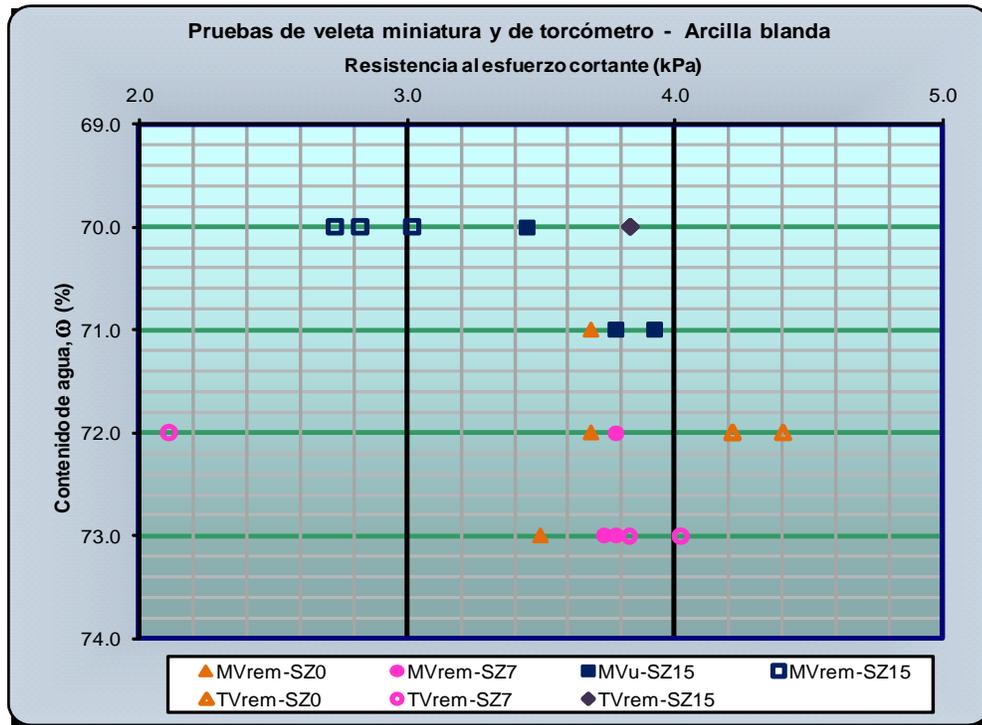


Figura IV.30. Resistencia residual y remoldeada al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

IV.2.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano

Los valores obtenidos de las pruebas de torcómetro y de veleta miniatura para medir la resistencia al esfuerzo cortante, correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano se presentan en la Tabla IV.4a y Tabla IV.4b, respectivamente.

Tabla IV.4a. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media sin gas metano.

Resistencia al esfuerzo cortante				
Veleta miniatura (MV) – Torcómetro (TV)				
Arcilla media	Número de muestra	Inalterada S_u , (kPa)	Residual $S_{u,res}$, (kPa)	Remoldeada $S_{u,rem}$, (kPa)
sin gas metano (FZ0)	MVFZ0-6	39.41	10.49	16.61
	TVFZ0-6	40.22		18.19
	MVFZ0-7	38.54	12.69	16.18
	TVFZ0-7	38.30		18.19
	MVFZ0-5	15.32	4.84	12.50
	TVFZ0-5	28.73		14.36



Tabla IV.4b. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media con gas metano.

Resistencia al esfuerzo cortante				
Veleta miniatura (MV) – Torcómetro (TV)				
Arcilla media	Número de muestra	Inalterada S_u (kPa)	Residual $S_{u,res}$ (kPa)	Remoldeada $S_{u,rem}$ (kPa)
con gas metano al 7 por ciento (FZ7)	MVFZ7-5	6.56	2.30	3.59
	TVFZ7-5	8.62		3.83
	MVFZ7-8	6.18	2.20	3.78
	TVFZ7-8	7.66		3.83
	MVFZ7-4	6.03	2.30	3.78
	TVFZ7-4	7.66		3.83
con gas metano al 15 por ciento (FZ15)	MVFZ15-6	18.53	3.02	8.71
	TVFZ15-6	7.66		4.79
	MVFZ15-7	17.57	3.83	8.76
	TVFZ15-7	7.18		4.88
	MVFZ15-8	17.14	3.45	8.19
	TVFZ15-8	7.18		4.79

Considerando la mayor y menor resistencia inalterada al esfuerzo cortante en la arcilla con gas metano, para propósitos de comparación, se obtiene una reducción del esfuerzo cortante de aproximadamente 84 y 55 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Mientras que los resultados obtenidos con las pruebas de torcómetro son prácticamente los mismos en la arcilla con gas metano, pero menores en aproximadamente 81 por ciento que los de la arcilla con gas.

En la Tabla IV.4b y Figura IV.31 se observa que la arcilla media con gas al 15 por ciento desarrolló mayor resistencia al esfuerzo cortante que la arcilla media con gas al 7 por ciento; es decir la resistencia inalterada de la arcilla con gas al 15 por ciento se incrementa en un 183 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento; esta diferencia es similar a las variaciones encontradas en las pruebas de consolidación a deformación constante. Se asume que este comportamiento es debido a que los vacíos están completamente llenos de gas metano y por lo tanto existe mayor presión en ellos a mayor cantidad de gas, es decir, la estructura (compuesta por

la arcilla, el agua de poro y el gas metano) opone mayor resistencia a medida que la arcilla media contiene mayor cantidad de gas.

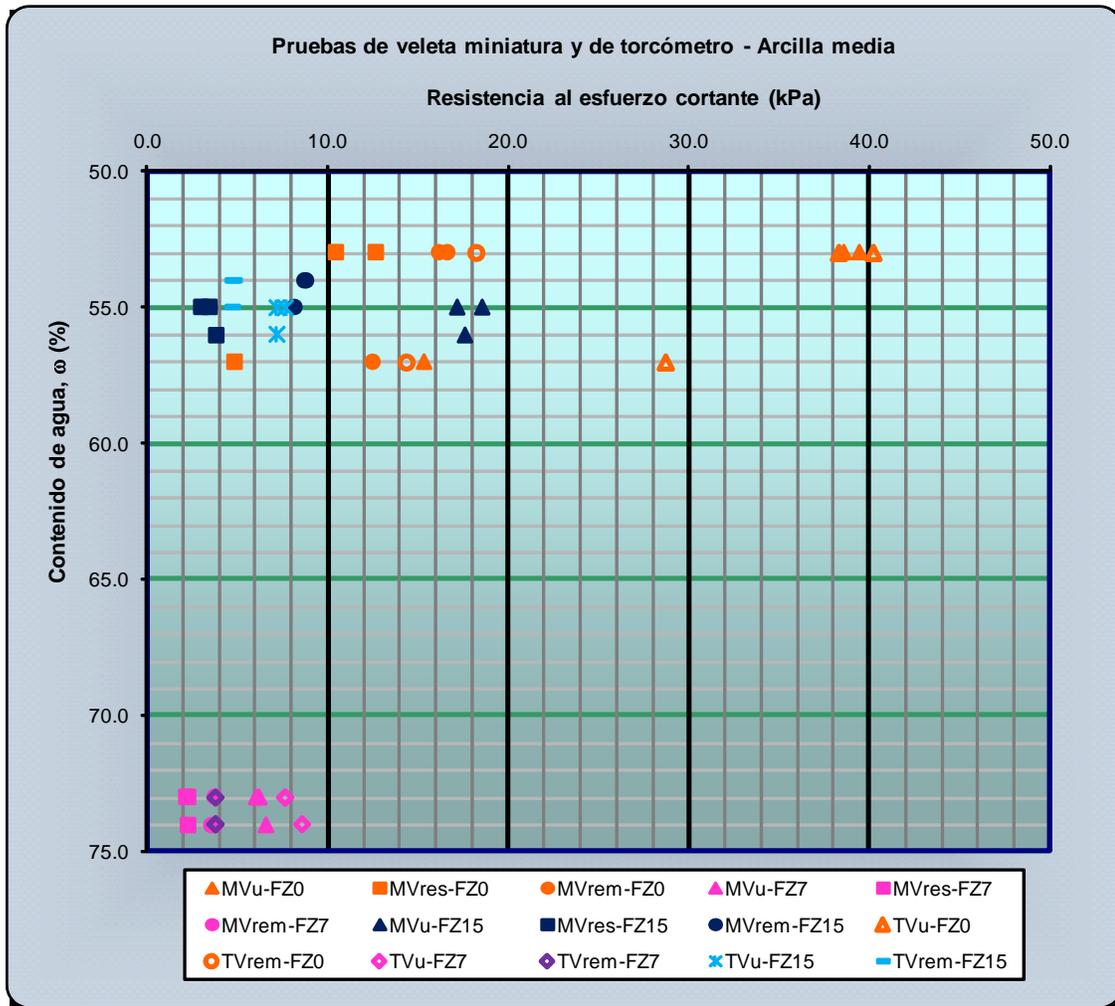


Figura IV.31. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.

En cuanto a la resistencia residual al esfuerzo cortante (Figura 32 y Tabla IV.3), se observa que la obtenida para la arcilla con gas metano es menor que la de la arcilla sin gas; la reducción equivale aproximadamente al 81 y 69 por ciento, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Mientras que la reducción de la resistencia residual de la arcilla con gas al 7 por ciento equivale aproximadamente al 40 por ciento, con respecto a arcilla con gas al 15 por ciento. Se asume que la mayor resistencia residual en la arcilla con mayor contenido de gas metano es debido a que el gas forma parte de la arcilla y se mantiene dentro de la estructura del suelo, aun cuando ésta ha alcanzado su máxima resistencia inalterada al esfuerzo cortante; mientras que en el caso de la arcilla con gas al 7 por ciento, el gas esta esparcido en la estructura y forma burbujas



de gas aisladas del resto, por lo tanto, no llena todos los poros existentes dentro de la estructura de la arcilla, generando zonas o áreas débiles en la arcilla y la nueva estructura no es capaz de contrarrestar el torque generado por la veleta miniatura.

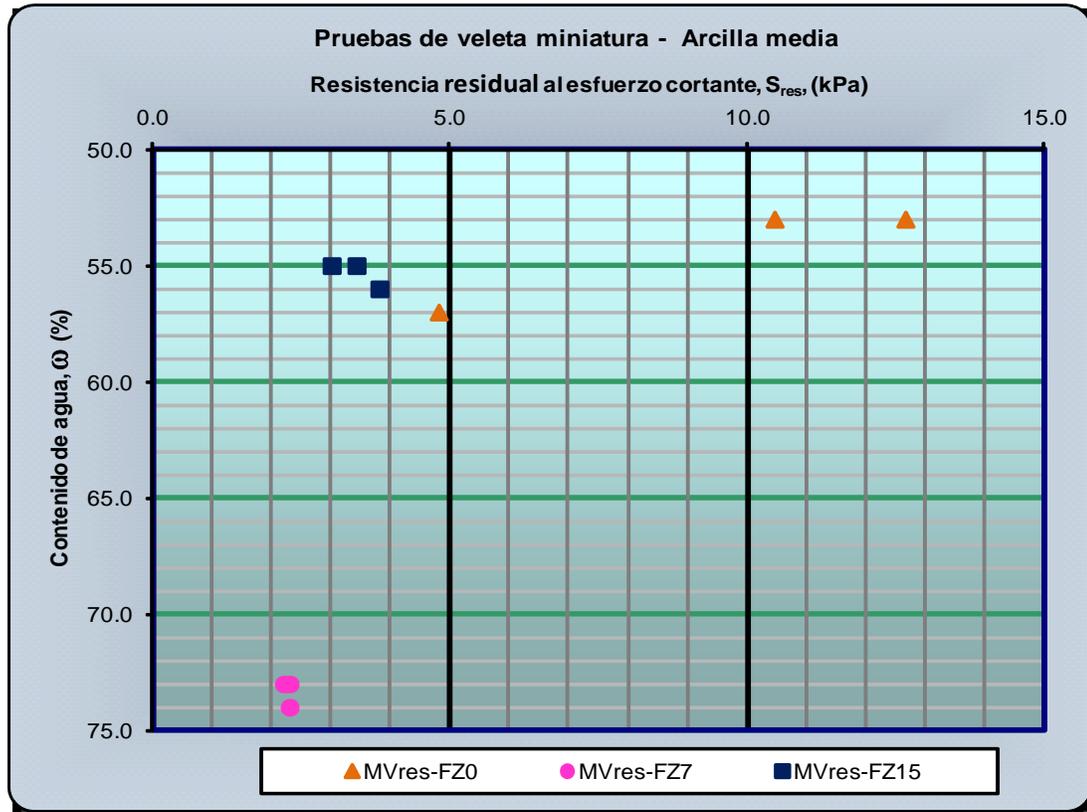


Figura IV.32. Resistencia residual al esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.

En la Figura 33 se presentan los resultados de la resistencia remoldeada al esfuerzo cortante y se observa que disminuye cuando contiene gas metano; mientras que la resistencia remoldeada es mayor para la arcilla con gas al 15 por ciento que para la arcilla con gas al 7 por ciento. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 77 y 48 por ciento de menor resistencia remoldeada al esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia obtenida para la arcilla con gas al 7 por ciento, equivale a una menor resistencia remoldeada de aproximadamente 56 por ciento, con respecto a la arcilla con mayor contenido de gas.

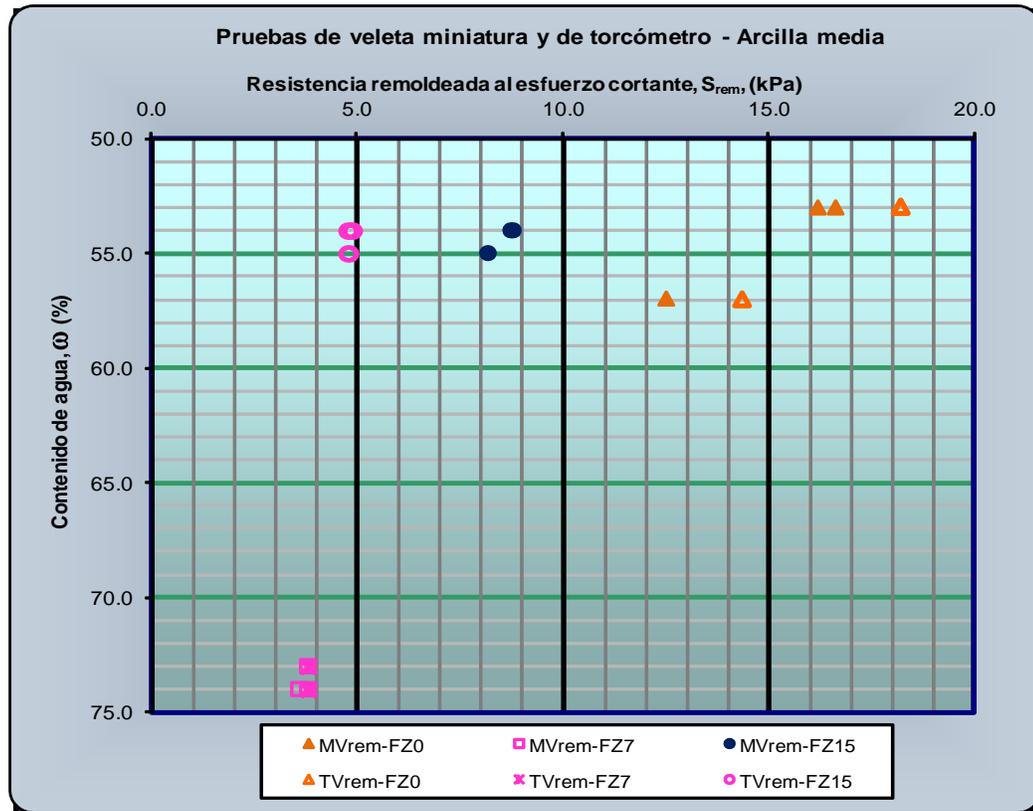


Figura IV.33. Resistencia remoldeada al esfuerzo cortante de la arcilla media.

En la Figura 34 se presenta una combinación de los valores obtenidos de la resistencia al esfuerzo cortante y se observa que los valores de la resistencia inalterada de la arcilla con gas al 15 por ciento, son similares a los de la resistencia remoldeada de la arcilla sin gas; asimismo, se observa que los valores residuales de la arcilla con gas al 15 por ciento son del mismo orden que los remoldeados de la arcilla con gas al 7 por ciento, mientras que los valores remoldeados (arcilla con gas al 15 por ciento) son del mismo orden que los valores de la resistencia inalterada de la arcilla con gas al 7 por ciento.

Los valores obtenidos de los límites de Atterberg y del contenido de agua se presentan en el Apéndice B. En las Figuras IV.31 a IV.34 se observa que el contenido de agua para la arcilla con gas al 7 por ciento son mayores que para la arcilla sin y con gas al 15 por ciento.

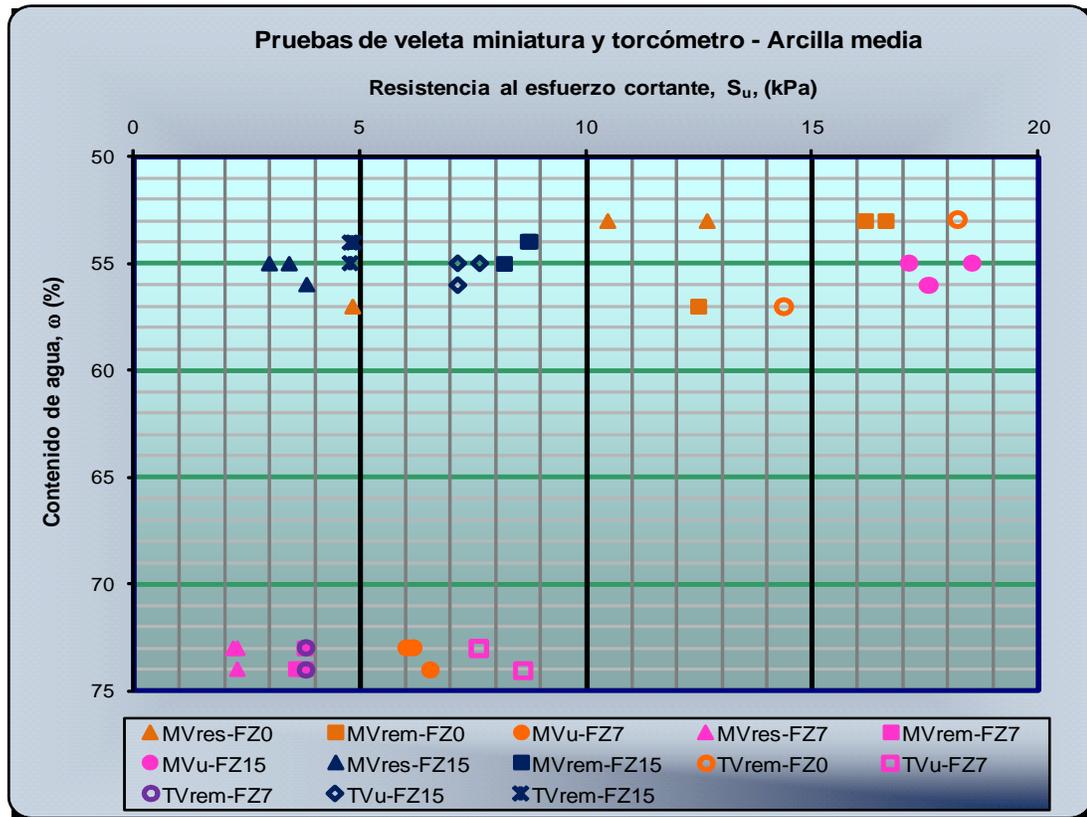


Figura IV.34 Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.



IV.3. Pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas, con medición de presión de poro

Las pruebas triaxiales se han empleado para estudiar el comportamiento de los suelos parcialmente saturados o no saturados al esfuerzo cortante (Gibbs, et al., 1960; Bishop y Bjerrum, 1960; Bishop, et al. 1960; Bishop y Henkel, 1962; Bishop y Bligh, 1963; Bligh, 1967; Wheeler y Sivakumar, 1995; Maâtouk, et al., 1995; Blatz y Graham, 2003; Cunningham, et al, 2003) y algunos de esos estudios se han empleado como referencia para estudiar el comportamiento al esfuerzo cortante de los suelos conteniendo gas (Esrig, et al., 1977; Whelan, 1979; Nageswaran, 1983; Wheeler, 1986; Rau y Chaney, 1988; Sills, et al., 1991), pero en estos últimos estudios se ha considera muy poco a las arcillas marinas, aunque se ha utilizado esta en combinación con alguno otro suelo.

Posiblemente los programas de pruebas triaxiales consolidadas no drenadas realizadas en muestras de suelo limo arcillosos con gas metano (Nageswaran, op. cit.; Wheeler, op. cit.) han permitido entender, hasta cierto punto, el comportamiento al esfuerzo cortante de los suelos finos; un resumen de los hallazgos es:

- a. Nageswaran (op. cit.) efectuó una serie de pruebas triaxiales y encontró que el suelo limo arcilloso con gas metano falló a un esfuerzo desviador menor que la muestra sin gas, pero con una presión de poro similar y menor que el esfuerzo desviador en ambas muestras; sin embargo el modulo al corte (el gradiente de las curvas esfuerzo-deformación) es menos afectado por la presencia de las burbujas de gas en el suelo.
- b. Wheeler (op. cit.) encontró que la resistencia al esfuerzo cortante se incrementa o disminuye con la presencia del gas y depende de los valores de los esfuerzos laterales totales (σ_3) y de los esfuerzos operativos al inicio del corte ($\sigma_3 - u_{w0}$), además encontró que a medida que la burbuja de gas se llena con agua, generado por las presiones de consolidación inducidas, se incrementa la resistencia al esfuerzo cortante. Además encontró que la máxima presión de poro medida no fue mayor al esfuerzo desviador (tal como en la investigación realizada por Nageswaran, op. cit.); mientras que el modulo al corte no drenado se reduce con la presencia del gas, a medida que se reduce la saturación de la muestra.

La variación de la resistencia encontrada por Wheeler, op. cit., aparentemente, está relacionada con la consistencia del suelo, ya que las muestras utilizadas fueron consolidadas a diferentes presiones y, por lo tanto, encontró variaciones en la resistencia al esfuerzo cortante. Se



asume con base a los resultados previos de este estudio, que la variación de la resistencia al esfuerzo cortante medida por Wheeler, op. cit., indica que los suelos finos (arcilla limosa) presentan diferente comportamiento a diferente consistencia, tal como se deduce de los Capítulos III y IV de este estudio.

Para este estudio se realizaron pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas con medición de poro; este ensaye se desarrolló como una prueba triaxial rápida común, con la alternativa de medir la presión de poro desarrollada durante el ensaye. Las pruebas triaxiales para la arcilla blanda y media sin y con gas metano siguieron las recomendaciones D2850-95e1 emitidas por la ASTM, los detalles y resultados adicionales obtenidos durante el ensaye se presentan en el Apéndice C.

IV.3.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano

Los resultados obtenidos a la falla de las pruebas triaxiales rápidas con medición de presión de poro (UUu_w y UUu_{wg} , por sus siglas en inglés; el término u_{wg} indica la presión del agua de poro y la presión del gas metano) se presentan en la Tabla IV.5 y se muestran gráficamente en las Figuras IV.35 y IV.36.

Tabla IV.5. Resultados de las pruebas triaxiales UUu_w y UUu_{wg}
Arcilla blanda sin y con gas metano.

Arcilla blanda	Número de Muestra	Resistencia inalterada, (S_u) (kPa)	Presión de poro, (u_{wg}) (kPa)	Máxima presión de poro (kPa)
sin gas metano (SZ0)	UUSZ0-S4	11.01	24.37	30.40
	UUSZ0-S7	7.85	25.38	36.72
con gas metano al 7 por ciento (SZ7)	UUSZ7-S3	9.29	31.22	40.99
	UUSZ7-S4	6.70	28.25	37.25
	UUSZ7-S5	9.10	29.73	39.36
con gas metano al 15 por ciento (SZ15)	UUSZ15-S3	6.22	2.01	3.45
	UUSZ15-S4	5.70	4.88	7.47
	UUSZ15-S5	6.42	2.01	1.20

En los resultados obtenidos de la resistencia al esfuerzo cortante, Tabla IV.5 y Figura IV.35 se observa que la arcilla con gas al 7 por ciento presenta resultados muy cercanos o intermedios a los de la arcilla sin gas. La variación obtenida de la resistencia al esfuerzo cortante fue de aproximadamente 16 y 43 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente,

con respecto a la arcilla sin gas. En cambio la diferencia obtenida entre la arcilla con gas al 15 por ciento es de aproximadamente 31 por ciento de menor resistencia, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

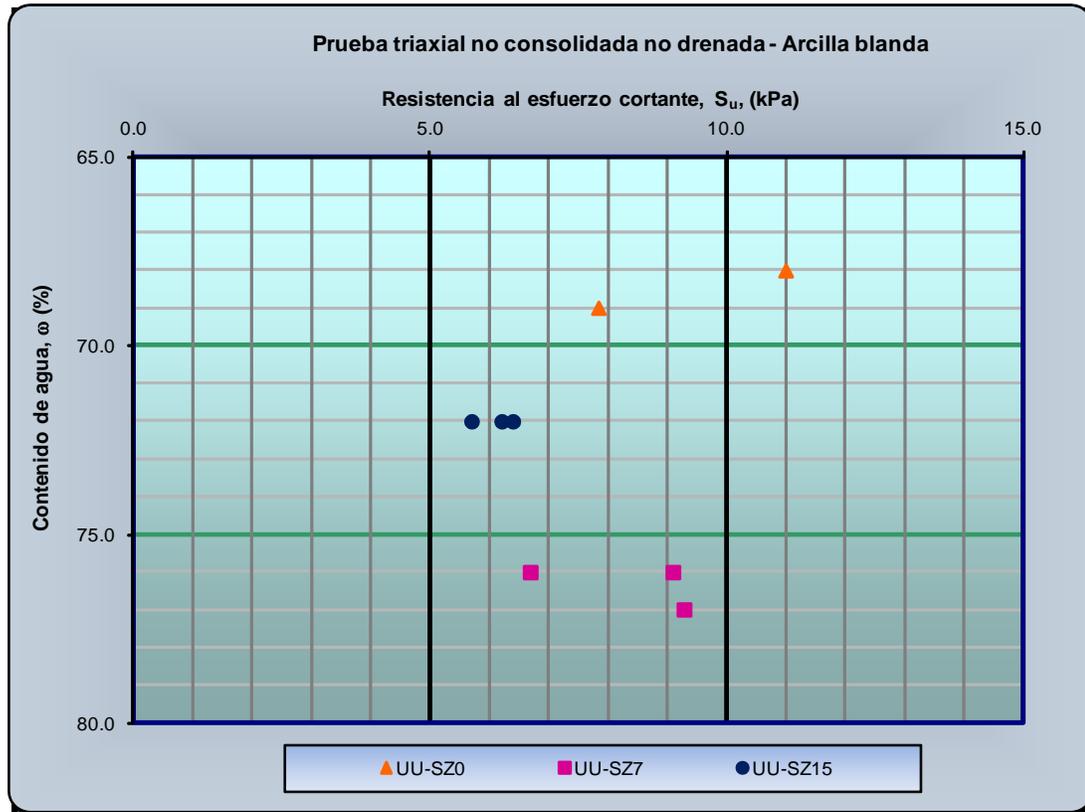


Figura IV.35. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En cuanto a la presión de poro obtenida en la Tabla IV.5 y Figura IV.36, se observa que la mayor presión de poro desarrollada corresponde a la arcilla con gas metano al 7 por ciento. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 23 por ciento de mayor presión de poro para la arcilla con gas al 7 por ciento y de aproximadamente 86 por ciento de menor presión de poro para la arcilla con gas al 15 por ciento, ambas comparaciones con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la presión de poro para la arcilla con gas al 15 por ciento la diferencia equivale al 89 por ciento de menor presión de poro, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento. Resultados similares se obtuvieron para la máxima presión de poro desarrollada durante el ensaye.

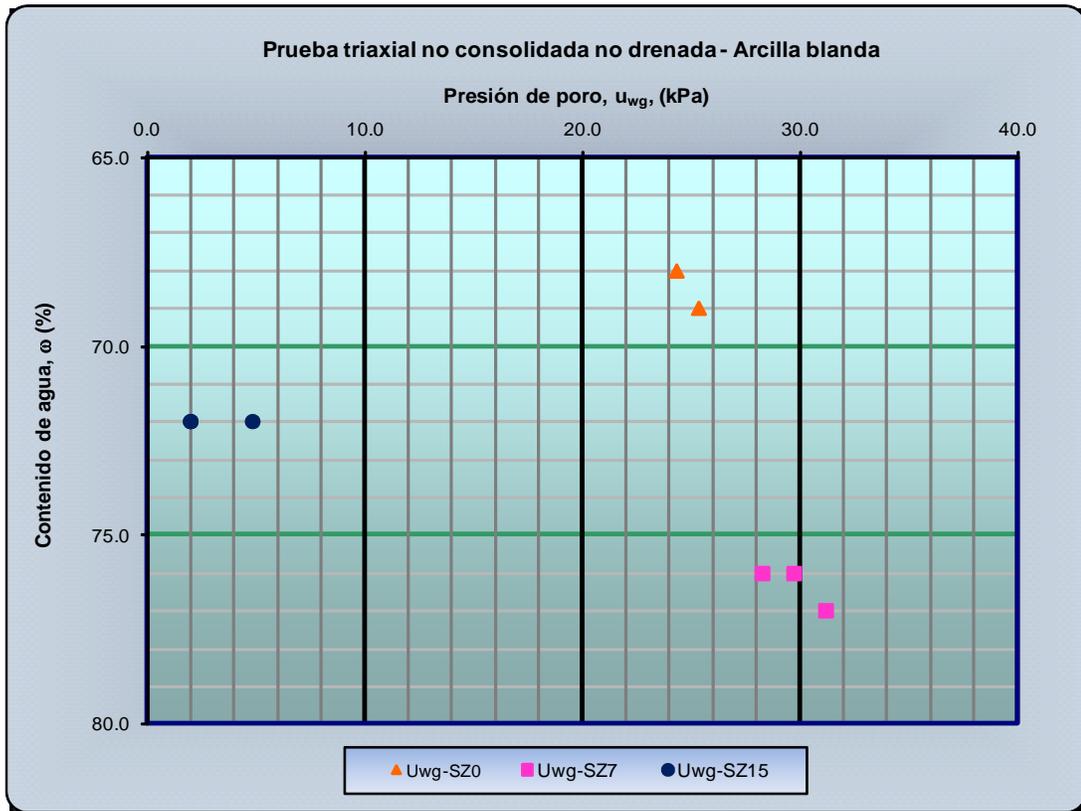


Figura IV.36. Presión de poro de la arcilla blanda sin y con gas metano.

El comportamiento presentado por la arcilla con gas metano posiblemente se debe a que los vacíos con gas generan planos de falla «artificiales», es por ello que la resistencia al esfuerzo cortante inalterada se reduce y, por lo tanto, a mayor contenido de gas se generan mayores planos de falla, resultando en una mayor reducción de la resistencia al esfuerzo cortante y es que esta depende de que tanto «estén entrelazadas... las laminas de arcilla... ya que cualquier movimiento relativo depende de la falla de los cristales de la estructura, pasando de la fase adsorbida a los materiales cristalinos de la estructura», Foster, 1971.

En cuanto a la presión de poro desarrollada se discierne que es mayor en la arcilla blanda con menor contenido de gas metano debido a que las láminas de arcilla proporcionan mejor confinamiento a menor cantidad de gas, debido al mejor reacomodo de la estructura con gas ante la carga actuante, por lo que la falla no ocurre tan rápidamente como en la arcilla con mayor contenido de gas, lo que no permite que se desarrollen mayores presiones de poro en esta última y es que durante el reacomodo de la estructura de la arcilla blanda se genera un... «*incremento neto de las fuerzas de atracción entre las partículas, por lo que se produce un incremento en la resistencia al esfuerzo cortante (Lambe, 1958)*», Leonards y Andersland, 1960.



Otro resultado interesante es el hecho de que, Tabla IV.5, la presión de poro a la falla es mayor que la resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento. Más sin embargo, en la arcilla con gas al 15 por ciento, la presión de poro desarrollada es menor que la resistencia al esfuerzo cortante. Los primeros resultados difieren un poco de lo encontrado por Nageswaran (op. cit.) y Wheeler (op. cit.), la diferencia se atribuye a que ellos emplearon muestras de arcilla limosa, lo que genera una estructura con vacíos más grandes y con mayor permeabilidad que los de una arcilla y es que la «*velocidad de disipación de la presión de poro depende de la permeabilidad del suelo*», Bishop y Henkel, op. cit.

IV.3.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano

Las resultados obtenidos a la falla de las pruebas triaxiales rápidas con medición de la presión de poro (UU_{uw} y UU_{uwg}) se presentan en la Tabla IV.6 y se muestran gráficamente en la Figura IV.37 y IV. 38.

Tabla IV.6. Resultados de las pruebas triaxiales UU_{uw} y UU_{uwg}
Arcilla media sin y con gas metano.

Arcilla media	Número de Muestra	Resistencia Inalterada, (S_u) (kPa)	Presión de poro (u_{wg}) (kPa)	Máxima presión de poro (kPa)
sin gas metano (FZ0)	UUFZ0-S2	37.16	120.18	139.81
	UUFZ0-S3	36.34	97.82	112.09
	UUFZ0-S4	29.49	99.40	114.82
con gas metano al 7 por ciento (FZ7)	UUFZ7-S6	11.49	47.74	71.29
	UUFZ7-S9	11.92	91.64	114.05
	UUFZ7-S10	12.35	72.01	83.89
con gas metano al 15 por ciento (FZ15)	UUFZ15-S3	27.77	62.15	79.29
	UUFZ15-S4	26.33	105.29	109.89
	UUFZ15-S5	26.81	85.85	95.33

En los resultados obtenidos de la resistencia al esfuerzo cortante, Tabla IV.6 y Figura IV.37, se observa que los resultados obtenidos para la arcilla con gas al 15 por ciento son los más cercanos a la arcilla sin gas. La variación obtenida de la resistencia al esfuerzo cortante fue de aproximadamente el 67 y 30 por ciento de menor resistencia inalterada para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la diferencia obtenida en la arcilla con gas metano es de aproximadamente el 53 por ciento de menor resistencia al esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

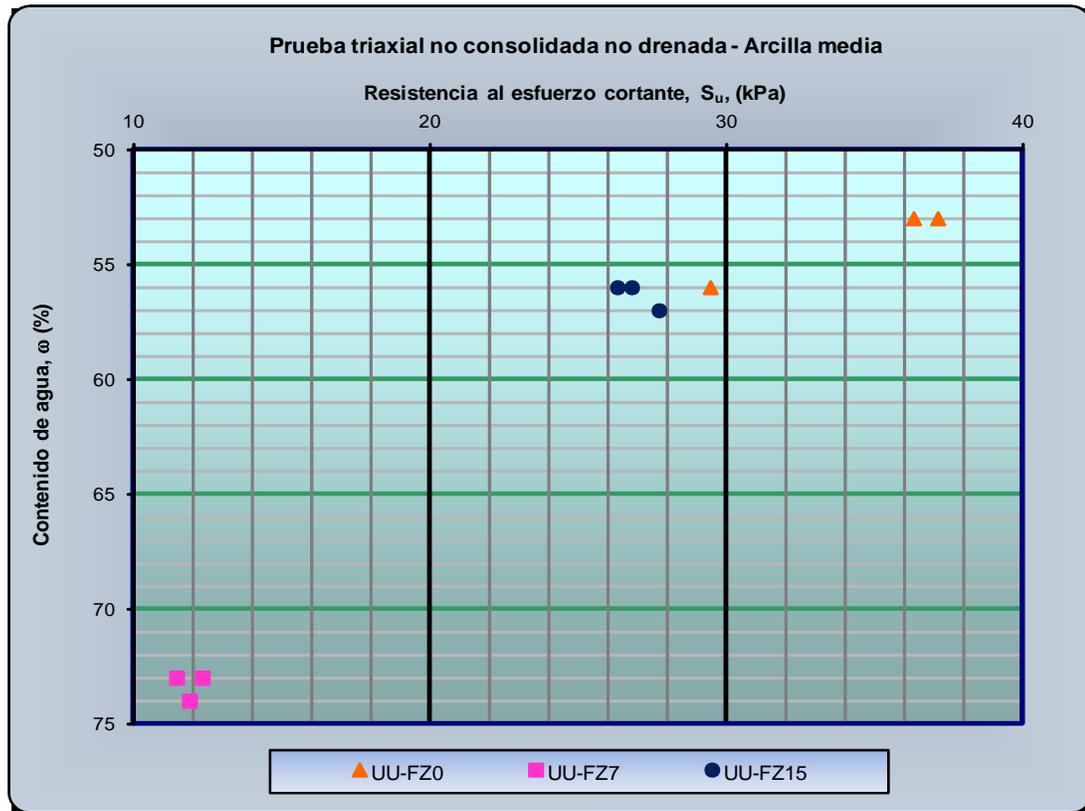


Figura IV.37. Resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.

El comportamiento presentado por la arcilla media con gas indica que los planos «artificiales» de falla son más débiles a menor contenido de gas y se asocia a que los vacíos no están completamente llenos con gas metano, generando que la falla ocurra rápidamente; mientras que a mayor cantidad de gas los vacíos, innegablemente, tendrán mayor cantidad de gas metano, lo que permite que este interactúe con la arcilla para soportar la carga inducida, generando planos más rígidos de falla y, por lo tanto, la falla no ocurre tan rápidamente y es que los «*esfuerzos normales totales... son soportados... por las partículas sólidas y la presión del fluido en los vacíos*», Bishop et. al., 1960, por lo que, la nueva estructura genera una reacción en sentido contrario al de la carga aplicada.

En cuanto a la presión de poro se observa, Tabla IV y Figura IV.38, que la obtenida por la arcilla con gas es, en términos generales, menor que la de la arcilla sin gas, aunque los resultados son un tanto cuanto erráticos para todas las muestras de arcilla con gas. Se considera que la arcilla sin gas tiene en promedio una presión de poro de 98.61 kPa, descartando la mayor. En el caso de la arcilla con gas al 7 por ciento se considera que la arcilla tiene en promedio 81.83 kPa, descartando la menor; mientras que la arcilla con gas al 15 por ciento tiene en promedio 95.57 kPa,

descartando la menor (o 74.00 kPa si se descarta la mayor). Con base a estos promedios, la diferencia obtenida equivale aproximadamente al 17 y 3 por ciento de menor presión de poro para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, con respecto a la arcilla sin gas metano. La misma tendencia se presenta para la presión de poro máxima obtenida durante las pruebas triaxiales rápidas.

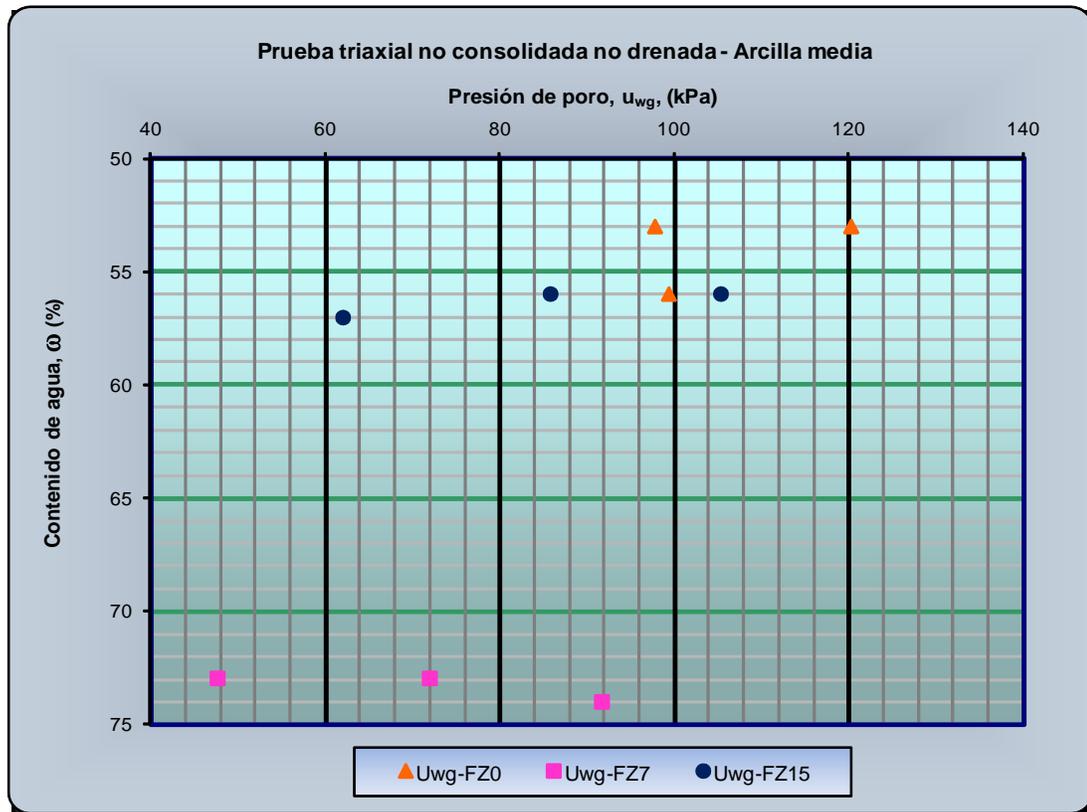


Figura IV.38. Presión de poro de la arcilla media sin y con gas metano.

Un resultado interesante es el hecho de que, Tabla IV.6, la presión de poro a la falla es mayor que la resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, resultados diferentes a los encontrados por Nageswaran (1983) y Wheeler (1986).

IV.4. Pruebas estáticas y rápidas de corte simple directo

El ensaye de corte simple directo (DSS, por sus siglas en inglés), se utiliza en las investigaciones geotécnicas costa fuera para determinar las características esfuerzo-deformación y la resistencia a volumen constante de los suelos marinos, Figura IV.39, pero su aplicación a los suelos no saturados o parcialmente saturados con aire (Escario y Saez, 1986; Gan, et. al. 1988 y Vanapalli, et. al. 1996) ha sido limitada o se ha publicado muy poco al respecto; de igual manera, el uso de esta prueba en suelos marinos conteniendo gas ha sido muy limitada y se desconoce si se han realizado ensayes en arcillas marinas conteniendo gas metano, posiblemente, porque se han realizado muy pocas investigaciones o sus resultados no son públicos.



Figura IV.39. Equipo de corte simple directo.

En este estudio se realizaron pruebas de corte simple directo estáticas (5 por ciento de deformación por hora) y rápidas (100 y 1 000 por ciento de deformación por hora) a muestras de arcilla blanda y media sin y con gas metano, para:

- a. conocer las posibles variaciones de las características esfuerzo-deformación; y
- b. estudiar los efectos de la velocidad de deformación en el comportamiento esfuerzo-deformación de la arcilla sin y con gas metano, comparando los resultados esfuerzo-deformación de las pruebas DSS estáticas y rápidas. Esta comparación es debido a que los efectos de la velocidad de deformación pueden ser significativos para los sismos de



diseño en suelos cohesivos, siempre y cuando los desplazamientos relativos excedan el nivel requerido para iniciar deslizamientos plásticos.

Las pruebas de corte simple directo efectuadas a la arcilla blanda y media sin y con gas metano siguieron las recomendaciones D6528 emitidas por la ASTM y el procedimiento, generalmente, consiste en consolidar la muestra de arcilla hasta la presión de consolidación vertical efectiva final ($\sigma'_{v,c}$), pero excediendo la deformación obtenida por la presión de preconsolidación o hasta obtener el 15 por ciento de deformación vertical en la muestra para asegurar la aplicación de un $OCR = 1.0$, es decir, que la presión de consolidación sea mayor que la presión de preconsolidación. Posteriormente, la arcilla se carga hasta el punto de falla a una velocidad constante de deformación al corte (5, 100 o 1 000 por hora). Durante la carga, no se permite el drenaje del espécimen (volumen constante), esto es posible manteniendo constante la altura de la muestra de arcilla sin y con gas metano. Los detalles y resultados adicionales de los ensayos se presentan en el Apéndice C.

IV.4.1. Análisis de los resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano

IV.4.1.1. Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora

En la Tabla IV.7 se presentan los resultados de consolidación y las características esfuerzo-deformación obtenidos de las pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas metano.

Tabla IV.7. Características esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación						
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	Deformación al corte, γ , (%)	Presión de poro (u_{wg}) (kPa)	Consolidación		Esfuerzo vertical efectivo, σ'_v , (kPa)
				$\sigma'_{v,c}$ (kPa)	$\varepsilon'_{v,c}$ (%)	
DSS_SZ0-S9b	28.63	20.36	45.53	98.20	15.46	52.67
DSS_SZ7-S8b	13.69	14.87	23.32	49.70	9.37	26.38
DSS_SZ15-S2b	26.43	15.60	41.75	98.30	16.29	56.55

Los resultados del esfuerzo cortante a la falla (Tabla IV.7 y Figura IV.40) indican, aparentemente, que la arcilla con gas metano al 15 por ciento es similar a la arcilla sin gas (considerando ese punto en la curva como el esfuerzo cortante máximo la falla del material,



Apéndice C), obteniéndose una diferencia de 2.20 kPa. Las diferencias obtenidas son de aproximadamente el 52 y 8 por ciento de menor resistencia al esfuerzo cortante, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la diferencia obtenida en la arcilla con gas, es menor en aproximadamente 48 por ciento para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

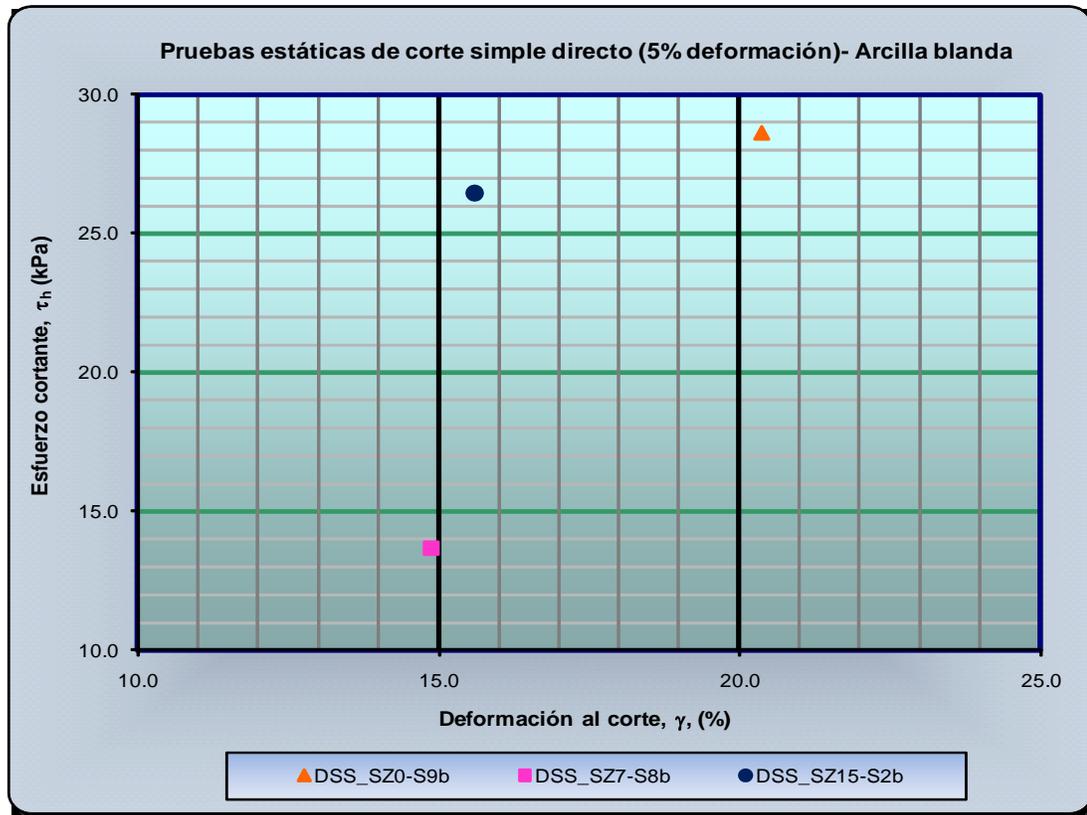


Figura IV.40. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

Resultados similares a los del esfuerzo cortante se obtuvieron para la deformación al corte y para la presión de poro. En el caso de los resultados obtenidos a la falla para la deformación al corte, los correspondientes a la arcilla con gas son, prácticamente, los mismos ya que la diferencia entre ambas muestras es de 0.73 por ciento de deformación al corte. La diferencia obtenida es de aproximadamente 25 por ciento de menor deformación al corte, para la arcilla con gas metano, con respecto a la arcilla sin gas.

En cuanto a la presión de poro se observa (Tabla IV.7) que disminuye conforme disminuye la cantidad de gas en la arcilla. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 49 y 8 por ciento de menor presión de poro, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas metano, la diferencia obtenida es del 44



por ciento de menor presión de poro para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.7 también se observa que el esfuerzo vertical obtenido a la falla disminuye conforme disminuye el contenido de gas metano en la arcilla. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 50 por ciento de menor esfuerzo vertical efectivo y de 7 por ciento de mayor esfuerzo efectivo, para la arcilla con gas al 15 por ciento, ambas comparaciones con respecto a la arcilla sin gas.

Los resultados anteriores están influenciados por la presión de consolidación, $\sigma'_{v,c}$, empleada para consolidar las muestras de arcilla sin y con gas metano y, por lo tanto, también por la deformación obtenida durante la consolidación de la muestra, por lo que, las diferencias deben considerarse en los resultados de la pruebas, para una mejor apreciación del comportamiento de la arcilla con gas; las diferencias obtenidas se deben a la naturaleza de las muestras y de la prueba, ya que unas muestras de arcilla son mas compresibles que otras.

Para comparar los resultados obtenidos del esfuerzo cortante de los suelos marinos se ha hecho práctica común que los resultados se normalicen con respecto a la presión de consolidación y es que los *«suelos que tienen la misma relación de sobreconsolidación (OCR) muestran el mismo comportamiento de resistencia y de esfuerzo-deformación si los esfuerzos al corte y resistencias son normalizados por los esfuerzos de consolidación»*, Lee, 1985. Con base a esto, en los análisis siguientes (pruebas DSS estáticas y rápidas en la arcilla blanda y media sin y con gas metano) se incluirán resultados sin normalizar y resultados normalizados para apreciar mejor las características esfuerzo-deformación de la arcilla sin y con gas y es que la *«normalización permite una evaluación sistemática de la importancia de la historia de esfuerzos en las propiedades de resistencia y deformación... además... proporciona una metodología para comparar y relacionar las características del comportamiento de diferentes suelos cohesivos (Ladd, et. al. 1977)»*, Lee, Op. Cit.

En la Tabla IV.8 se presentan los valores normalizados obtenidos de las pruebas de corte simple directo estáticas (5 por ciento de deformación por hora), correspondientes a la arcilla sin y con gas metano. Mientras que en la Figura IV.41 se muestran los datos normalizados del esfuerzo cortante a la falla, en cuanto a las curvas normalizadas obtenidas y a los resultados normalizados adicionales se presentan en el Apéndice C.



Tabla IV.8. Características normalizadas esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación normalizadas					
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$	τ_h/σ'_v	Esfuerzo vertical $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	Decremento del esfuerzo vertical, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	Deformación al corte, γ^* , (%)
DSS_SZ0-S9b	0.291	0.543	0.536	0.464	20.36
DSS_SZ7-S8b	0.275	0.518	0.531	0.469	14.87
DSS_SZ15-S2b	0.269	0.467	0.575	0.425	15.60

Nota: el * en la deformación al corte indica que los valores no están normalizados

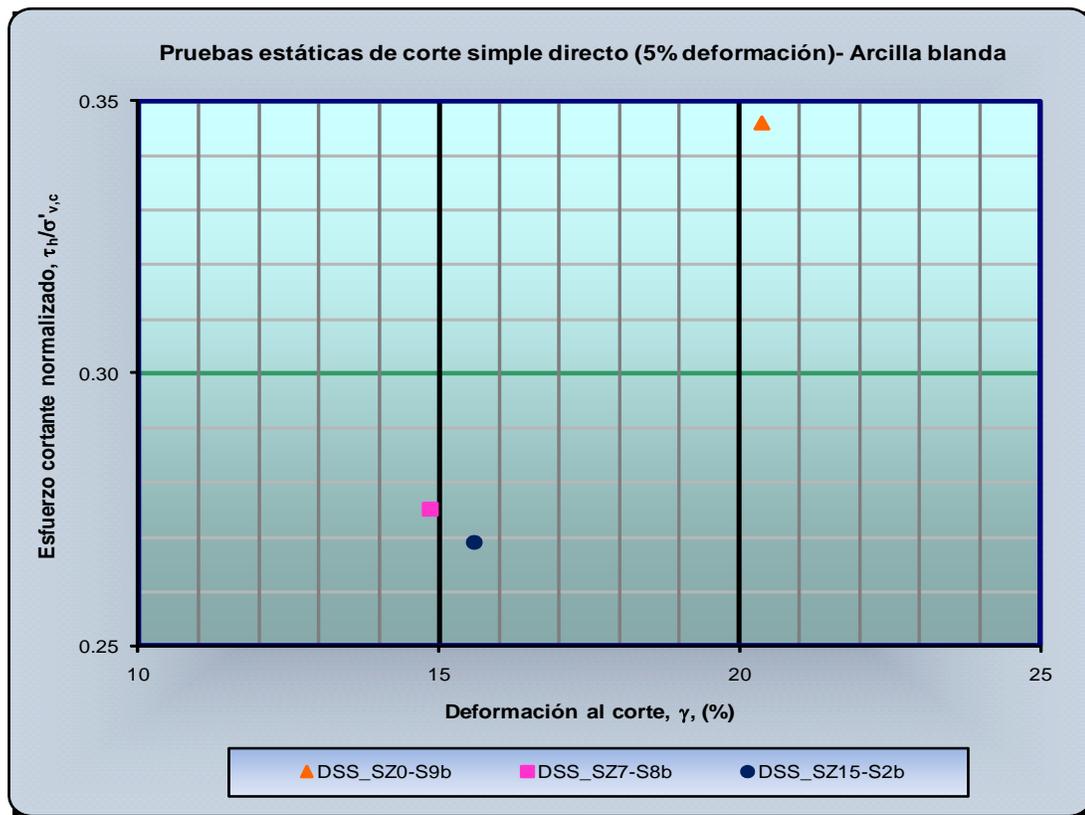


Figura IV.41. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En la Tabla IV.8 y en la Figura IV.41 se observa que el esfuerzo cortante normalizado disminuye conforme aumenta la cantidad de gas metano en la arcilla, como se espera de un suelo conteniendo gas, pero la diferencia del esfuerzo cortante normalizado en la arcilla con gas es mínima. La diferencia obtenida del esfuerzo cortante normalizado con respecto a la arcilla sin gas



es de aproximadamente 5 y 8 por ciento, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia obtenida es del 2 por ciento de menor esfuerzo cortante normalizado, para la arcilla con gas al 15 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

En lo que respecta al esfuerzo vertical normalizado se observa que se incrementa conforme se incrementa la cantidad de gas metano en la arcilla (Tabla IV.8 y Figura IV.42). La diferencia obtenida equivale aproximadamente al uno (1) por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento y del 7 por ciento de mayor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 15 por ciento, ambas comparaciones con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la diferencia obtenida en la arcilla con gas, la diferencia equivale al 8 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

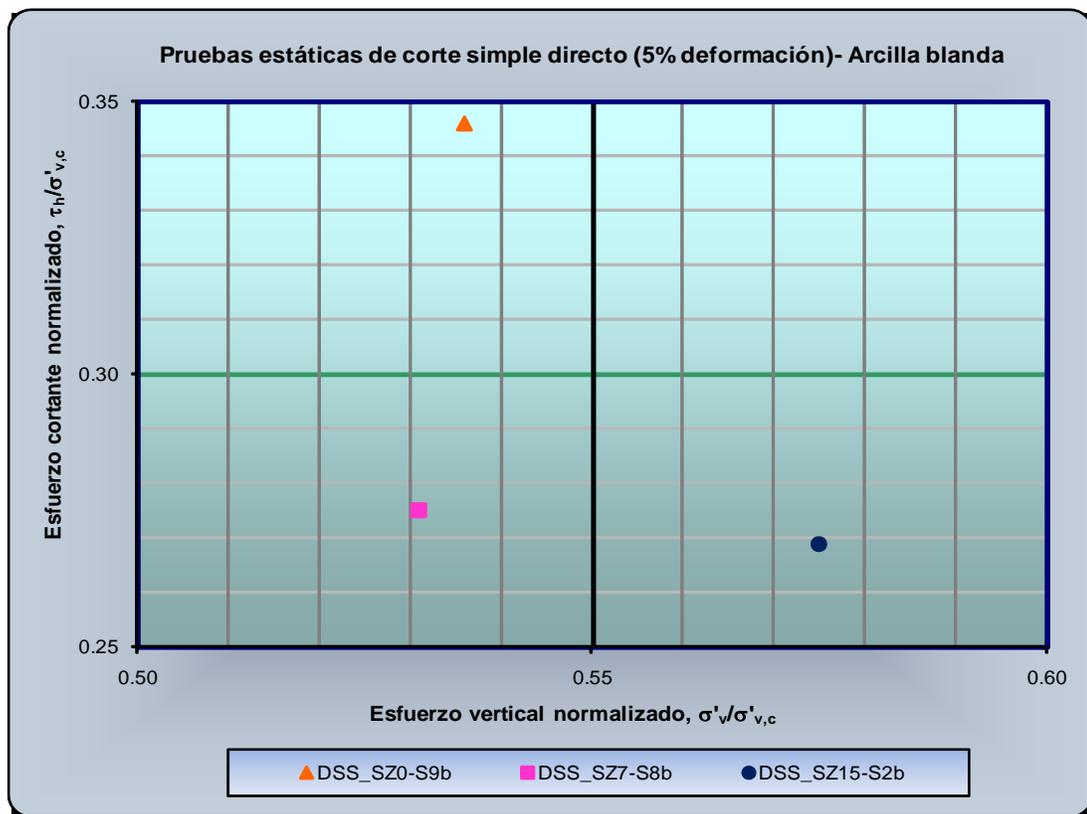


Figura IV.42. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla sin y con gas metano.

En cuanto al decremento del esfuerzo vertical normalizado se observa que es similar en la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento. La diferencia obtenida es de aproximadamente uno (1)



por ciento de mayor decremento del esfuerzo vertical normalizado y de 8 por ciento de menor decremento del esfuerzo vertical normalizado, para la arcilla con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia en la arcilla con gas es de aproximadamente 9 por ciento de menor decremento del esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 15 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

En la Tabla IV.7 se observa que la deformación al corte, γ_h , obtenida es similar en ambas muestras de arcilla con gas (ligeramente mayor en la arcilla con mayor contenido de gas metano), este comportamiento y el mencionado en los párrafos anteriores indican que a mayor cantidad de gas la nueva estructura de la arcilla (arcilla, agua de poro y gas metano) aporta una «resistencia adicional», es decir, que el gas metano amortigua, hasta cierto punto, el esfuerzo cortante inducido, τ_h , al interactuar y reaccionar junto con las partículas de arcilla y el agua de poro, este comportamiento se refleja en la arcilla con gas metano, al obtenerse valores del esfuerzo cortante normalizado similares (Tabla IV.8) entre ambas muestras con gas (diferencia del 2 por ciento).

IV.4.1.2. Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora

En la Tabla IV.9 se presentan los resultados de consolidación y las características esfuerzo-deformación a la falla obtenidos en las pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas metano, mientras que en la Figura IV. 43 se presenta el esfuerzo cortante versus la deformación al corte.

Tabla IV.9. Características esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación						
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	Deformación al corte, γ , (%)	Presión de poro (u_{wg}) (kPa)	Consolidación		Esfuerzo vertical efectivo, σ'_v , (kPa)
				$\sigma'_{v,c}$	$\varepsilon'_{v,c}$	
DSS_SZ0-S9c	33.37	22.14	22.84	98.15	14.96	75.32
DSS_SZ7-S8c	17.38	4.69	10.01	49.84	9.22	39.84
DSS_SZ15-S2c	25.95	6.99	26.67	96.77	16.46	70.14

Los resultados a la falla del esfuerzo cortante indican, aparentemente, que disminuye conforme disminuye la cantidad de gas en la arcilla (Tabla IV.9 y Figura IV.43). La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 48 y 22 por ciento de menor esfuerzo cortante, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que



la diferencia en la arcilla con gas es de aproximadamente 33 por ciento de menor esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

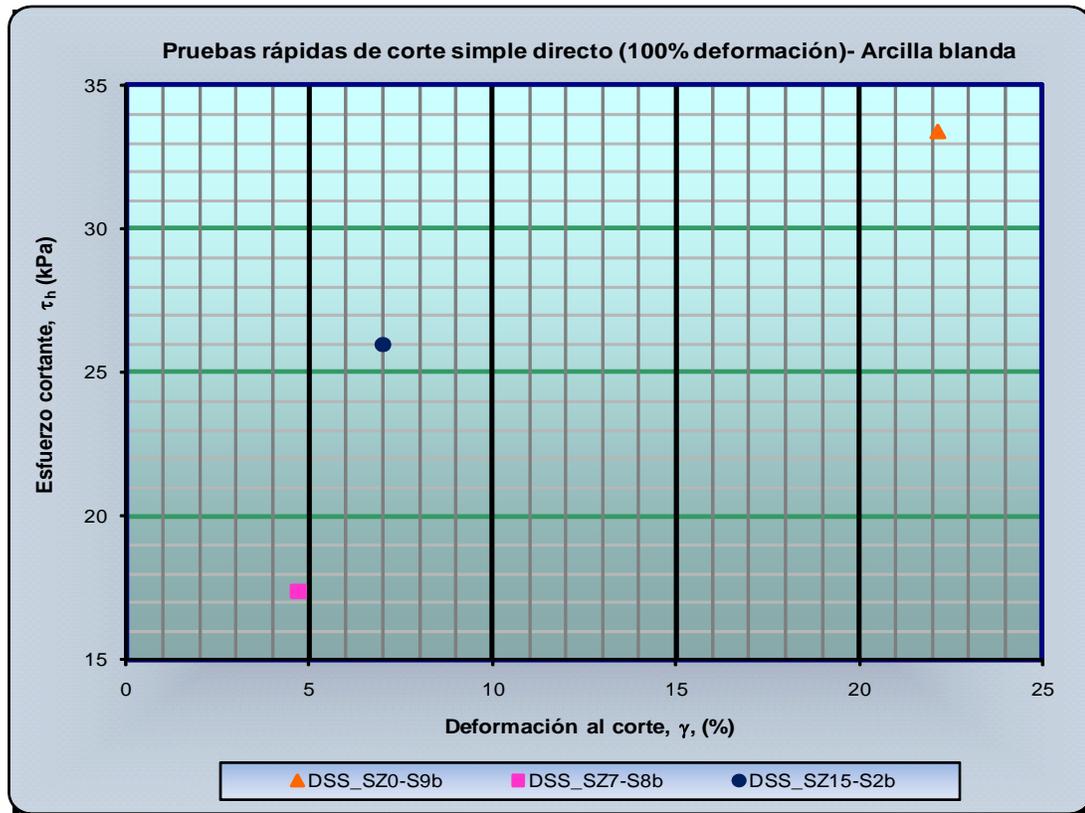


Figura IV.43. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

Variaciones similares al esfuerzo cortante se obtuvieron en los resultados de la presión de poro y la deformación al corte. En el caso de la deformación al corte se obtuvo una reducción significativa en la arcilla con gas, pero siendo ligeramente mayor la obtenida en la de mayor contenido de gas. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 79 y 68 por ciento de menor deformación al corte, para la arcilla sin y con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia obtenida en la arcilla con gas es de aproximadamente 33 por ciento de menor deformación para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con mayor contenido de gas.

En cuanto a la presión de poro, se observa que la arcilla con gas metano al 15 por ciento generó la mayor y la menor corresponde a la arcilla con gas al 7 por ciento. La diferencia obtenida es de aproximadamente 56 por ciento de menor presión de poro y del 17 por ciento de mayor presión de poro, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la



arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas al 7 por ciento se obtuvo una diferencia aproximada del 62 por ciento de menor presión de poro, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.9 también se observa que el esfuerzo vertical obtenido a la falla es mayor en la arcilla sin gas metano y la diferencia obtenida equivale aproximadamente al 47 y 7 por ciento de menor esfuerzo vertical, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano.

En la Tabla IV.10 se presentan los valores normalizados obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 100% de deformación por hora, correspondientes a la arcilla sin y con gas metano (las curvas normalizadas se presentan en el Apéndice C).

Tabla IV.10. Características esfuerzo-deformación normalizadas de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación normalizadas					
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$	τ_h/σ'_v	Esfuerzo vertical $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	Decremento del esfuerzo vertical, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	Deformación al corte, γ^* , (%)
DSS_SZ0-S9b	0.340	0.443	0.767	0.233	22.14
DSS_SZ7-S8b	0.349	0.440	0.799	0.201	4.69
DSS_SZ15-S2b	0.268	0.370	0.725	0.275	6.99

Nota: el * en la deformación al corte indica que los valores no están normalizados

En la Tabla IV.10 y en la Figura IV.44, se observa que el esfuerzo cortante normalizado es prácticamente el mismo en la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 3 por ciento de mayor esfuerzo cortante normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento y de 21 por ciento de menor esfuerzo cortante normalizado para la arcilla con gas al 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas.

Estos resultados sugieren que el gas se ha sobrepresionado dentro de la arcilla debido a la velocidad de deformación, por lo que, interactúa con las láminas de arcilla para contrarrestar el esfuerzo cortante aplicado, a un nivel tal como para generar un esfuerzo cortante normalizado ligeramente mayor en la arcilla con gas al 7 por ciento, al compararlo con el obtenido en la arcilla sin gas; aunado al hecho de que la deformación al corte es mayor en la arcilla sin gas que en la arcilla con gas al 7 por ciento.

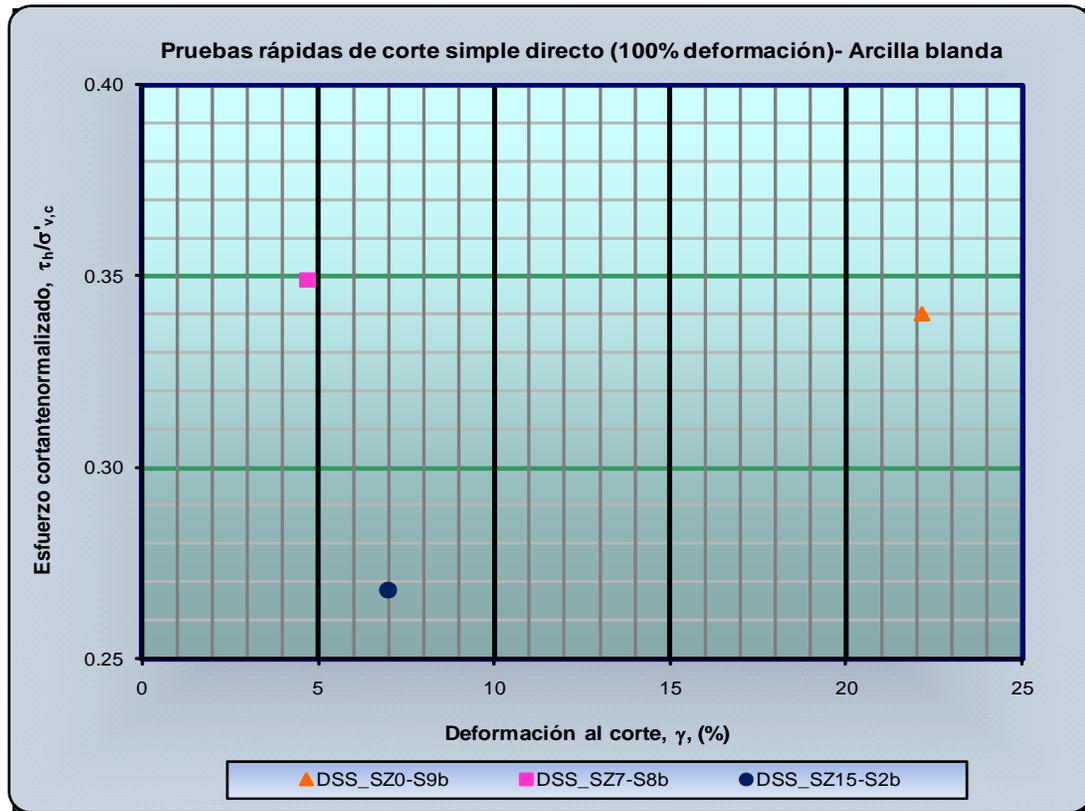


Figura IV.44. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En lo que respecta al esfuerzo vertical normalizado se observa (Tabla IV.10 y Figura IV.45), que el correspondiente a la arcilla con gas metano al 7 por ciento es mayor que para las otras dos muestras de arcilla. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 4 por ciento de mayor esfuerzo vertical normalizado y de 5 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia en la arcilla con gas metano equivale aproximadamente al 9 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 15 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

En cuanto al decremento del esfuerzo vertical normalizado se observa, Tabla IV.10, que el mayor corresponde a la arcilla con gas al 15 por ciento y el menor corresponde a la arcilla con gas al 7 por ciento es el menor; este asume que este comportamiento se presenta porque la estructura de la arcilla con menor cantidad de gas genera una mejor respuesta, debido a que las láminas de arcilla mantienen confinado al gas dentro de su estructura molecular, por su poca cantidad, generando una estructura con mayor rigidez.

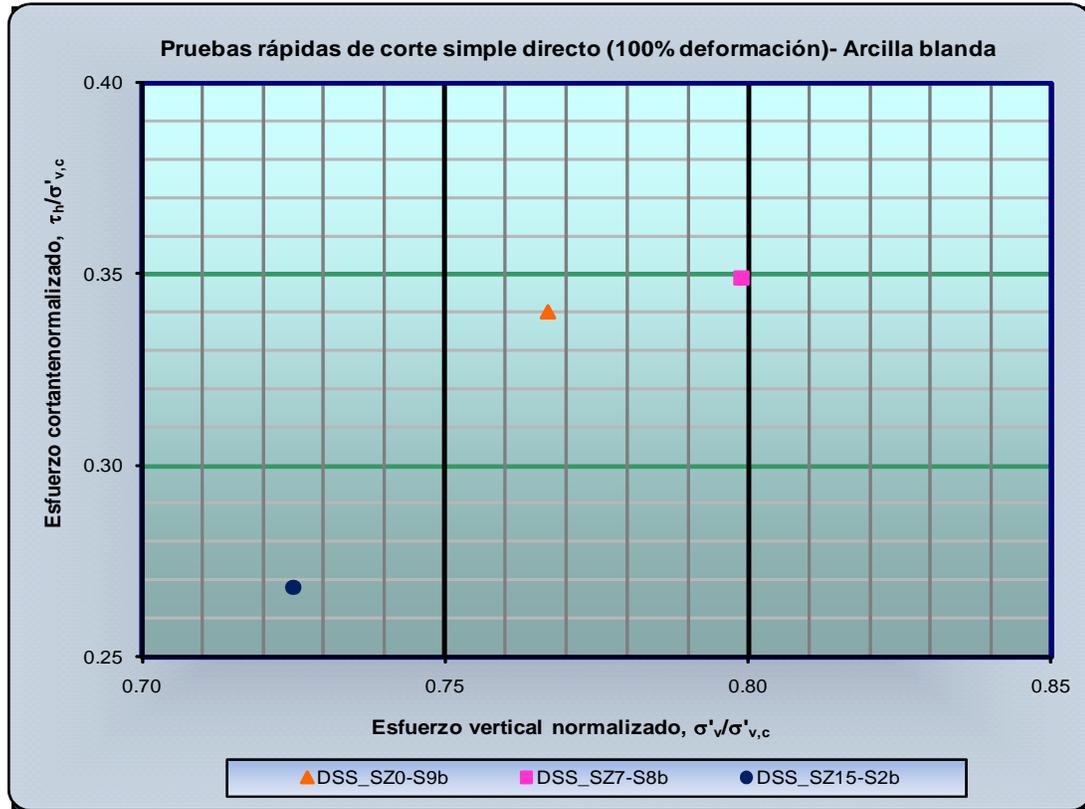


Figura IV.45. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla sin y con gas metano.

La diferencia obtenida en el decremento del esfuerzo vertical normalizado equivale aproximadamente al 14 por ciento de menor decremento y del 18 por ciento de mayor decremento del esfuerzo vertical normalizado, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas se obtuvo una diferencia aproximada del 27 por ciento de menor decremento del esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.10 se observa que la deformación al corte, γ_h , es similar para ambas arcillas con gas metano, este comportamiento indica que el gas aporta una «resistencia» adicional a la arcilla a mayor cantidad del mismo, es decir, que el gas metano «amortigua», hasta cierto punto, el esfuerzo cortante inducido, τ_h , al interactuar y reaccionar con la arcilla para soportar las cargas inducidas, aunque no necesariamente para obtener un esfuerzo cortante normalizado mayor, como es el caso de la arcilla con gas al 15 por ciento.



La diferencia obtenida equivale al 79 y 68 por ciento de menor deformación al corte para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas la diferencia es de aproximadamente 33 por ciento de menor deformación para la arcilla con menor contenido de gas, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

IV.4.1.3. Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora

En la Tabla IV.11 se presentan los resultados de consolidación y de esfuerzo-deformación a la falla obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas metano.

Tabla IV.11. Características esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación						
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	Deformación al corte, γ , (%)	Presión de poro (U_{wg}) (kPa)	Consolidación		Esfuerzo vertical efectivo, $\sigma'_{v,}$ (kPa)
				$\sigma'_{v,c}$	$\varepsilon'_{v,c}$	
DSS_SZ0-S9d	32.27	19.79	18.91	98.49	15.25	79.58
DSS_SZ7-S8i	31.70	6.64	14.94	98.59	15.65	83.65
DSS_SZ7-S8d	16.57	4.41	10.68	49.75	8.31	39.07
DSS_SZ15-S2d	29.93	8.08	16.14	96.81	15.30	80.68

Se ensayaron dos muestras de arcilla con gas metano al 7 por ciento para evaluar el efecto de la presión de consolidación en los resultados de las pruebas rápidas a 1 000 por ciento de deformación por hora. La muestra DSS_SZ7-S8d se consolidó a la presión de consolidación empleada para reconstituir las muestras de arcilla blanda con gas metano al 7 por ciento, pero aproximadamente igual a dos (2) veces mayor que la presión de preconsolidación (Capítulo III), mientras que la segunda muestra (DSS_SZ7-S8i) se consolidó hasta obtener una deformación de ± 15 por ciento, tal como en las otras muestras ensayadas.

Los resultados obtenidos, aparentemente, indican que el esfuerzo cortante disminuye ligeramente conforme aumenta la cantidad de gas metano en la arcilla, considerando a la muestra DSS_SZ7-S8i. Sin embargo, se obtiene una reducción significativa en el esfuerzo cortante cuando se compara a la muestra DSS_SZ7-S8d (Tabla IV.11 y Figura IV.46). La diferencia obtenida es de aproximadamente 2, 49 y 7 por ciento para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i, para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8d y para la arcilla con gas al 15



por ciento, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas metano la diferencia obtenida es de 6 por ciento de mayor esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i y de 45 por ciento de menor esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8d, ambas comparaciones con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

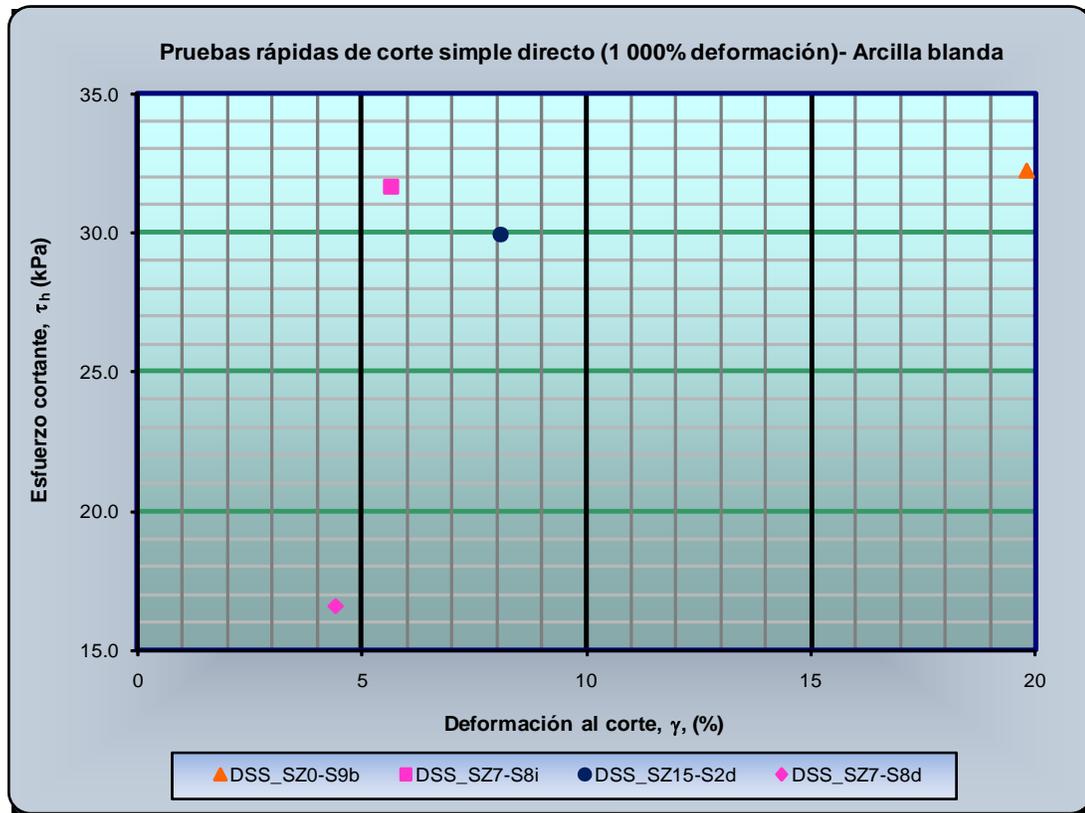


Figura IV.46. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En cuanto a la presión de poro se observa que prácticamente la arcilla con gas metano al 7 por ciento presenta la misma en ambas muestras. La diferencia obtenida es de aproximadamente 21, 44 y 15 por ciento de menor presión de poro para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i, para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8d y para la arcilla con gas al 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. En el caso de la arcilla con gas la diferencia equivale aproximadamente al 7 y 34 por ciento de menor presión de poro para la arcilla con gas al 7 por ciento muestra DSS_SZ7-S8i y muestra DSS_SZ7-S8d, respectivamente, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.11 se observa que el esfuerzo vertical efectivo a la falla es mayor para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i, que es, prácticamente, el mismo que el de la



arcilla con gas al 15 por ciento. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 5 por ciento de mayor esfuerzo vertical efectivo, del 51 por ciento de menor esfuerzo vertical efectivo y del uno (1) por ciento de mayor esfuerzo vertical efectivo, para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i, para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8d y para la arcilla con gas al 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia obtenida es de aproximadamente el 4 por ciento de mayor esfuerzo vertical efectivo y del 52 por ciento de menor esfuerzo vertical efectivo, para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i y muestra DSS_SZ7-S8d, respectivamente, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.12 se presentan los valores normalizados obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla sin y con gas metano (Las curvas normalizadas obtenidas se presentan en el Apéndice C).

Tabla IV.12. Características normalizadas esfuerzo-deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación normalizadas					
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, $\tau_h / \sigma'_{v,c}$	τ_h / σ'_v	Esfuerzo vertical $\sigma'_v / \sigma'_{v,c}$	Decremento del esfuerzo vertical, $\Delta\sigma'_v / \sigma'_{v,c}$	Deformación al corte, γ_h^* , (%)
DSS_SZ0-S9d	0.328	0.406	0.808	0.192	19.79
DSS_SZ7-S8i	0.322	0.379	0.848	0.152	6.64
DSS_SZ7-S8d	0.333	0.424	0.785	0.215	4.41
DSS_SZ15-S2d	0.309	0.374	0.834	0.173	8.08

Nota: el * en la deformación al corte indica que los valores no están normalizados

En la Tabla IV.12 y en la Figura IV.47 se observa que el esfuerzo cortante normalizado es prácticamente el mismo para la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento. La diferencia obtenida es de aproximadamente el 2 y 6 por ciento de menor esfuerzo cortante normalizado, para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i y para la arcilla con gas al 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas; mientras que la diferencia obtenida para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8d, es de aproximadamente 2 por ciento de mayor esfuerzo cortante normalizado, con respecto a la arcilla sin gas

Los resultados anteriores indican que la arcilla sin y con gas al 7 por ciento (ambas muestras) generan, prácticamente, el mismo esfuerzo cortante normalizado, esto muestra como los

resultados normalizando aportan una mejor apreciación de los resultados obtenidos. El comportamiento anterior revela que el gas se ha sobrepresionado dentro de la arcilla con menor cantidad de gas metano, a tal grado que se obtiene el mismo esfuerzo cortante normalizado que el de la arcilla sin gas; corroborada esta sobrepresión, por el hecho de que la arcilla con mayor contenido de gas generó un esfuerzo cortante normalizado similar.

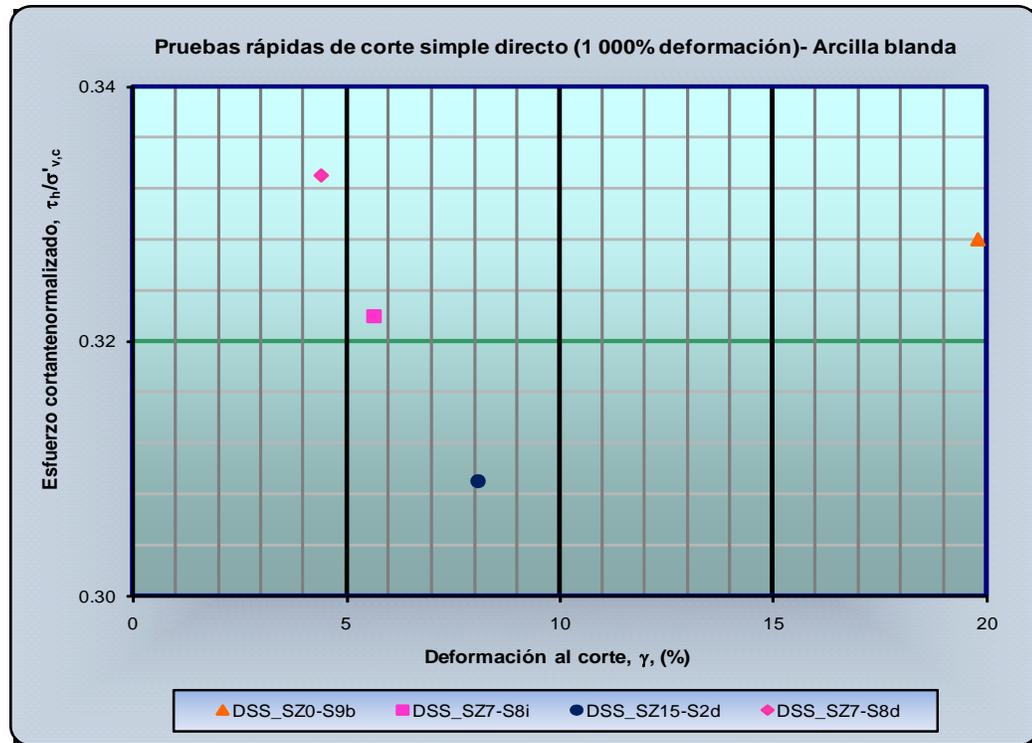


Figura IV.47. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En el caso del esfuerzo vertical normalizado, Figura IV.48, se observa que es mayor para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i, se asume que es debido a que está influenciado por la mayor presión de consolidación empleada. La diferencia obtenida equivale a aproximadamente 5 y 3 por ciento de mayor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i y para la arcilla con gas al 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Adicionalmente se obtuvo una diferencia de aproximadamente 3 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas metano se obtuvo una diferencia aproximada del 2 por ciento de mayor esfuerzo vertical efectivo normalizado y del 6 por ciento de menor esfuerzo vertical efectivo normalizado para la arcilla con gas metano al 7 por

ciento, muestra DSS_SZ7-S8i y muestra DSS_SZ7-S8d, respectivamente, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

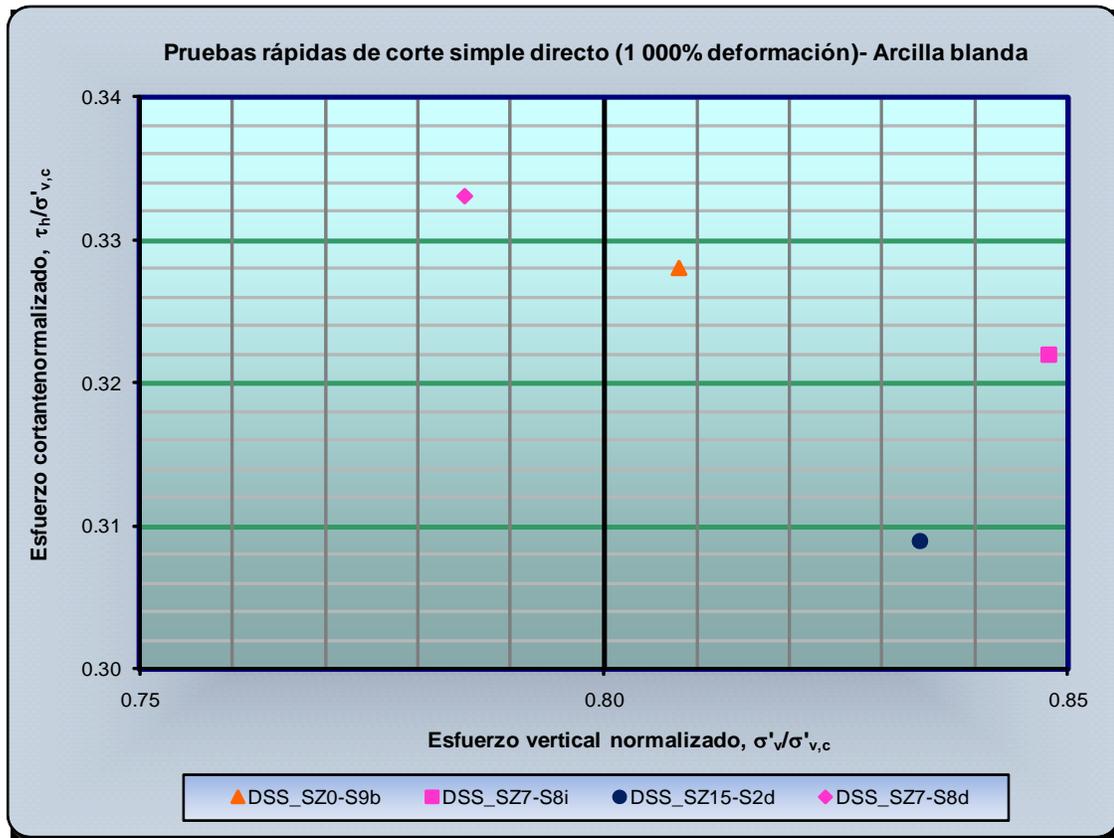


Figura IV.48. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En cuanto al decremento del esfuerzo vertical normalizado los resultados indican que es menor para la arcilla con gas al 15 por ciento. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 21 y 10 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i y para la arcilla con gas al 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. Además se obtuvo una diferencia equivalente aproximadamente al 12 por ciento de mayor decremento al esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, muestra DSS_SZ7-S8i, con respecto a la arcilla sin gas. En cuando a la arcilla con gas se obtuvo una diferencia de aproximadamente el 12 y 24 por ciento de menor y mayor decremento al esfuerzo cortante normalizado, para la arcilla con gas al 7 por ciento muestra DSS_SZ7-S8i y muestra DSS_SZ7-S8d, respectivamente, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.12 se observa que la deformación al corte, γ_h , obtenida es similar en la arcilla con gas metano, pero es mayor a mayor contenido de gas, este comportamiento indica que el gas metano se vuelve un factor importante para cuando la arcilla se deforma rápidamente.

IV.4.1.4. Efectos de la velocidad de deformación

Al comparar los resultados de las pruebas estáticas (5 por ciento de deformación por hora) y rápidas (100 y 1 000 por ciento de deformación por hora) de corte simple directo se determina el parámetro β (en por ciento), que se define como el incremento de la resistencia al corte por ciclo logarítmico inducido por la velocidad de carga con respecto a la resistencia al corte estática.

En la Figura 49 se presentan los resultados al esfuerzo cortante normalizado versus la deformación al corte para estudiar los efectos de la velocidad de deformación en la arcilla blanda sin y con gas metano. Los valores de β obtenidos son del 6, 8 y 6 por ciento para la arcilla sin y con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Con base a estos resultados se deduce que en la arcilla blanda con gas al 7 por ciento se genera un incremento en el valor de β y en la arcilla con gas al 15 por ciento el valor de β no se modifica.

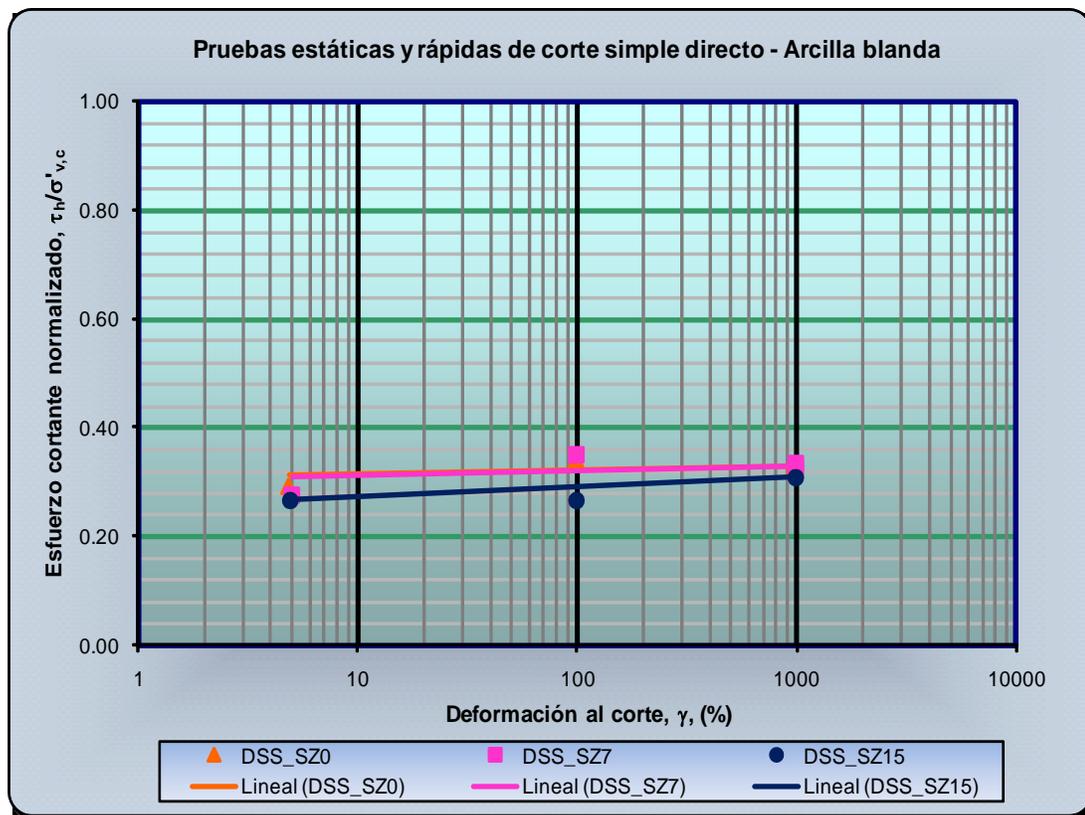


Figura IV.49. Efectos de la velocidad de deformación de la arcilla blanda sin y con gas metano.



IV.4.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano

IV.4.2.1. Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora

En la Tabla IV.13 se presentan los resultados de consolidación y las características esfuerzo-deformación a la falla obtenidos de las pruebas de corte simple directo estáticas a 5 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano. En la Figura IV.50 se presenta el esfuerzo cortante versus la deformación al corte.

Tabla IV.13. Características esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación						
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	Deformación al corte, γ , (%)	Presión de poro (u_{wg}) (kPa)	Consolidación		Esfuerzo vertical efectivo, $\sigma'_{v,}$ (kPa)
				$\sigma'_{v,c}$	$\epsilon'_{v,c}$	
DSS_FZ0-S9b	58.08	15.26	68.33	192.81	10.07	124.49
DSS_FZ7-S3b	50.27	15.65	81.79	190.90	25.01	108.88
DSS_FZ15-S2b	102.08	14.13	161.16	383.47	18.41	222.36

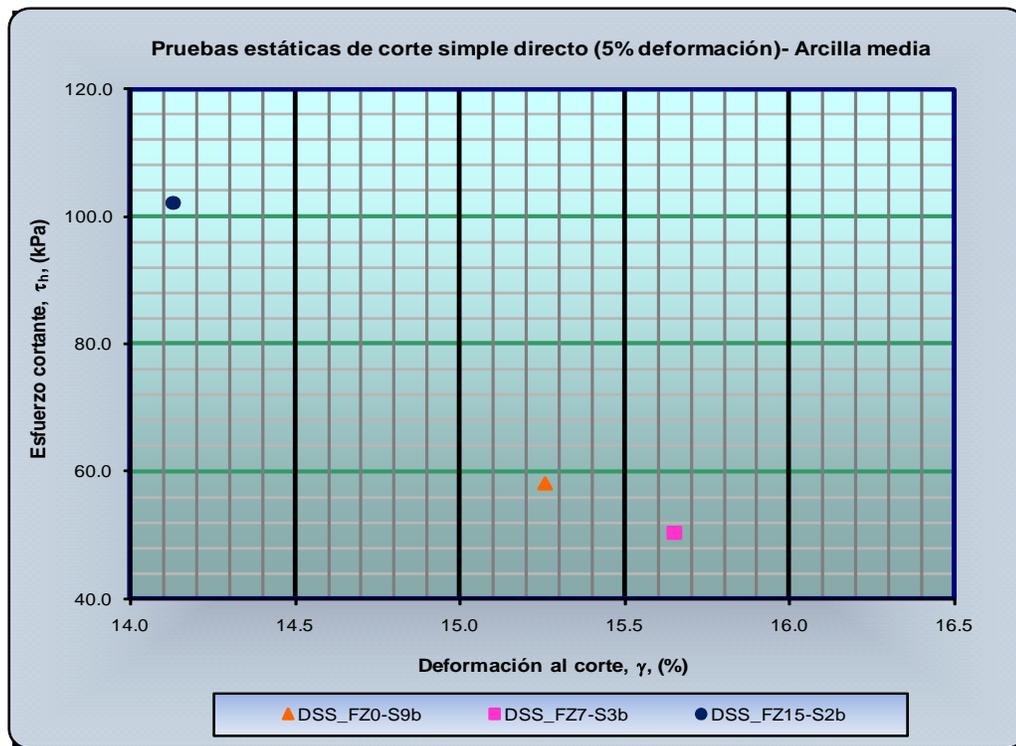


Figura IV.50. Esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas metano.



Los resultados indican, aparentemente, que la arcilla con gas metano al 15 por ciento genera el mayor esfuerzo cortante a la falla (Tabla IV.13 y Figura IV.50). La diferencia equivale aproximadamente al 13 y 76 por ciento de menor y mayor esfuerzo cortante, para la arcilla con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia obtenida en la arcilla con gas al 7 por ciento es de aproximadamente el 51 por ciento de menor esfuerzo cortante, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En cuanto a la presión de poro, se observa que su valor se incrementa conforme se incrementa el contenido de gas en la arcilla. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 20 y 136 por ciento de mayor presión de poro, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia obtenida es de aproximadamente el 97 por ciento de mayor presión de poro para la arcilla con gas al 15 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

En la Tabla IV.13 también se observa que el mayor esfuerzo vertical efectivo a la falla corresponde a la arcilla con gas al 15 por ciento y el menor para la arcilla con gas al 7 por ciento. La diferencia obtenida es de aproximadamente el 13 y 79 por ciento de menor y mayor esfuerzo vertical efectivo, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas la diferencia obtenida es de aproximadamente 104 por ciento de mayor deformación para la arcilla con gas al 15 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

En la Tabla IV.14 se presentan los valores normalizados obtenidos de las pruebas de corte simple directo estáticas de la arcilla sin y con gas y en la Figura 51 se muestran los datos de esfuerzo cortante normalizado a la falla (las curvas normalizadas se presentan en el Apéndice C).

Tabla IV.14. Características normalizadas esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación normalizadas					
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$	τ_h/σ'_v	Esfuerzo vertical $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	Decremento del esfuerzo vertical, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	Deformación al corte, γ^* , (%)
DSS_FZ0-S9b	0.301	0.466	0.646	0.354	15.26
DSS_FZ7-S3b	0.263	0.462	0.570	0.430	15.65
DSS_FZ15-S2b	0.266	0.459	0.580	0.420	14.13

Nota: el * en la deformación al corte indica que los valores no están normalizados

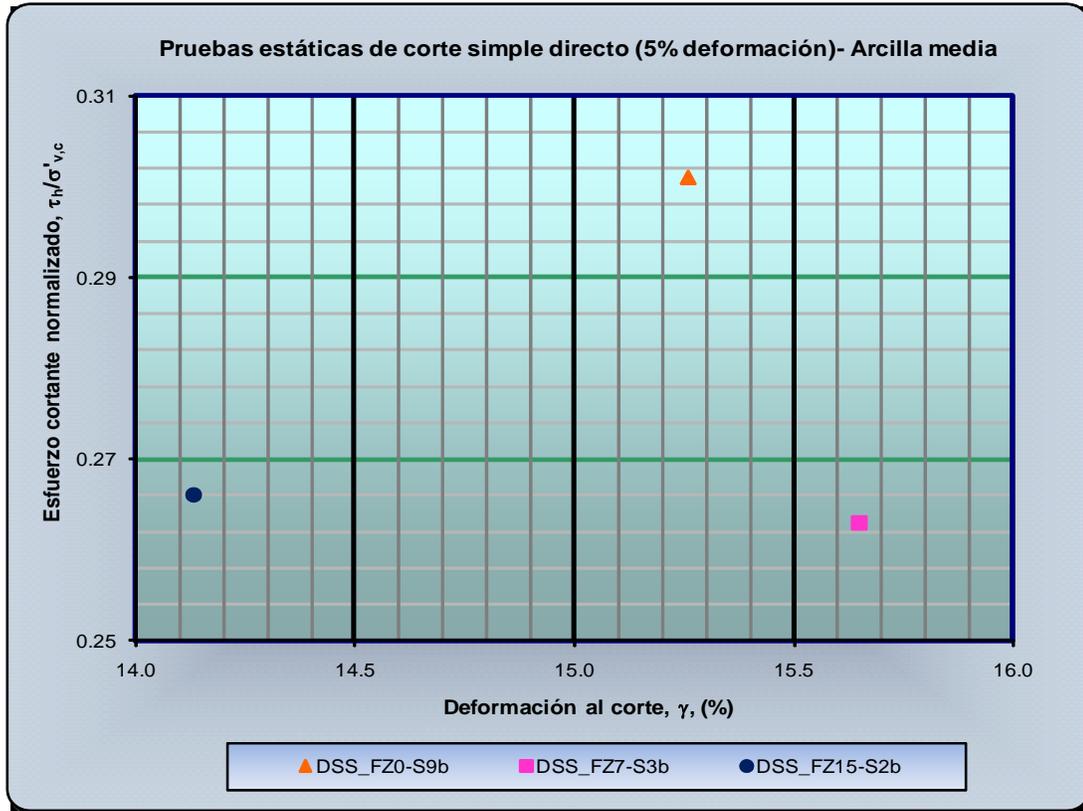


Figura IV.51. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla sin y con gas metano.

En los datos obtenidos se observa (Tabla IV.14 y Figura IV.51), que el esfuerzo cortante normalizado es similar en la arcilla con gas metano, pero se incrementa ligeramente a medida que se incrementa el contenido de gas en la arcilla. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 13 y 12 por ciento de menor esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano.

En cuanto al esfuerzo vertical normalizado se observa que disminuye a medida que disminuye el contenido de gas metano, tal como se observa en la Tabla IV.14 y en la Figura IV.52. Estos resultados equivalen al 12 y 10 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. Mientras que la diferencia de la arcilla con gas la diferencia es de aproximadamente el 2 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

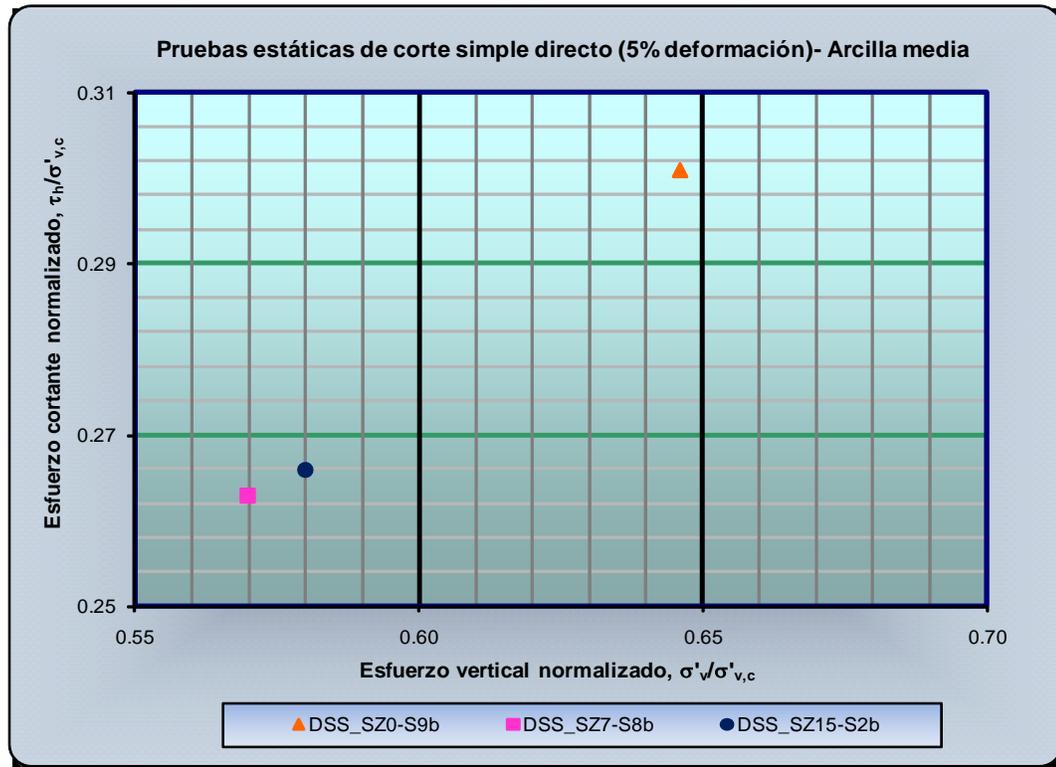


Figura IV.52. Esfuerzo vertical normalizado de la arcilla sin y con gas metano.

En el caso del decremento del esfuerzo vertical normalizado se observa que se incrementa conforme disminuye la cantidad de gas metano en la arcilla. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 21 y 19 por ciento de mayor decremento del esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia obtenida es del 2 por ciento de mayor decremento del esfuerzo vertical normalizado, para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.14 también se observa que la deformación al corte, γ_h , obtenida durante el desarrollo de la prueba estática (5 por ciento de deformación por hora) de corte simple directo es similar en la arcilla sin y con gas metano.

Los resultados mostrados indican que el gas metano aporta una “resistencia” adicional a la arcilla, siendo ligeramente mayor a mayor cantidad de gas, es decir, el gas metano amortigua, hasta cierto punto, el esfuerzo cortante inducido, τ_h , al interactuar y reaccionar el gas con la arcilla para soportar las cargas inducidas, para de esta manera formar una nueva estructura, que está compuesta por las láminas de arcilla, el agua de poro y el gas metano.



IV.4.2.2. Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora

En la Tabla IV.15 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano y en la Figura IV.53 se presenta el esfuerzo cortante.

Tabla IV.15. Características esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación						
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	Deformación al corte, γ , (%)	Presión de poro (u_{wg}) (kPa)	Consolidación		Esfuerzo vertical efectivo, σ'_v , (kPa)
				$\sigma'_{v,c}$	$\epsilon'_{v,c}$	
DSS_FZ0-S9c	39.17	17.67	33.42	194.01	6.62	160.59
DSS_FZ7-S3c	52.14	12.50	61.19	195.02	25.56	133.83
DSS_FZ15-S2c	109.50	13.30	131.00	391.09	18.33	260.09

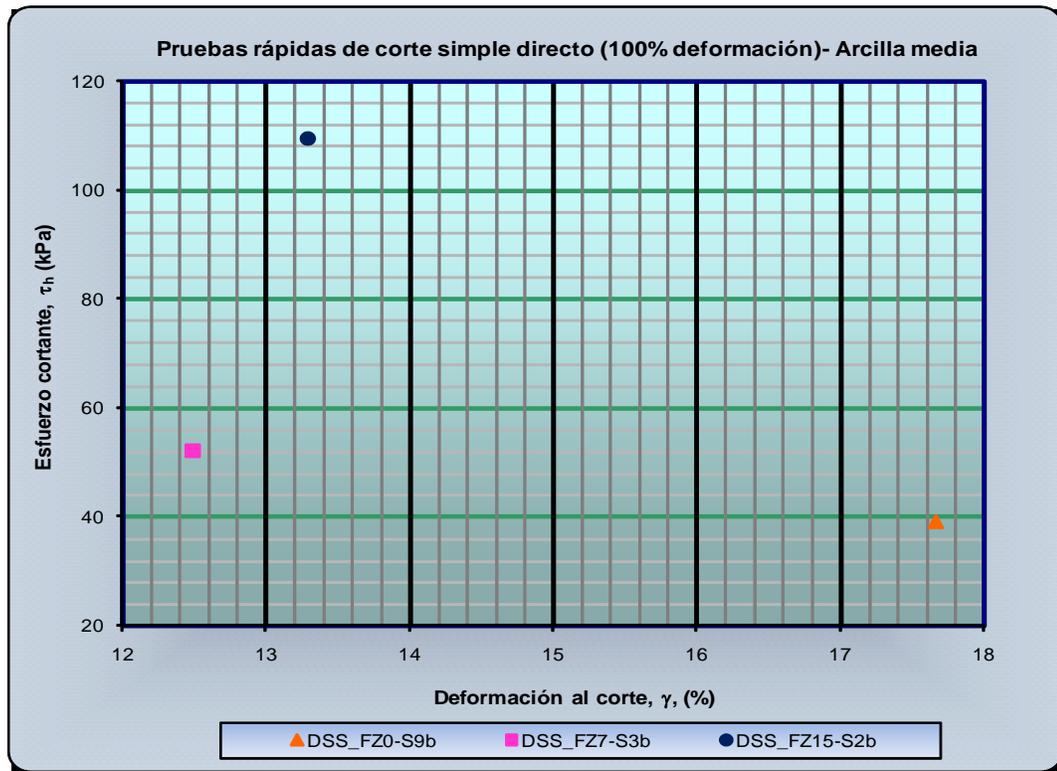


Figura IV.53. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.



Los resultados (Tabla IV.15 y Figura IV.53); indican, aparentemente, que en la arcilla con gas al 15 por ciento se genera el mayor esfuerzo cortante. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 33 y 180 por ciento de mayor esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, se obtuvo una diferencia de aproximadamente el 52 por ciento de menor esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En el caso de la presión de poro se observa que se incrementa a medida que se incrementa la cantidad de gas en la arcilla. La diferencia obtenida es de aproximadamente el 83 y 292 por ciento de mayor presión de poro, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia obtenida es de aproximadamente el 53 por ciento de menor presión de poro para arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.15 también se observa que el mayor y menor esfuerzo vertical a la falla corresponde a la arcilla con gas metano al 15 por ciento y a la arcilla con gas al 7 por ciento, respectivamente. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 17 y 62 por ciento de menor y mayor esfuerzo vertical efectivo, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia obtenida equivale aproximadamente al 49 por ciento de menor esfuerzo vertical efectivo para la arcilla con gas al 7 por ciento es, con respecto a la a arcilla con gas metano al 15 por ciento.

En la Tabla IV.16 se presentan los valores normalizados obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla sin y con gas metano y en la Figura IV.54 se muestran gráficamente los datos del esfuerzo cortante normalizado (las curvas normalizadas y resultados adicionales se presentan en el Apéndice C).

Tabla IV.16. Características normalizadas esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación normalizadas					
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$	τ_h/σ'_v	Esfuerzo vertical $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	Decremento del esfuerzo vertical, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	Deformación al corte, γ^* , (%)
DSS_FZ0-S9b	0.202	0.240	0.828	0.172	17.67
DSS_FZ7-S2b	0.267	0.390	0.686	0.314	12.50
DSS_FZ15-S2b	0.280	0.420	0.665	0.335	13.30

Nota: el * en la deformación al corte indica que los valores no están normalizados



En la Tabla IV.16 y en la Figura IV.54 se observa que el esfuerzo cortante normalizado disminuye conforme disminuye el contenido de gas metano en la arcilla. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 32 y 39 por ciento de mayor esfuerzo cortante normalizado para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia obtenida es de aproximadamente el 5 por ciento de menor esfuerzo cortante normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento. Se asume que este comportamiento es debido a que las burbujas de gas metano se han sobrepresionado por la velocidad de deformación inducida, generando un mayor esfuerzo cortante normalizado y una menor deformación al corte en la arcilla con mayor contenido de gas.

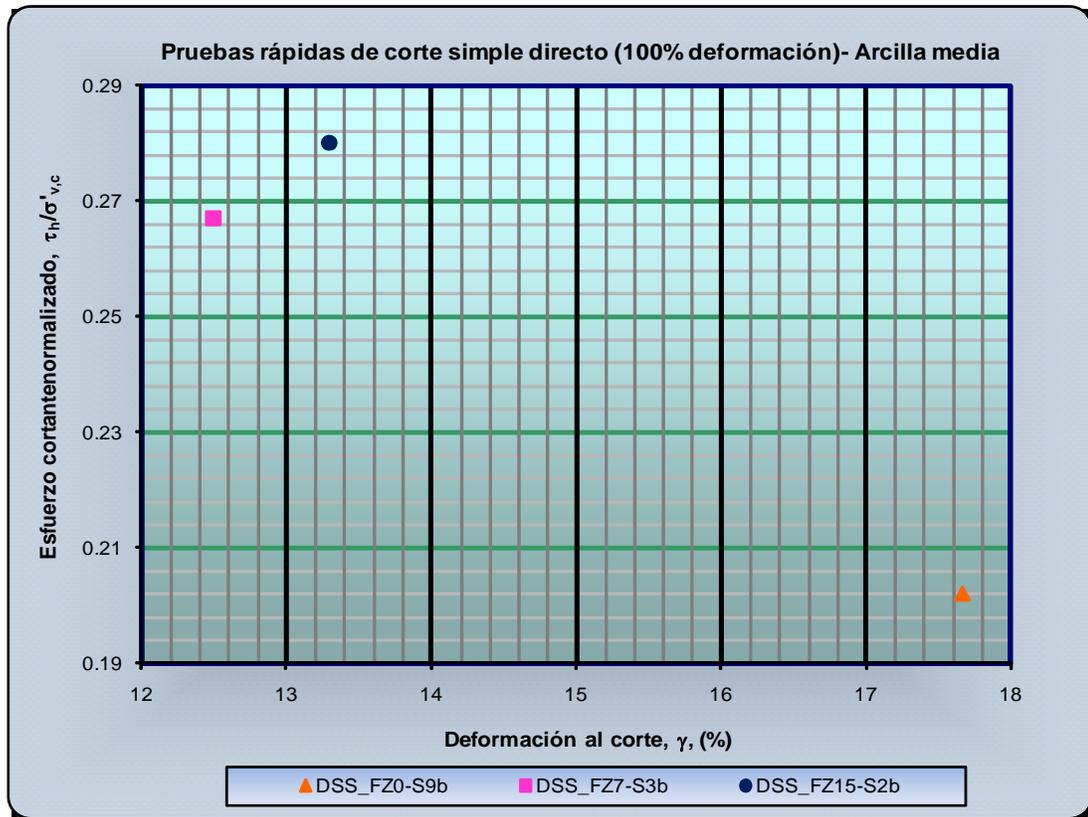


Figura IV.54. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.

En cuanto al esfuerzo vertical normalizado (Tabla IV.16 y Figura IV.55) se observa que disminuye conforme disminuye el contenido de gas en la arcilla. La diferencia equivale aproximadamente al 17 y 20 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. Mientras que la diferencia obtenida en la arcilla con gas es de aproximadamente el 3 por ciento de menor esfuerzo

vertical normalizado para la arcilla con gas al 15 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento.

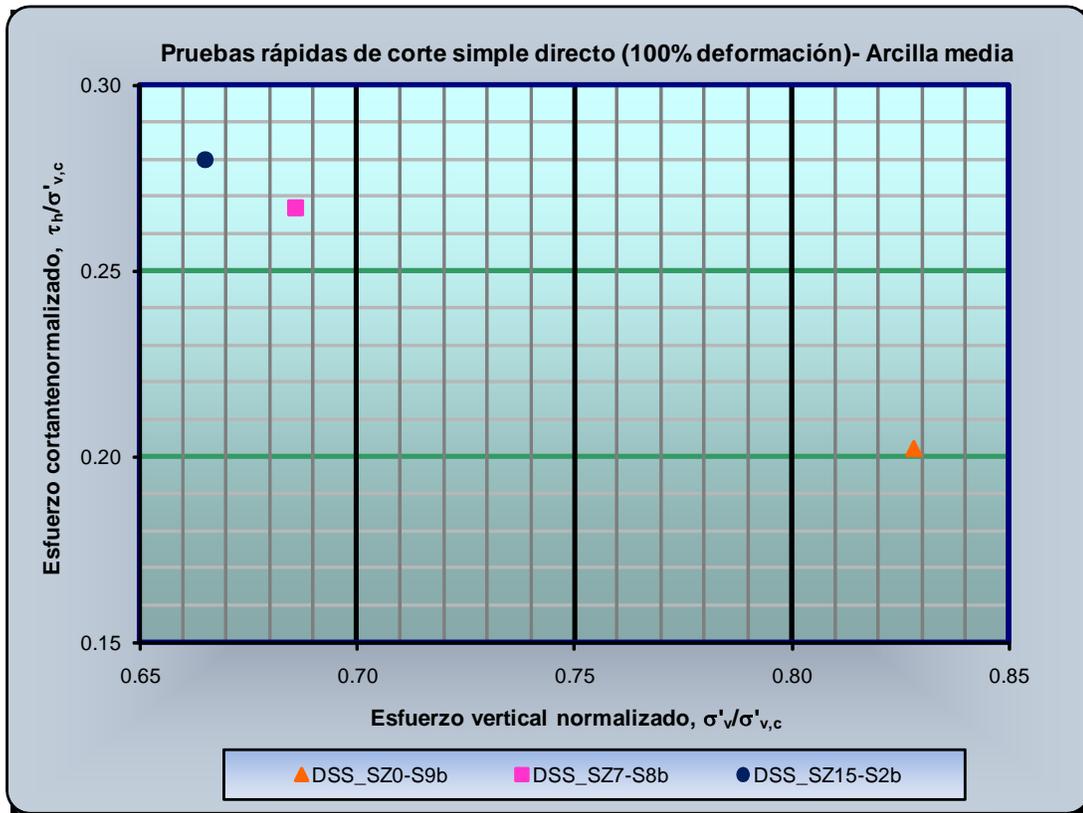


Figura IV.55. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

También se observa en la Tabla IV.16 que decremento del esfuerzo vertical normalizado es mayor a mayor contenido de gas metano en la arcilla. La diferencia obtenida es de aproximadamente el 83 y 95 por ciento de mayor decremento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas.

En la Tabla IV.16 se observa que la deformación al corte, γ_h , obtenida es similar en ambas muestras de arcilla con gas metano; el comportamiento mostrado indica que la arcilla media con gas metano genera una “resistencia” adicional a mayor cantidad del mismo, es decir, que el gas metano amortigua, hasta cierto punto, el esfuerzo cortante inducido, τ_h , al interactuar y reaccionar con la arcilla para soportar las cargas inducidas, pero no necesariamente se producirá una mayor deformación al corte, al compararla con la arcilla sin gas.



IV.4.2.3. Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora

En la Tabla IV.17 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de corte simple directo rápidas a 1 000 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano y en la Figura 56 se presenta el esfuerzo cortante.

Tabla IV.17. Características esfuerzo-deformación de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación						
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	Deformación al corte, γ , (%)	Presión de poro (u_{wg}) (kPa)	Consolidación		Esfuerzo vertical efectivo, $\sigma'_{v,}$ (kPa)
				$\sigma'_{v,c}$	$\varepsilon'_{v,c}$	
DSS_FZ0-S9d	68.37	15.9	21.40	193.24	10.65	171.79
DSS_FZ7-S3d	54.78	9.89	40.22	194.92	25.89	154.70
DSS_FZ15-S2e	113.52	8.96	76.23	382.75	18.60	306.53

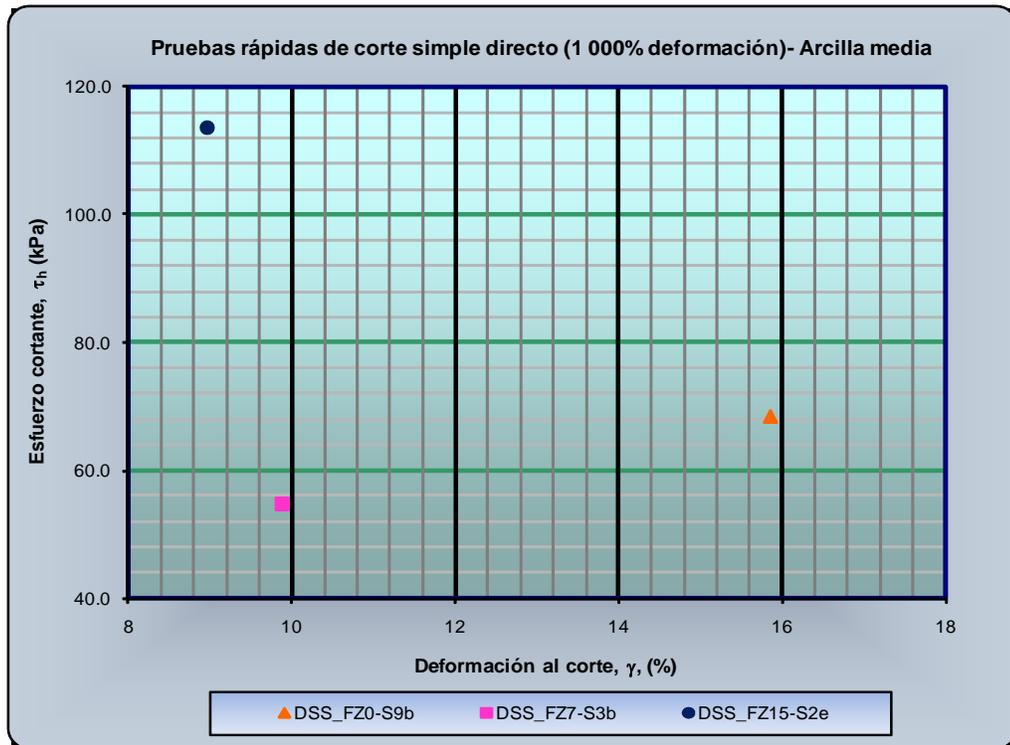


Figura IV.56. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.

Los resultados obtenidos indican, aparentemente, que el esfuerzo cortante disminuye cuando la arcilla contiene poca cantidad de gas y aumenta cuando la cantidad de gas es mayor,



Tabla IV.17 y Figura IV.56. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 20 y 66 por ciento de menor y mayor esfuerzo cortante, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia equivale aproximadamente al 52 por ciento de menor esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En cuanto a la presión de poro se observa que, aparentemente, aumenta conforme aumenta la cantidad de gas en la arcilla. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 88 y 256 por ciento de mayor presión de poro para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia equivale aproximadamente al 47 por ciento de menor presión de poro la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.17 también se observa que el mayor esfuerzo vertical obtenido a la falla es para la arcilla con gas al 15 por ciento y el menor es el de la arcilla con gas al 7 por ciento. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 10 y 78 por ciento de menor y mayor esfuerzo vertical efectivo, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia equivale aproximadamente al 50 por ciento de menor esfuerzo vertical efectivo para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En la Tabla IV.18 se presentan los valores normalizados obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla sin y con gas metano y en la Figura 57 se muestran gráficamente los datos del esfuerzo cortante normalizado (las curvas normalizadas y resultados adicionales se presentan en el Apéndice C).

Tabla IV.18. Características esfuerzo-deformación normalizadas de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación normalizadas					
Número de Muestra	Esfuerzo cortante, $\tau_h / \sigma'_{v,c}$	τ_h / σ'_v	Esfuerzo vertical $\sigma'_v / \sigma'_{v,c}$	Decremento del esfuerzo vertical, $\Delta\sigma'_v / \sigma'_{v,c}$	Deformación al corte, γ_h^* , (%)
DSS_FZ0-S9d	0.354	0.400	0.889	0.111	15.90
DSS_FZ7-S3d	0.281	0.350	0.794	0.206	9.89
DSS_FZ15-S2e	0.297	0.370	0.801	0.199	8.96

Nota: el * en la deformación al corte indica que los valores no están normalizados

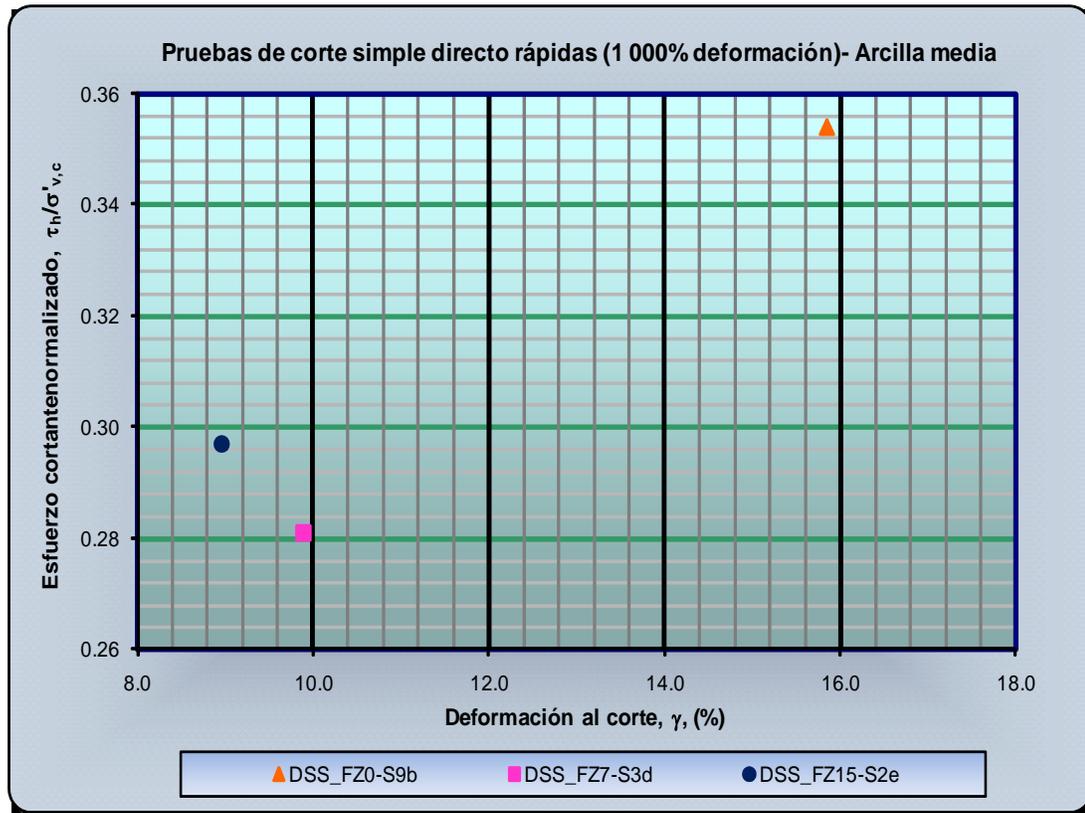


Figura IV.57. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

En la Tabla IV.18 y en la Figura IV.57 se observa que el mayor y menor esfuerzo cortante normalizado corresponde a la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, respectivamente. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 21 y 16 por ciento de menor esfuerzo cortante normalizado, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, diferencia obtenida equivale aproximadamente al 5 por ciento de menor esfuerzo cortante para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento. Estos resultados indican que el gas se ha sobrepresionado dentro de la estructura de la arcilla, a tal grado de obtenerse un ligero incremento del esfuerzo cortante normalizado en la arcilla con gas al 15 por ciento.

En el caso del esfuerzo vertical normalizado se observa la misma tendencia que el del esfuerzo cortante normalizado, Figura 58. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 11 y 10 por ciento de menor esfuerzo vertical normalizado, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que en la arcilla con gas, la diferencia obtenida equivale aproximadamente al uno (1) por ciento para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

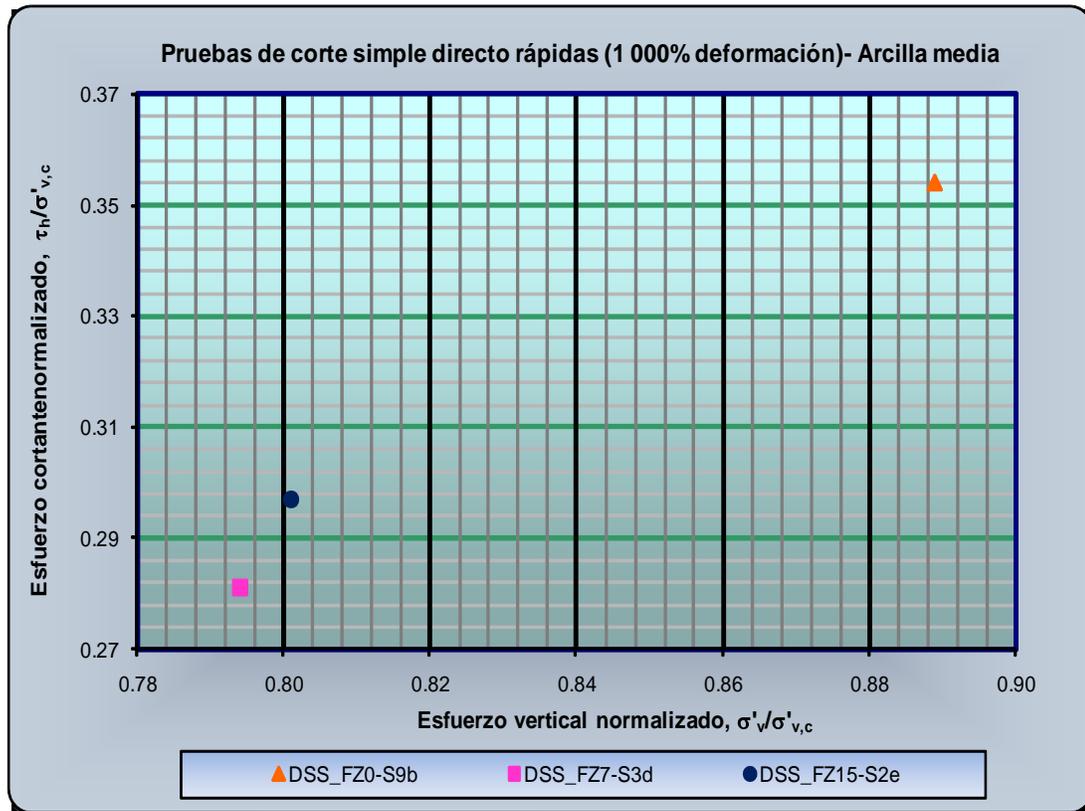


Figura IV.58. Esfuerzo cortante normalizado versus esfuerzo vertical normalizado de la arcilla mediana sin y con gas metano.

En cuanto al decremento del esfuerzo vertical normalizado los resultados indican que es mayor para la arcilla con gas al 7 por ciento y menor para la arcilla sin gas. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 86 y 79 por ciento de mayor decremento normalizado, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la arcilla con gas, la diferencia equivale aproximadamente al 4 por ciento de mayor decremento del esfuerzo vertical normalizado para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas metano al 15 por ciento.

En la Tabla IV.18 se observa que la deformación al corte, γ_h , es similar en ambas muestras de arcilla con gas metano, pero menores que la de la arcilla sin gas. Este comportamiento muestra la influencia del gas en las propiedades normalizadas de la arcilla e indica que la cantidad de gas metano se vuelve un factor importante para cuando el suelo se deforma rápidamente (1 000 por ciento de deformación por hora), ya que a mayor cantidad del mismo se genera un mayor esfuerzo cortante normalizado.

IV.4.2.4. Efectos de la velocidad de deformación

En la Figura 59 se muestran los resultados al esfuerzo cortante normalizado versus la deformación al corte, para estudiar los efectos de la velocidad de deformación en la arcilla media sin y con gas metano y los valores obtenidos de β son 6, 3 y 5 por ciento para la arcilla sin y con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente. Con base a estos resultados se deduce que en la arcilla media se reduce el incremento del esfuerzo cortante normalizado cuando la arcilla tiene poca cantidad de gas, pero este permanece prácticamente el mismo, cuando la arcilla contiene el 15 por ciento de gas metano.

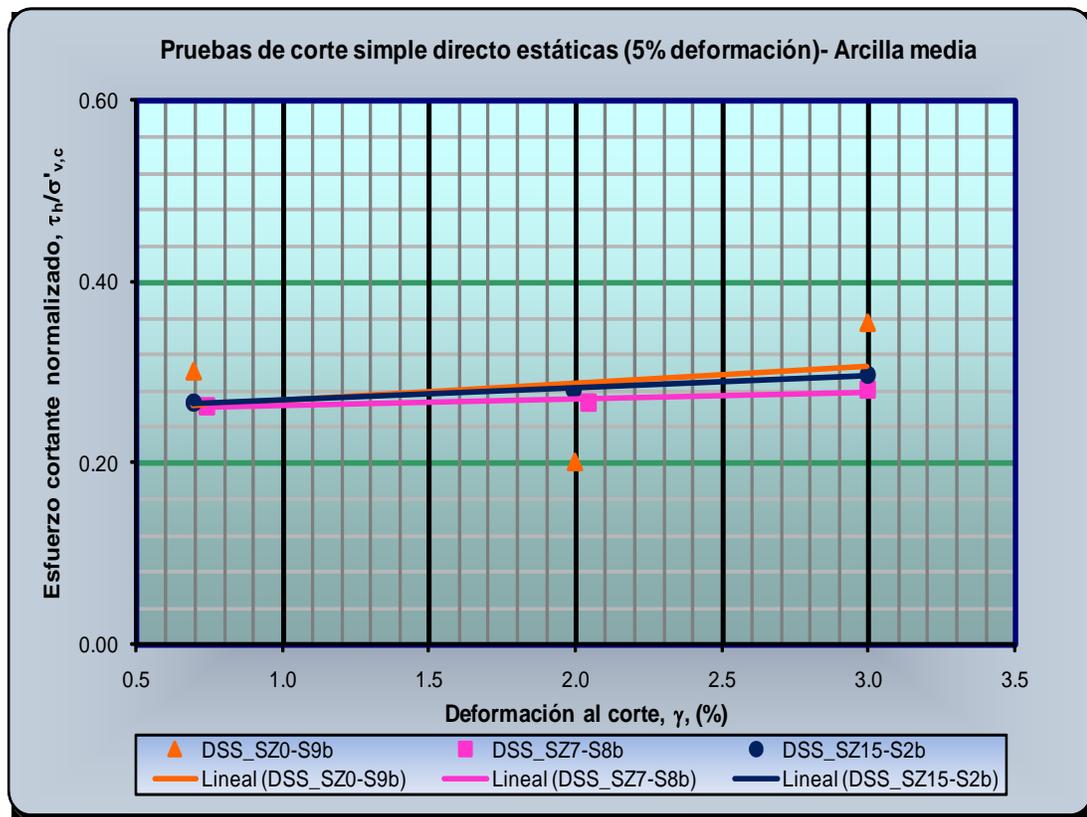


Figura IV.59. Efectos de la velocidad de deformación de la arcilla media sin y con gas metano.



IV.5. Propiedades índice

Como parte de las pruebas de laboratorio (veleta miniatura, triaxiales con medición de presión de poro, CRS y DSS) se determinaron algunas propiedades índice de la arcilla blanda y media sin y con gas metano para determinar posibles variaciones en la arcilla, cuando contiene gas metano. Las propiedades índice determinadas en este estudio fueron:

- a. límites de Atterberg;
- b. peso específico relativo de los sólidos;
- c. peso volumétrico total y seco;
- d. grado de saturación; y
- e. contenido de agua,

Adicionalmente, se determinaron las propiedades índice inherentes a los ensayos realizados, como fue la relación de vacíos en la prueba de consolidación a deformación constante. Suplementariamente, se tomaron radiografías de rayos X a algunas muestras de arcilla con gas metano, con la finalidad de observar posibles variaciones en la macro estructura de la arcilla.

En los siguientes párrafos se comentan y presentan los resultados gráficamente de las pruebas índice de la arcilla blanda y media sin y con gas metano, mientras que en el Apéndice B y C se presentan los resultados numéricos, en cada una de las secciones presentadas para las pruebas efectuadas.

IV.5.1. Análisis de los resultados la arcilla blanda sin y con gas metano

IV.5.1.1. Límites de Atterberg.

En la Figura IV.60 se presenta la carta de plasticidad de la arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que prácticamente se ensayó el mismo tipo de arcilla. Promediando los valores, para efectos de comparación, se obtuvo un incremento del 8 por ciento y un decremento del 11 por ciento, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, pero toda la arcilla ensayada se ubica dentro del rango de arcilla (CH) en la carta de plasticidad.

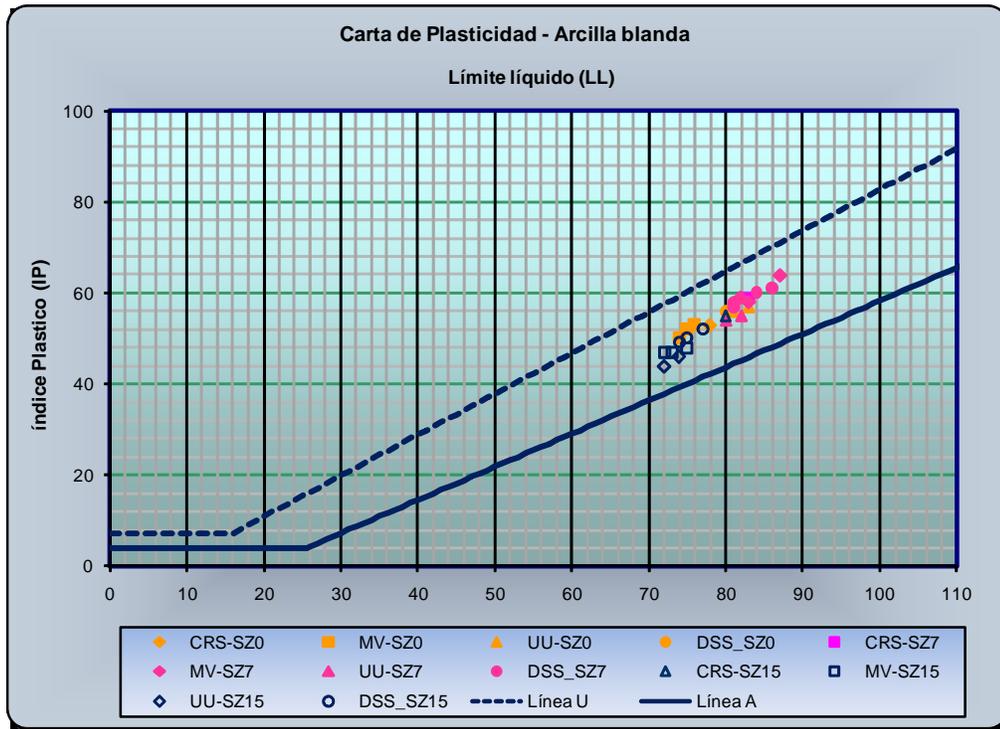


Figura IV.60. Carta de plasticidad de la arcilla blanda sin y con gas metano.

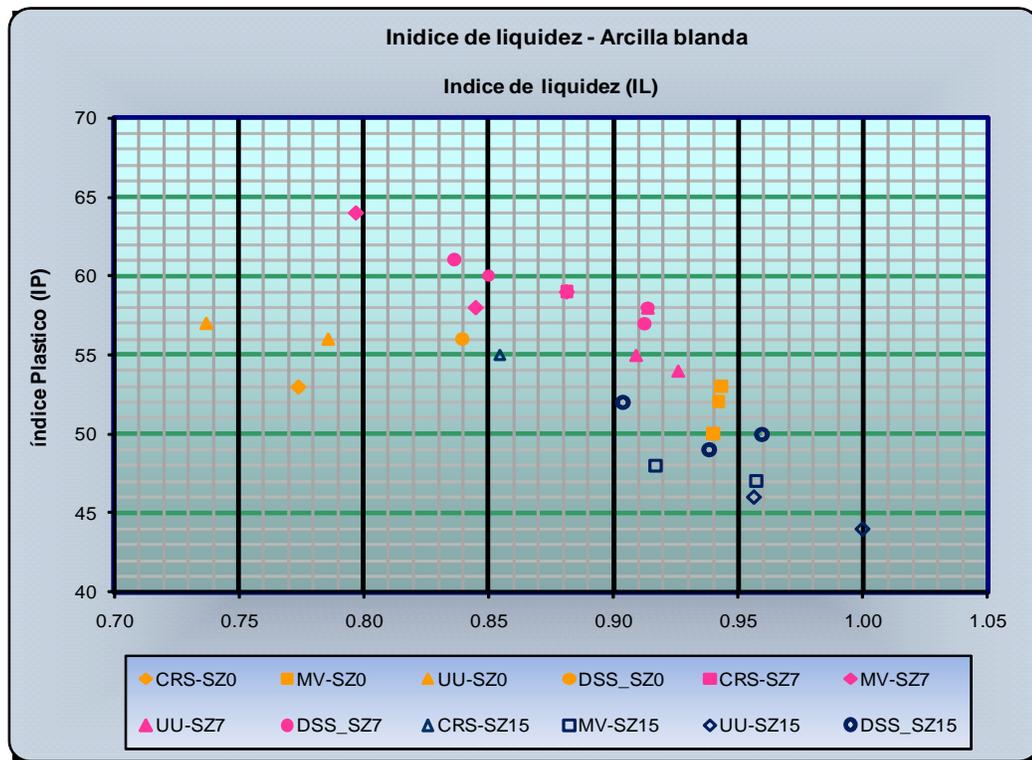


Figura IV.61. Índice de liquidez de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En la Figura 61 se observa que el índice de liquidez, generalmente, es menor en la arcilla sin gas y mayor conforme se incrementa el contenido de gas metano indicando de manera general que la resistencia de la arcilla decrece con el contenido de gas, tal como generalmente sucede en la arcilla blanda, pero no necesariamente en esa proporción, según los muestran los resultados obtenidos.

IV.5.1.2. Peso específico relativo de los sólidos

En la Figura IV.62 se presenta el peso específico relativo de los sólidos correspondiente a la arcilla blanda sin y con gas y se observa que, prácticamente, la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento es el mismo, exceptuando los dos menores valores en esta última. En el caso de la arcilla con gas al 15 por ciento se observa que los valores obtenidos son ligeramente menores que los de las otras dos muestras de arcilla, pero con base a los resultados obtenidos, en este estudio y a las investigaciones realizadas empleando zeolita (Nageswaran, 1983 y Wheeler, 1986), la variación de los valores del peso específico relativo de los sólidos es aceptable para interpretar las propiedades de la arcilla sin y con gas metano, ya que las propiedades mecánicas de la arcilla no cambian significativamente.

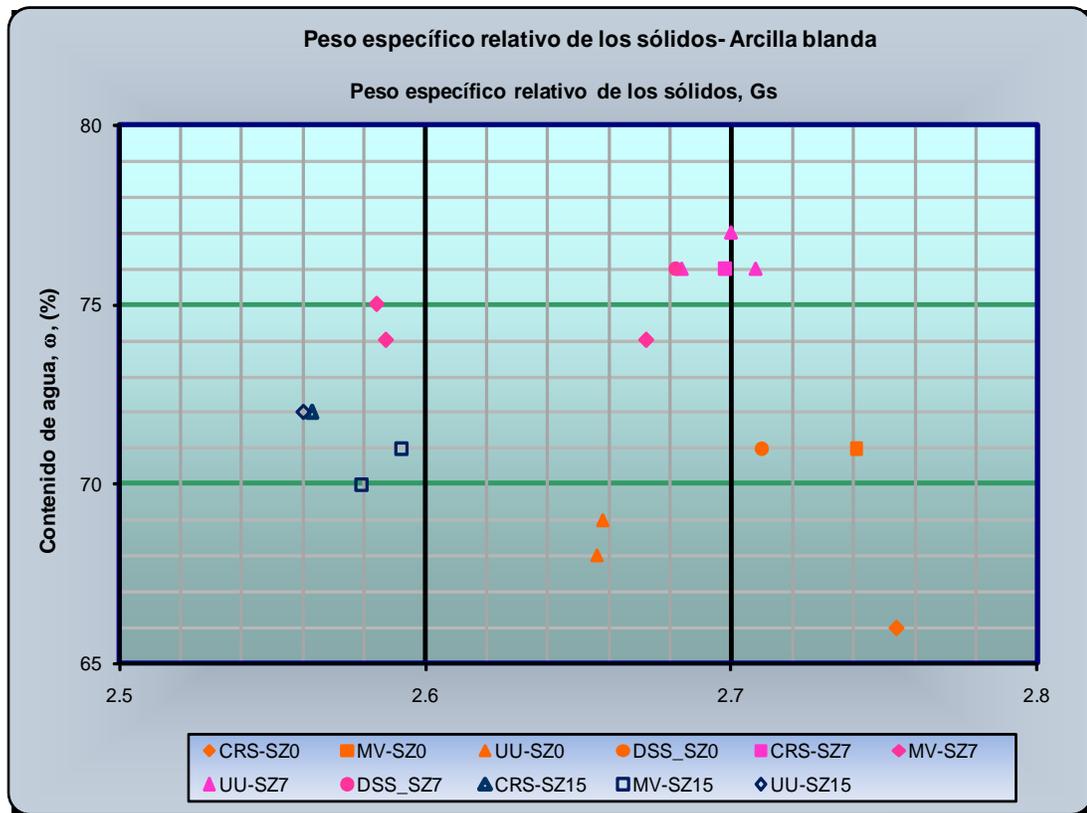


Figura IV.62. Peso específico relativo de los sólidos de la arcilla blanda sin y con gas metano.

IV.5.1.3. Peso volumétrico

En la Figura IV.63 se observa que la arcilla con gas presenta, prácticamente, los mismos pesos volumétricos totales, exceptuando tres valores ligeramente mayores de la arcilla con gas al 7 por ciento, pero al mismo tiempo se observa que los valores son muy consistentes en cada una de las muestras de arcilla reconstituida. Promediando los valores del peso volumétrico, para efectos de comparación, se obtiene una diferencia aproximada del 8 por ciento para ambas arcillas con gas, con respecto a la arcilla sin gas.

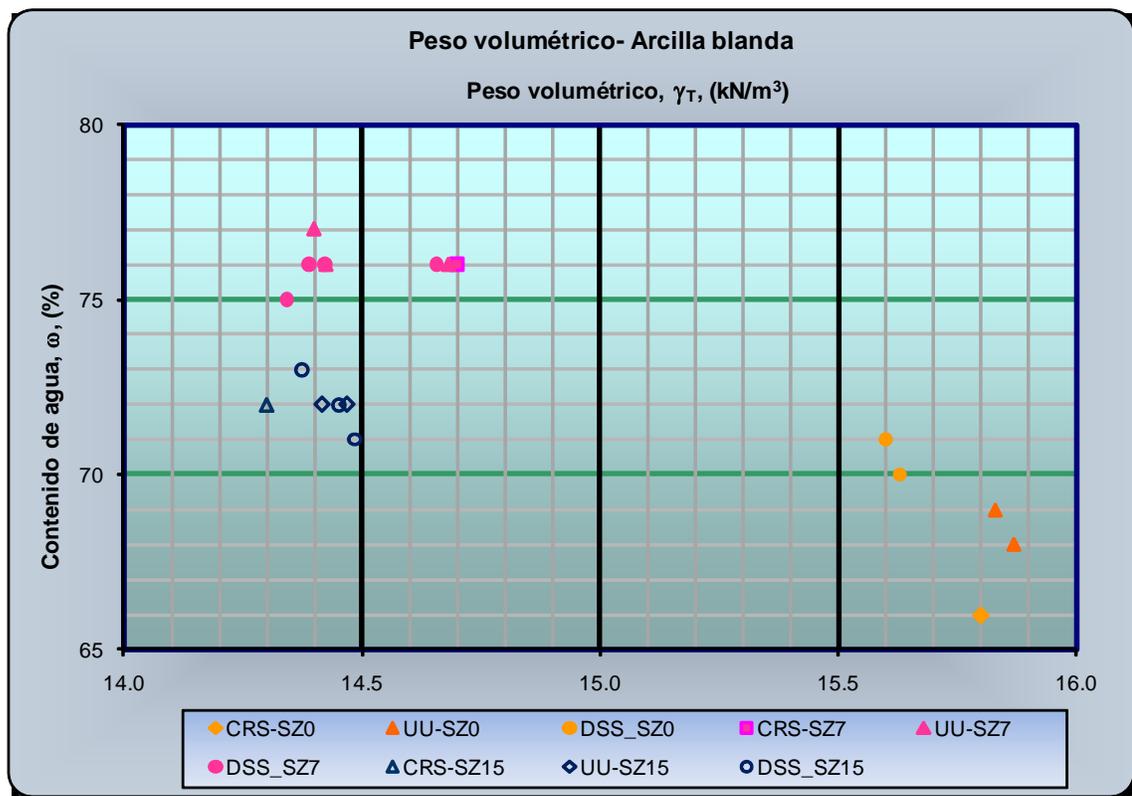


Figura IV.63. Peso volumétrico total de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En la Figura IV.64 se observa que el peso volumétrico seco es mayor para la arcilla con gas al 15 por ciento que para la arcilla con gas al 7 por ciento, pero ambas son menores que los de la arcilla sin gas metano, posiblemente esto es debido a la mayor cantidad de gas en la primera. La diferencia obtenida es de aproximadamente el 11 y 10 por ciento de menor peso volumétrico seco para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, con respecto a la arcilla sin gas.

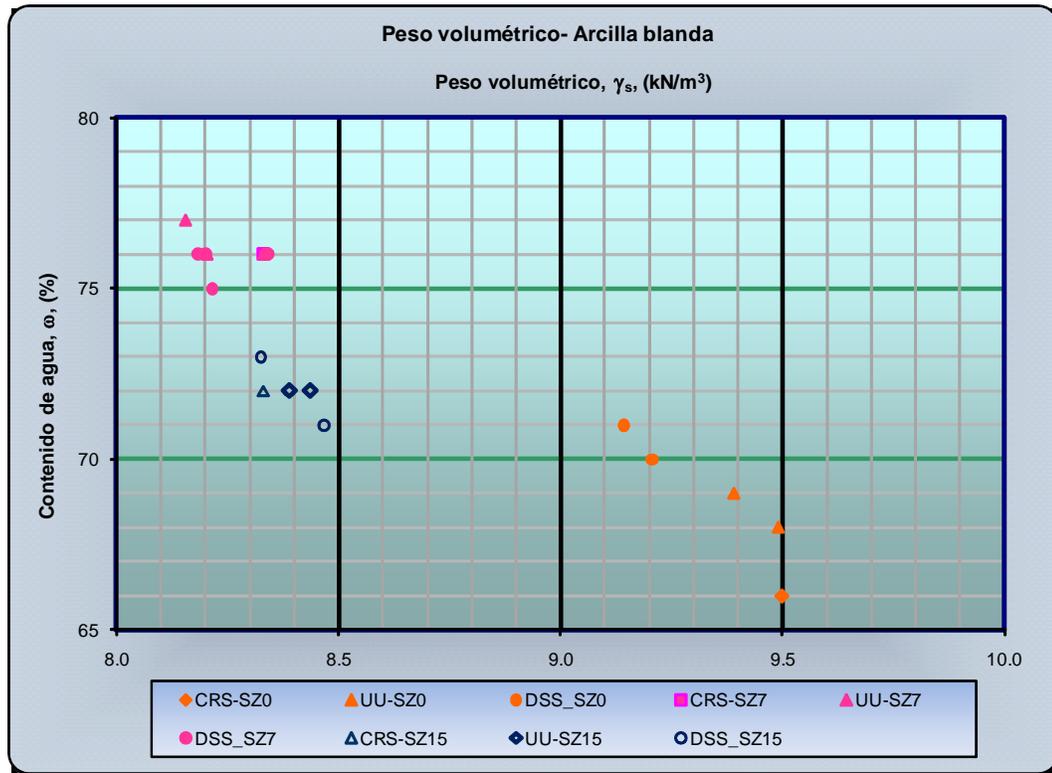


Figura IV.64. Peso volumétrico seco de la arcilla blanda sin y con gas metano.

IV.5.1.4. Grado de saturación

En la Figura IV.65 se observa que tres (3) valores del grado de saturación son menores para la arcilla con gas metano al 15 por ciento y los restantes son similares a los de la arcilla con gas al 7 por ciento. Posiblemente estos valores están influenciados por el tamaño de la muestra ensayada y/o posiblemente a que la muestras pequeñas (para las pruebas de CRS o DSS) requieren mayor manipulación y por lo tanto están más expuestas a la pérdida de fluido, lo que es crítico en las muestras con gas metano, situación totalmente diferente para las pruebas triaxiales, por lo que, al considerar estas muestras como representativas, se observa que la saturación de la arcilla con gas decrece a medida que aumenta la cantidad de gas metano en la muestra.

IV.5.1.5. Relación de vacíos y porosidad

En la Figura IV.65 se observa que la relación de vacíos correspondiente a la prueba de consolidación a deformación constante es mayor en la arcilla con menor contenido de gas, mientras que la relación de vacíos obtenida de las pruebas triaxiales con medición de presión de poro es mayor en la arcilla con menor contenido de gas. En la misma Figura IV.65 se observa que la porosidad presenta la misma tendencia que la relación de vacíos.

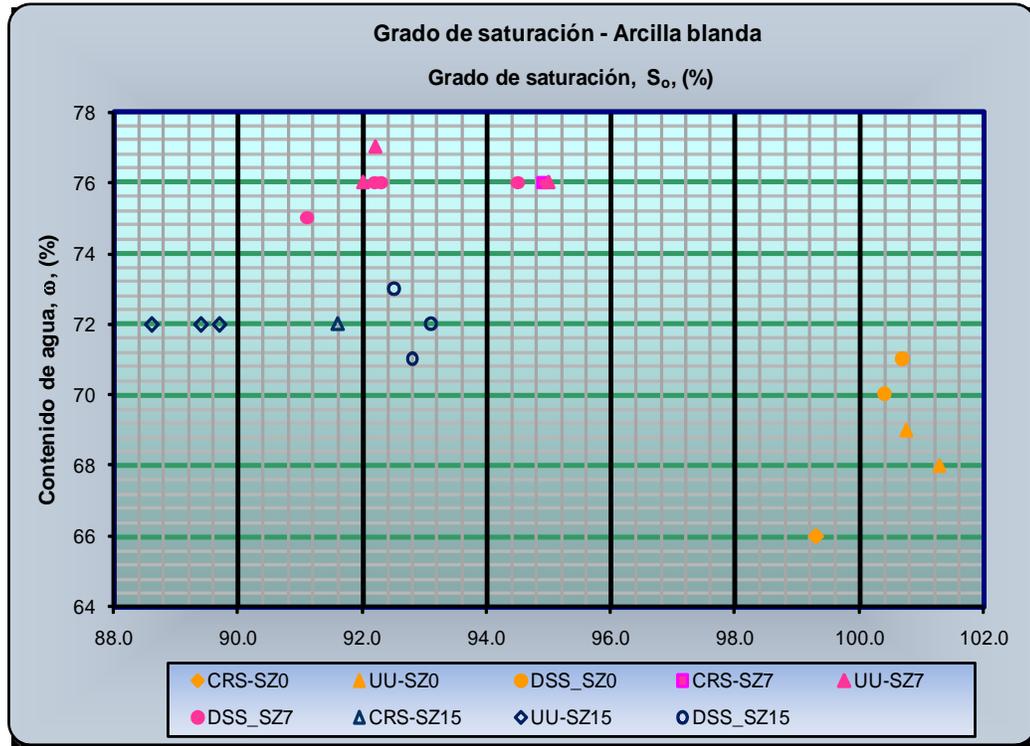


Figura IV.65. Grado de saturación de la arcilla blanda sin y con gas metano.

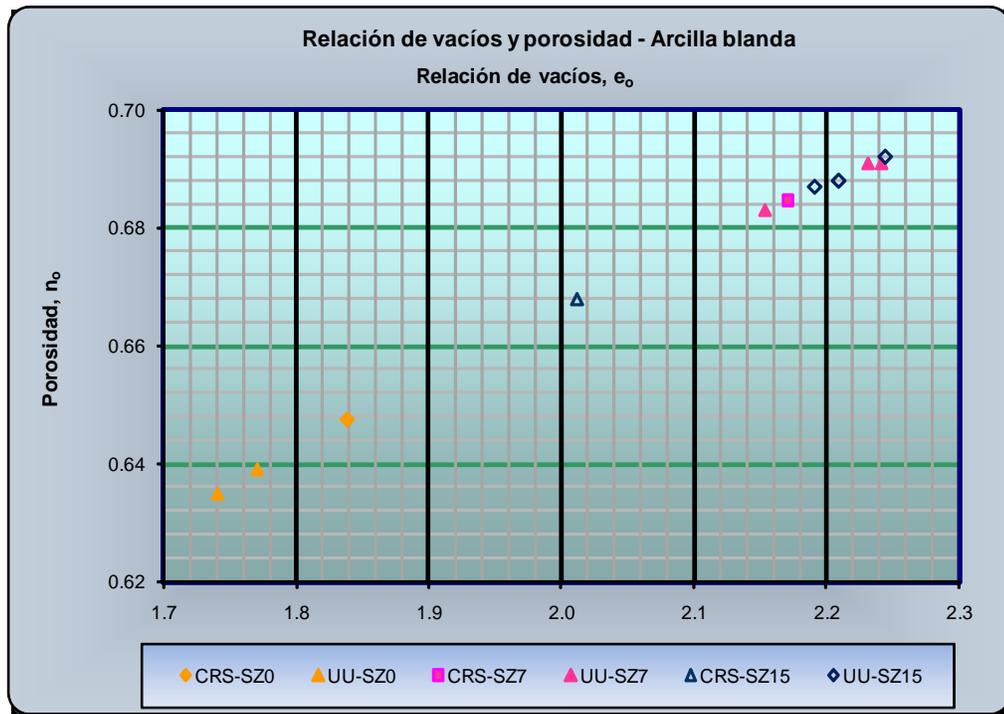


Figura IV.66. Relación de vacíos y porosidad de la arcilla blanda sin y con gas metano.

IV.5.1.6. Radiografías con Rayos X

Las radiografías con Rayos X se realizaron para observar las posibles variaciones en la estructura del suelo o la distribución del mismo en la muestra. Las radiografías con rayos X de la arcilla con gas al 7 por ciento se presentan en la Figura IV.67 y en ella se observan algunas sombras de tonalidad grisácea, indicando la presencia del gas metano en las muestras, proporcionando así una medida cualitativa de la estructura interna de las muestras de suelo. También se observa en las radiografías que como el gas forma capas y está disperso en las muestras reconstituidas de arcilla marina.

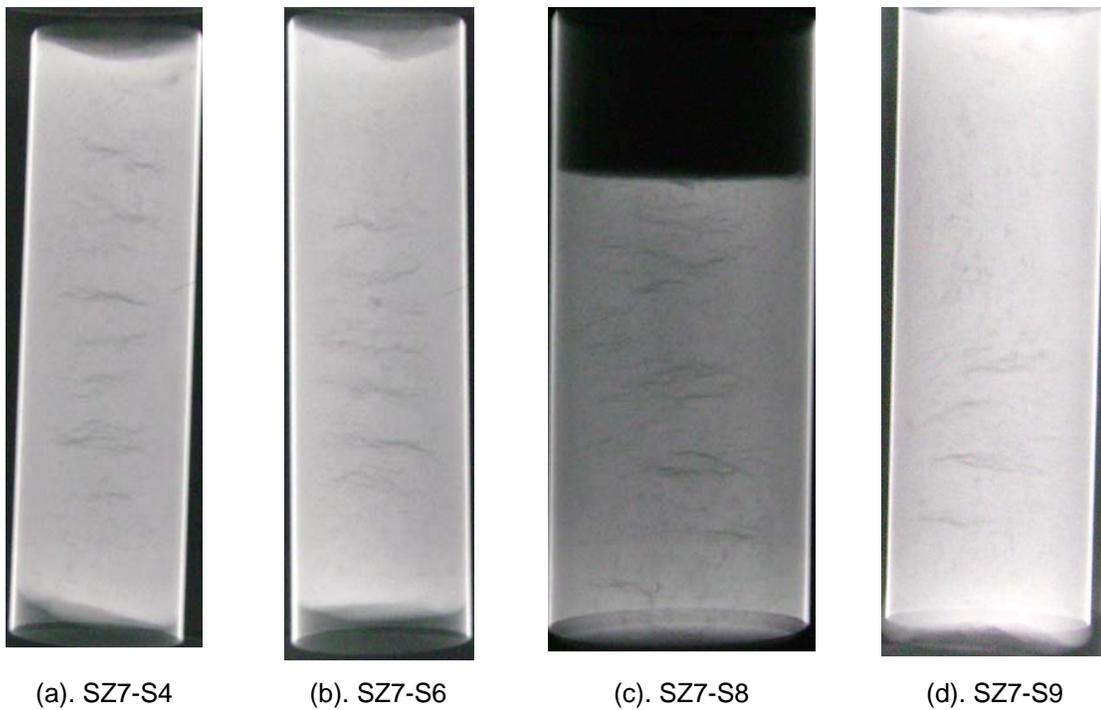


Figura IV.67. Radiografías de rayos X de la arcilla blanda con gas metano al 7 por ciento.

IV.5.2. Análisis de los resultados de la arcilla media sin y con gas metano

IV.5.2.1. Límites de Atterberg.

En la Figura IV.68 se presenta la carta de plasticidad de la arcilla media sin y con gas metano y se observa que, prácticamente, se ensayó el mismo tipo de arcilla. Promediando los valores, para efectos de comparación, se obtuvo un ligero incremento del 4 por ciento y un decremento del 14 por ciento, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, pero toda la arcilla ensayada se ubica dentro del rango de arcilla (CH) en la carta de plasticidad.

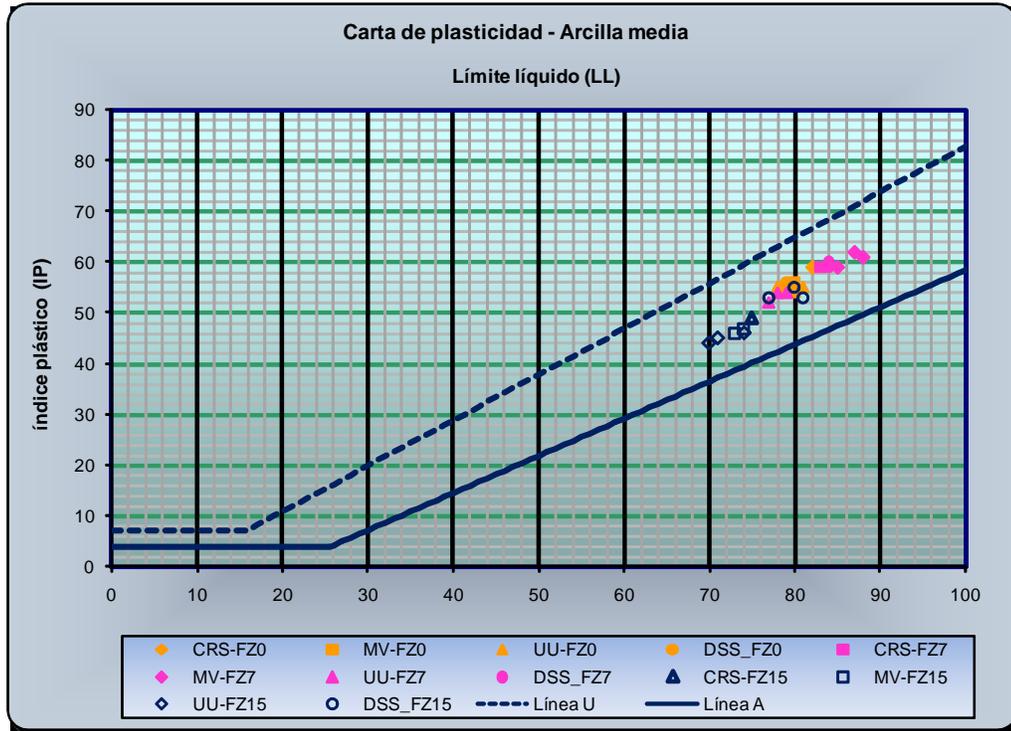


Figura IV.68. Carta de plasticidad de la arcilla media sin y con gas metano.

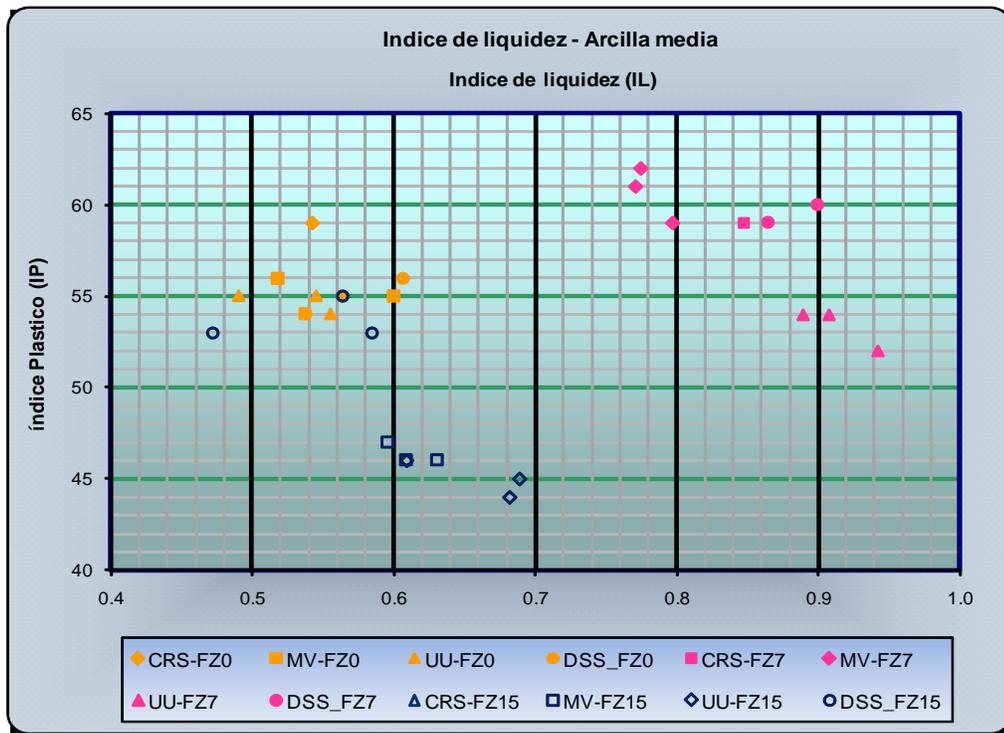


Figura IV.69 Índice de liquidez de la arcilla media sin y con gas metano.

En la Figura 69 se observa que el índice de liquidez es menor para la arcilla sin y con gas metano al 15 por ciento y es mayor para la arcilla con gas al 7 por ciento, indicando que la resistencia de la arcilla media decrece a menor contenido de gas, estos resultados son similares a los resultados de esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos de laboratorio (pruebas UU_{wg} , y pruebas estáticas de DSS, sección IV.2 y IV.4, respectivamente). Posiblemente es debido a que se han formado capas de gas durante la reconstitución de la muestra y a la mayor resistencia molecular entre las láminas de arcilla.

IV.5.2.2. Peso específico relativo de los sólidos

En la Figura IV.70 se presenta el peso específico relativo de los sólidos, correspondiente a la arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que, prácticamente, la arcilla con gas metano es el mismo y ambas son ligeramente menores que la arcilla sin gas metano, pero con base a los resultados obtenidos en este estudio y a las investigaciones realizadas empleando zeolita (Nageswaran, 1983 y Wheeler, 1986), los cambios en los valores del peso específico relativo de los sólidos no cambian significativamente las propiedades mecánicas de la arcilla, por lo que la variación se considera aceptable para interpretar las propiedades mecánicas de la arcilla sin y con gas metano.

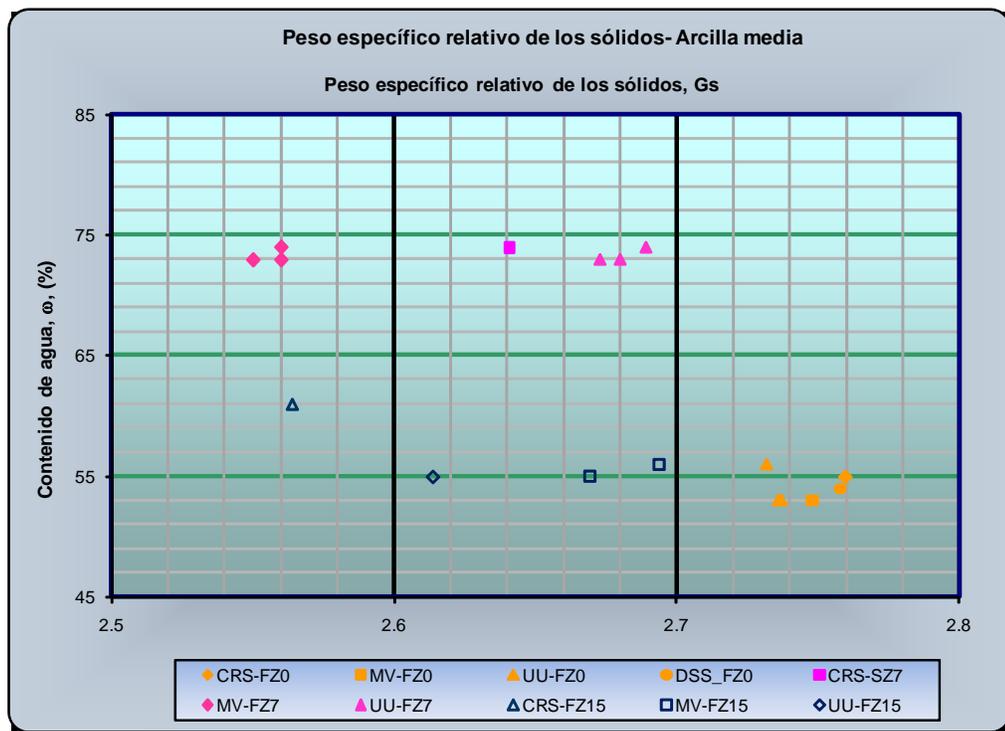


Figura IV.70. Peso específico relativo de los sólidos de la arcilla media sin y con gas metano.

IV.5.2.3. Peso volumétrico

En la Figura IV.71 se observa que la arcilla con gas al 7 por ciento es la que presenta el menor peso volumétrico total, exceptuando un valor que es similar al de la arcilla con gas al 15 por ciento, pero también se observa que los valores son muy consistentes en cada una de las muestras de arcilla reconstituida. Promediando los valores del peso volumétrico, para efectos de comparación, se obtuvo una diferencia aproximada del 13 y 7 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas.

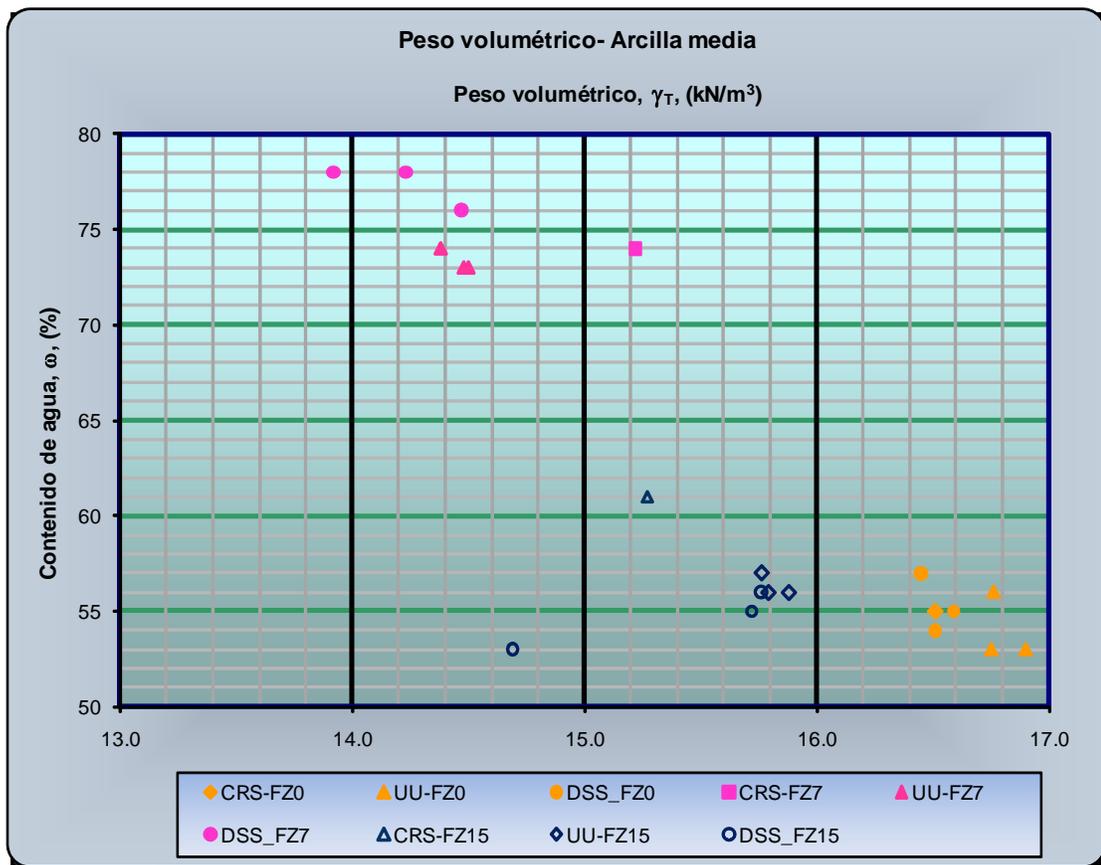


Figura IV.71. Peso volumétrico total de la arcilla media sin y con gas metano.

En la Figura IV.72 se observa que el peso volumétrico seco es mayor para la arcilla con gas al 15 por ciento que la de la arcilla con gas al 7 por ciento, pero ambos son menores que el de la arcilla sin gas, posiblemente esto es debido a la cantidad de gas en la arcilla con gas al 15 por ciento. La diferencia obtenida es de aproximadamente el 11 y 10 por ciento para la arcilla con gas metano al 7 y 15 por ciento, con respecto a la arcilla sin gas.

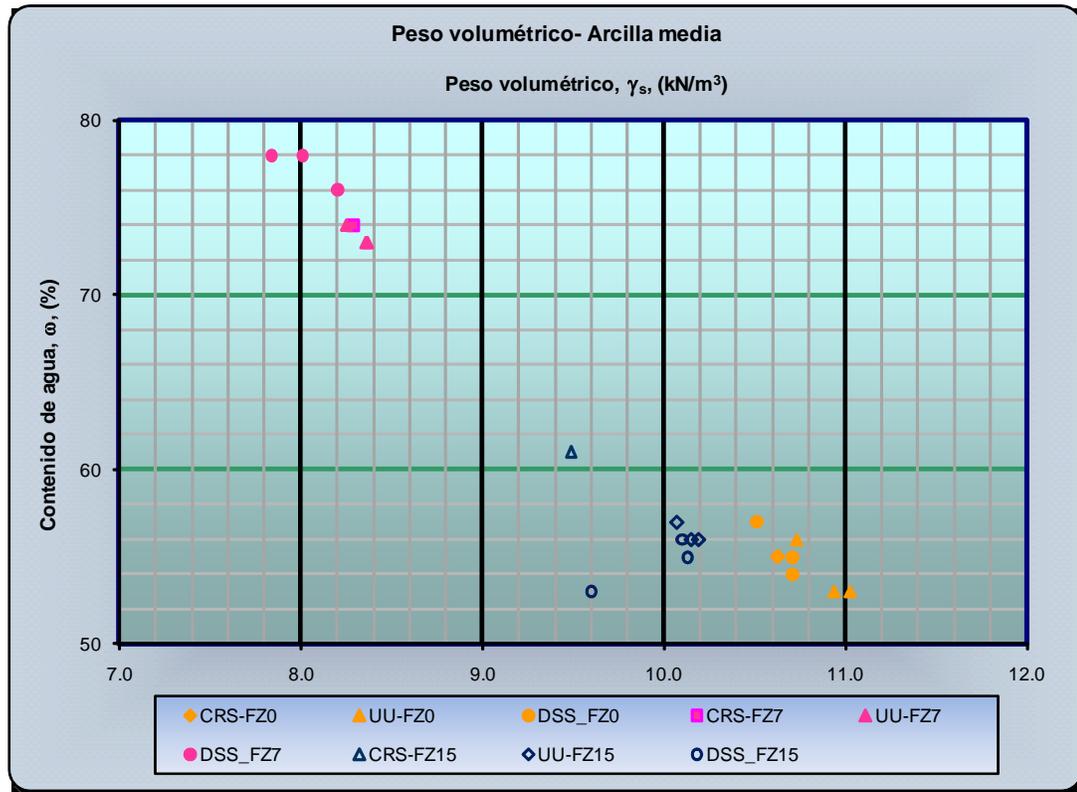


Figura IV.72. Peso volumétrico seco de la arcilla media sin y con gas metano.

IV.5.2.4. Grado de saturación

En la Figura IV.73 se observa que los menores valores del grado de saturación son menores para la arcilla con gas metano al 7 por ciento, mientras que el de la arcilla con gas al 15 por ciento son ligeramente mayores que los de la arcilla con gas al 7 por ciento, pero ambas menores que la de la arcilla sin gas. Posiblemente estos valores están influenciados por el tamaño de la muestra ensayada y/o posiblemente a que la muestras pequeñas (para las pruebas de CRS o DSS) requieren mayor manipulación y por lo tanto están más expuestas, lo que es crítico en las muestras con gas metano.

IV.5.2.5. Relación de vacíos y porosidad

En la Figura IV.74 se observa que la relación de vacíos es mayor para la arcilla con gas al 7 por ciento y menor para la arcilla con gas al 15 por ciento, pero ambas son mayores que los de la arcilla sin gas. En la misma Figura IV.73 también se observa que la porosidad presenta la misma tendencia que la relación de vacíos.

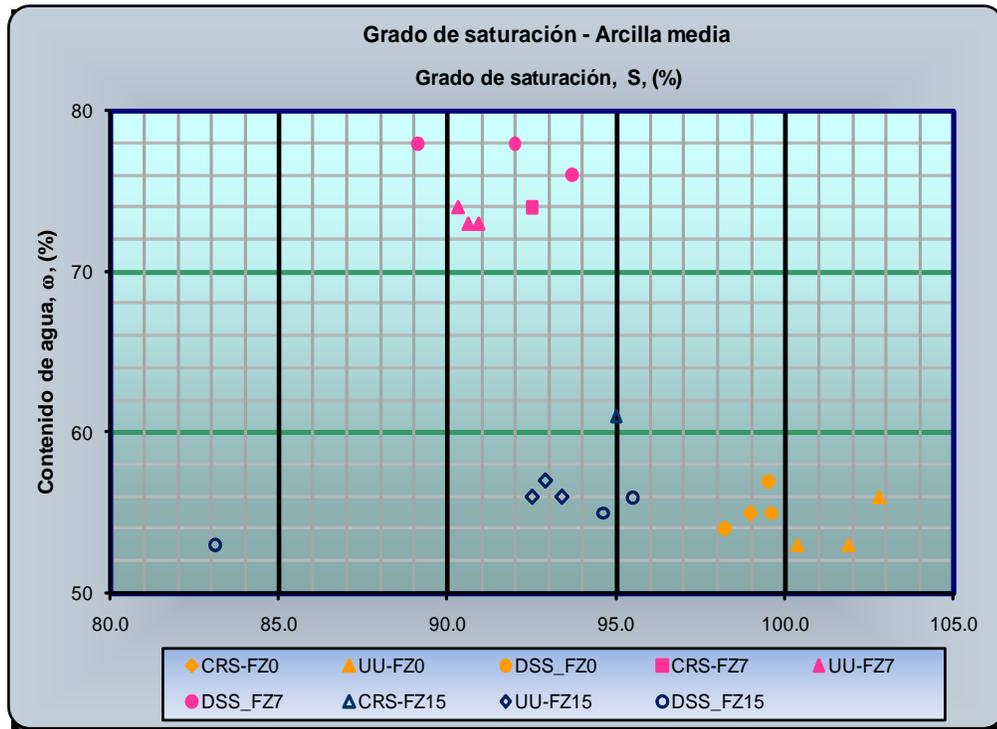


Figura IV.73. Grado de saturación de la arcilla media sin y con gas metano.

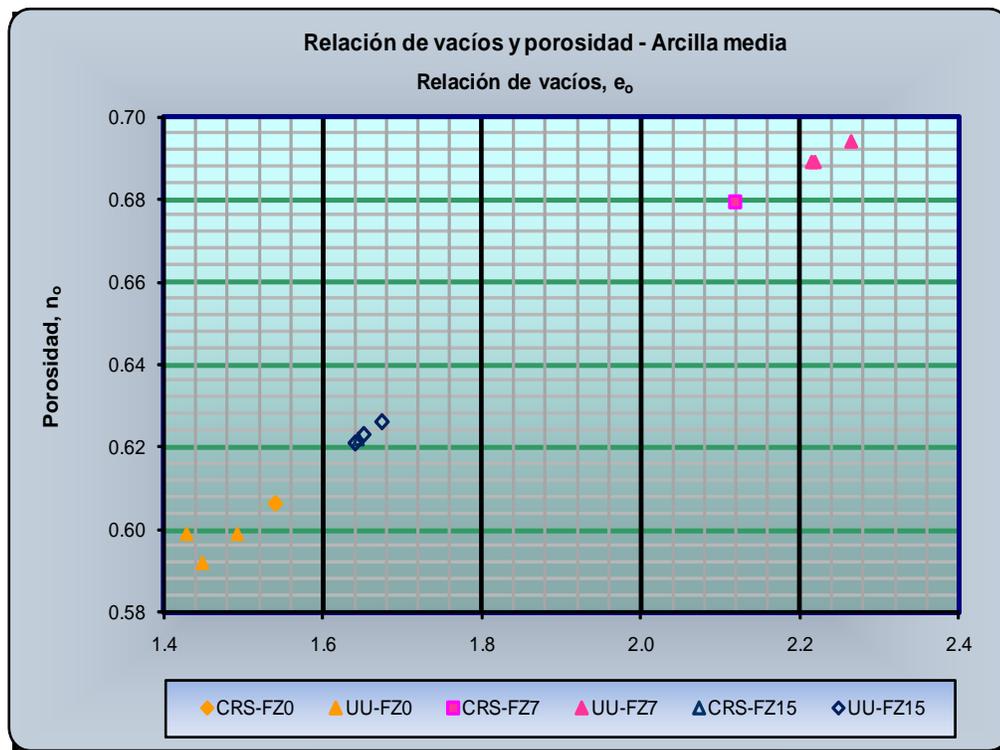


Figura IV.74. Relación de vacíos y porosidad de la arcilla media sin y con gas metano.



IV.5.2.6. Radiografías con Rayos X

En la Figura IV.75 se presenta la radiografía con rayos X de la arcilla con gas al 15 por ciento y en la muestra se observan algunas sombras de tonalidad grisácea, indicando la presencia del gas metano en forma de capas en las muestras, también se logra percibir como el gas esta disperso en la muestra.



Figura IV.76 Rayos X de la arcilla media con gas metano al 15 por ciento.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



V.1. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en este estudio, se encontró que el comportamiento de la arcilla con gas metano depende principalmente de su consistencia y de la cantidad de gas; teniendo el tipo de ensaye una fuerte influencia en el estudio del comportamiento de la arcilla. Generalmente, la arcilla blanda y media con gas presenta un comportamiento similar ante la compresibilidad, mientras que el comportamiento ante el esfuerzo cortante es diferente.

Con base en las pruebas realizadas para conocer las características de compresibilidad y de resistencia al esfuerzo cortante, se concluye que:

- a. Se forma una nueva estructura trifásica, generada por las fuerzas intermoleculares de la arcilla al confinar a las burbujas de gas metano.
- b. La consolidación inicial se desarrollo en dos etapas, estas dependen de la cantidad de gas metano en la arcilla y de los esfuerzos inducidos.
- c. Durante la consolidación se presentan zonas convexas que indican una liberación o disipación de la presión del gas. También se desarrollan zonas cóncavas que indican el desarrollo de alta presión por el gas metano y un reacomodo de las burbujas de gas dentro de la estructura de la arcilla.
- d. Se requiere mayor carga para obtener la misma consistencia que en la arcilla sin gas, a medida que se incrementa la cantidad de gas.
- e. La expansión desarrollada por la muestra depende de cuánto se sobrepresionen las burbujas de gas dentro de la arcilla y de cuanto las láminas de arcilla sean capaces de mantener al gas confinado.
- f. La presión de preconsolidación interpretada para la arcilla blanda disminuye conforme se incrementa la cantidad de gas metano en la arcilla blanda, mientras que en la arcilla media la presión de preconsolidación aumenta a medida que aumenta la cantidad de gas metano en la arcilla.
- g. La resistencia inalterada al esfuerzo cortante obtenida con las pruebas de veleta miniatura disminuye conforme se incrementa la cantidad de gas en la arcilla blanda, pero no de manera proporcional; mientras que en la arcilla media, esta se incrementa con la cantidad de gas.
- h. La resistencia inalterada al esfuerzo cortante en las pruebas triaxiales de la arcilla blanda disminuye con el contenido de gas metano, pero no proporcionalmente, mientras que en la



arcilla media la resistencia al esfuerzo cortante se incrementa con el contenido de gas metano.

- i. La presión de poro a la falla es mayor que la resistencia al esfuerzo cortante para ambas consistencias de arcilla.
- j. Durante las pruebas de corte simple directo el gas se sobrepresiona dentro de la arcilla debido a la velocidad de deformación inducida, generando una interacción del gas con el agua de poro y las láminas de arcilla, contrarrestando o amortiguando el esfuerzo cortante aplicado, es decir, se genera una «resistencia adicional».
- k. En la arcilla blanda el esfuerzo cortante normalizado disminuye con el contenido de gas metano, cuando la arcilla con gas se deforma estáticamente (5 por ciento de deformación por hora) y a 1 000 por ciento de deformación por hora.
- l. El esfuerzo cortante normalizado se incrementa cuando la arcilla blanda contiene menor contenido de gas y disminuye a mayor contenido de gas cuando se deforma a 100 por ciento de deformación por hora.
- m. Cuando la arcilla media tiene menor cantidad de gas el esfuerzo cortante normalizado disminuye cuando la arcilla se ensaya a 5 y 1 000 por ciento de deformación por hora y aumenta cuando se ensaya a 100 por ciento de deformación por hora.



V.2. Recomendaciones

El estudio presentado para conocer el comportamiento de las arcillas marinas con gas metano es básico, comparado con lo efectuado para otros tipos de suelos, como es el caso de los suelos parcialmente saturados.

Una recomendación general es que aunque en la práctica común no se trabaja con deformaciones tan grandes, en el caso de la arcilla con gas metano debería ser reconsiderado este concepto, es decir, probablemente la construcción de estructuras marinas debería ser más lenta, permitiendo que el gas se reacomode dentro de la arcilla y estas confinen al gas e interactúen para trabajar con mayores deformaciones verticales.

También se recomienda medir la cantidad expulsada de gas metano y el volumen de agua desplazado durante el desarrollo de las pruebas, así como medir y diferenciar la presión de poro generada por el gas y el agua.

V.3. Trabajos a Futuro

Con base a lo mencionado anteriormente y para ampliar lo encontrado en este estudio, se pueden realizar las siguientes investigaciones en la arcilla marina con gas metano, empleando muestras con diversos contenidos de gas metano:

- a. Estudios para conocer con qué porcentaje de gas metano se generen capas de gas.
- b. Estudios para conocer las propiedades de compresibilidad, empleando pruebas de consolidación por incrementos.
- c. Estudios para conocer las propiedades al esfuerzo cortante (pruebas de veleta miniatura, pruebas triaxiales consolidadas no drenadas y drenadas)
- d. Estudios para conocer las propiedades al esfuerzo cortante normalizadas empleando diversas velocidades de deformación.
- e. Efectuar estudios de fluencia y de permeabilidad.
- f. Estudios para conocer las propiedades dinámicas. Incluyendo pruebas cíclicas, pruebas cíclicas de corte simple directo, pruebas de columna resonante, entre otras.
- g. Estudios que incluyan modelos de difusión basados en mecánica del medio poroso disponibles en códigos de elementos finitos.

La realización de estos estudios permitirá un mejor entendimiento del comportamiento de la arcilla con gas y se podrán plantear posibles leyes generales de comportamiento, el conjunto de esta información permitirá racionalmente determinar mejores parámetros de diseño.



Bibliografía

- American Society for Testing and Materials. (2006, 2007, 2008) «Soil and Rock; Building Stones; Geotextiles». *Annual Book of ASTM Standards, Vols. 4.08 y 4.09*, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania. December 2006.
- Anderson, A. L., and Hampton, L. D. (1980). «Acoustic of gas-bearing sediments». Soc. Am. 67, No 6, Pp. 1865-1903.
- Badillo, Juárez E. y Rodríguez, Rico A. (1992). «Fundamentos de la Mecánica de Suelos». Mecánica de Suelos. Tomo I. Edit. Limusa. Tercera Edición, Decimocuarta reimpresión.
- Barden, L, and Sides, G. R. (1970). «The diffusion or air trough the pore water of soils». Proc. 3rd Asian Reg. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng 1, 135-138.
- Barrera, N., P. y Hernández, V. A. (1998). «Reporte de la actividades desarrolladas en la plataforma AKAL-H». Reporte interno, Instituto Mexicano del Petróleo. 6 de Abril.
- Bea, R. G., and Arnold, P. (1973). «Movements and Forces Developed by Wave Induced Slides in Soft Clays». Preprints, Offshore Technology Conference, Houston, April 1973.
- Becker, D.E., Crooks, J.H.A., Been, K., y Jefferies, M.G. (1987), «Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays». Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, pp. 549-564.
- Best, A. I.; Clayton, C. R. I., Longva, O., and Szuman, M. (2003). «The Role of Free Gas in the activation of Submarine Slides in Finneidfjord», Submarine Mass Movements and Their Consequences. 1st International Symposium. Editores: Locat, J., Mienert, J, and Boisvert, L. Kluwer Academic Publishers, London. Pp. 491-498.
- Bhasin, R. N. and Leland M. K., Jr. (1978) «Methane in Marine Sediments» Research and Development, Report No. 0576-930. McClelland Engineers, Inc. Geotechnical Consultants, Houston, Texas.
- Bishop, A. W., Alpan, I., and Donald B. (1960). «Factors Controlling the Strength of Partially Saturated Cohesive Soils». ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. University of Colorado. June, 1960.
- Bishop, A. W y Bjerrum, L. (1960). «The Relevance of the Triaxial test to the Solution of Stability Analysis». Norwegian Geotechnical Institute Publication No. 34. Oslo.
- Bishop, A.W. y Blight, G.E. (1963). «Some Aspects of Effective stress in Saturated and Partly Saturated Soils». Geotechnique 13. No. 3. 177-197
- Bishop, A. W and Donald, I. B. (1961). «The Experimental Study of Partly Saturated Soils in the Triaxial Apparatus». Preg. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Pp. 1, 13-21.
- Bishop, A. W. y Henkel, D. J.(1962). «The measurements of soil properties in the triaxial test», London. Edit. Edward Arnold.
- Blatz, J. A. y Graham J. (2003). «Elastic-Plastic Modelling of Unsaturated Soil using results from a new Triaxial Test with Controlled Suction». Géotechnique 53, No. 1. Pp 113-122.
- Blight, G. E. (1967). «Effective Stress Evaluation for Unsaturated Soils». Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 93, No. SM2, March, 1967. Pp. 125-149.



- Chang, C. S. and Duncan, J. M. (1983). «Consolidation analysis for partly saturated caly by using an elastic –plastic effective stress-strain model». Int. J. Num, Analy. Methods. Geomecha. 7, No 1, 39-55.
- Christian H.A. and Cranston R.E. (1997) «A Methodology for Detecting Free Gas in Marine Sediments». Canadian Geotechnical Journal. Volume 34: Pp. 293-304.
- Claypool, G. E. and Kaplan, I. R. (1974) «The Origin and Distribution of Methane Gas in Marine Sediments». Natural Gases in Marine Sediments. Marine Science Volumen 3. Ed. I. R. Kaplan, Plenum Press. EUA. Pp. 99-139.
- Coleman, J. M., Prior D. B., and Garrison L. E. (1978). «Submarine Landslides in the Mississippi River Delta». Proceedings. Offshore Technology Conference. Houston. No. OTC 3170. Pp. 1067–1074.
- Crawford, C. B. (1986) «State of the Art: Evaluation and Interpretation of Soil Consolidation Tests,» Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892, R. N. Yong and F. C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 71-103.
- Cunningham. M. R., Ridley, A. M., Dineen, K. y Burland, J. B. (2003). «The Mechanical Behaviour of a Reconstituted Unsaturated Silty Clay». Géotechnique 53, No. 2. Pp 183-194.
- Das Braja M. (1989). «Soil Mechanics Laboratory Manual» Engineering Press, Inc. San Jose California. United States of America.
- Denk W. E.; Dunlap A. Wayne; Bryant, William R; Milberger, Lionel J; and Whelan Thomas J. (1981). «A pressurized Core Barrel for Sampling Gas-Charged Marine Sediments». Proceedings. Offshore Technology Conference. Houston. No. OTC 4120. Pp. 43 – 47.
- Escario, V y Saez, J. (1986). «The Shear Strength of Partly Saturated Soils». Géotechnique 36. No. 3. Pp 53-456.
- Esrig, M. I. and R. C. Kirby. (1977). «Implication of Gas Content for Predicting the Stability of Submarine Slopes». Marine Geotechnology, 3, Marine slope stability. Pp. 81-100.
- Foster R. H, (1971). «Behaviour of Kaolin Fabric Under Shear Loading at Low Stress», in Stress-Strain behaviour of soils. Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge University. Edited by Parry R. H. G. Pp. 81-88.
- Fredlund, D. G., y Morgenstern, N. R. (1977). «Stress state variables for unsaturated soils». ASCE Journal of the Geotechnical Engineering División, 103: 447-466.
- Fredlund D. G. (1979). «Appropriate concepts and technology for unsaturated soils». Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16, pp. 121-139
- Fredlund, D. G. (1985).«Soil Mechanics principles that embrace unsaturated soils» Proc 11th Int. Conf. Soil Mehc. Fd. Engng, San Francisco 2, 465-472.
- Fugro-McClelland Marine Geosciences, Inc. Sucursal Venezolana Registrada (2001). «Final Data Report. Geotechnical Site Investigation NGL Tank. Atlantic LNG Expansion Project. Point Fortin, Trinidad» Report No. 01/FT/577-2.
- Fugro Chance de México S. A. de C. V. (2002). «Investigación Geotécnica y Geoquímica, Sondeos AKAL-H (Gas 2), AKAL-H (Gas 3), AKAL-H (Gas 1) y AKAL-C Tripode (Gas), Bahía de Campeche, México» Reportes para PEMEX Números 0201-4642-1, .0201-4642-2, 0201-4642-3 y 0201-4642-7.
- Gan, J. K. M; Fredlund, D.G. y Rahardjo H. (1988). «Determination of the Shear Strength Parameters of an Unsaturated Soil using the Direct Shear Test». Canadian Geotechnical Journal, 25. Pp 500-510.



- Gardner, T. N. and Goringe, M. J. (1988). «The Measurement of Gas Bubble Size Distribution in a Three Phase Laboratory Gassy Soil» *Geotechnique Testing Journal*, GTJODJ, Volume 11, No 1. Pp. 49-55.
- Galvan, G. E. (1988). «Reporte de inspección de las instalaciones en la plataforma AKAL-GR». Reporte interno. Instituto Mexicano del Petróleo. Junio.
- Galván G. E.; García, V. V. M.; González M. C. Ma., y Guzmán G. M. A. (1988) «Estudio de las Fuentes, distribución y Efectos de Hidrocarburos por Arribazones en las Costas de los Estados de Veracruz, Tabasco y Campeche». Informe sobre la presencia de hidrocarburos del petróleo en playas de isla del Carmen y península de Atasta, Campeche. Marzo. Informe Interno. Instituto Mexicano del Petróleo.
- Gibbs, H. J., Hilf, J. W., Holtz, W. G., y Walker, F. C. (1960). «Shear Strength of Cohesive Soils». *ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. University of Colorado. June, 1960.
- Gold, T. and Soter, S. (1980). «The deep earth-gas hypothesis. *Scient. Am.*, 242, 154-161.
- «Shear Strength of Cohesive Soils». *ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. University of Colorado. June, 1960.
- Holmes, M. I.; Cline J. and Janice, L. J. (1978). «Geological Setting of the Norton Basin Gas Seep». *Offshore Technology Conference*. No. OTC 3051. Houston, Texas. 73-80.
- Jennings, J. E. B. and Burland, J. B. (1962) «Limitations to the Use of Effective Stress in Partly Saturated Soils». *Geotechnique* 12. No. 2, Pp. 125.144.
- King, L. H. and MacLean, B. (1970). «Pockmarks on the Scotian Shelf». *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 3141-3148
- Kvenvolden, K. A.; Nelson, C. H.; Thor, D. R.; Larsen, M. C.; Redden, G. D.; Rapp, J. B., and Des Marais, D. J. (1979). «Biogenic and Thermogenic Gas in Gas-Charged Sediment of Norton Sound, Alaska». OTC 3412, Houston, Texas. Pp. 479-486.
- Lee, H. J. (1985). «State of the Art: Laboratory Determination of the Strength of Marine Soils, Strength of Marine Sediments: and in In-Situ Measurements, ASTM STP 883, R. C. Chaney and K. R. Demars, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pp. 181-250.
- Leonards, G. A. y Andersland O. B. (1960). «The Clay-Water System and the Shearing Resistance of Clays». *ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. University of Colorado. June, 1960.
- Low, P.F. (1961) «Physical chemistry of clay-water interaction. Advances in Agronomy» 13: 269-327.
- Lunne Tom, Isa, Omar Md., and Tan Melvyn. (1996). «Shallow Gas Problem at Duyong B Offshore Malaysia». The 11th Offshore South East Asia Conference. OSEA96065. 24-27 September. Singapore.
- Lunne Tom (1999). Personal communication.
- Maâtouk, A., Leroueil, S. y La Rochelle P. (1995) «Yielding and Critical State of a Collapsible Unsaturated Silty Soil». *Géotechnique* 45, No. 3. Pp 465-477.
- Matyas, El L. and Radhakrishna, H. S. (1968). «Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils»_ *Geotechnique* 18. No 4, Pp. 432-448.
- Mokkelbost, K. H. (1996). «Shallow Gas Detection Using NGL's BAT-Probe». The Fourth International Conference "Gas in Marine Sediments" Environmental Impact. September 28-30. Varna Bulgaria.



- Nava C. Raúl, Audibert M. E. Jean, Torres A. Carlos R., DeGraf Willard; y Ruckman Paul[†] (2008). «Efectos del gas en la compresibilidad de las arcillas marinas del Golfo de México». XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Aguascalientes, Ags., México. Noviembre.
- Nelson, Hans; Kvenvolden, Keith A.; and Clukey, Edward C. (1978), «Thermogenic gases in near-surface sediments of Norton Sound, Alaska». OTC 3354, Houston, Texas. Pp. 2623-2633.
- Neuber, H. (1946). «Theory of noten stresses». Edwards Bros., Ann Arbor, MI.
- Nageswaran, S. (1983). «Effect of Gas Bubbles on the Sea Bed Behaviour». Doctor Philosophy Thesis. Oxford University. England.
- Okusa, S. (1985). «Measurements of wave-induced pore pressure in submarine sediments under various marine conditions» Mar. Geotechnical. 119 – 144.
- Olson, R.E., «State of the Art: Consolidation Testing,» Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892, R. N. Yong and F. C. Towsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pp. 7-70.
- Ostmo, S. R.m Butenko, G., and Bryn, P. (1998). «Shallow Gas in the Oseberg, Brage and Troll Fields, North Sea, 60° 30' N». Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference May 2-5, OTC 5714.
- Prior, D. B., and Suhayda, J. N. (1979). «Application of infinite slope analysis to subaqueous sediment instability Mississippi Delta». Eng. Geology 14, pp. 1-10.
- Quirke, T. T. (1930). «Spring pits; sedimentation phenomena». Journal of Geology 38, 88–91.
- Rad, S. Nader, and Lunne, Tom. (1994). «Gas in soil I: Detection and η -Profiling». Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol 120, No. 4, April 1994, pp. 697-715.
- Rad, S. Nader, Vianna J. D. Antonio, and Berre Toralv. (1994). «Gas in soil II: Effect of Gas on Undrained Static and Cyclic Strength of Sand». Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol 120, No. 4, April, Pp. 716-736.
- Rakhi, N. B. and Leland M. K. Jr. (1978). «Methane in Marine Sediments». Research and Development. Reporte No. 0576-930. McClelland Engineers, Inc. Houston, TX. Mayo de. EUA.
- Rau, G. y Chaney, R. C. (1988). «Triaxial Testing of Marine Sediments with High Gas Contents» in advanced triaxial testing of soil and rock. Edited by R. T. Donaghe, R. C. Change, and M. L. Silver. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 977. Pp 338-352.
- Schubel, J. R. (1974a). «Gas Bubbles and the Acoustically Impenetrable, or Turbid, Character of some Estuarine Sediments». Natural Gases in Marine Sediments. Marine Science Volumen 3. Ed. I. R. Kaplan, Plenum Press. EUA. Pp. 275-298.
- Schubel, J. R. (1974b). «Seabed Pockmarks and Seepages. Natural Gases in Marine Sediments». Marine Science Volumen 3. Ed. I. R. Kaplan, Plenum Press. EUA. Pp. 275-298.
- Schuurman, E. (1966) «The Compressibility of an Air/Water Mixture and a Theoretical Relation Between the Air and Water Pressures». Géotechnique 16. No. 4. Pp 269 – 281.
- Sills, G. C., Wheeler, S. J., Thomas S.D. and Gardner T. N. (1991) «Behavior of Offshore Soils Containing Gas Bubbles». Géotechnique 41. No. 2, Pp. 227-241.
- Smith R. E., and Wahls H. E. «Consolidation Under Constant Rates of Strain». Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceeding ASCE, Vol. 95, No SM 2, March, 1969, pp 519 – 539.



- Smith, M. E.; Rieken, M. K., Streu, D. J.; Gaona M. T., and Sousa, J. (1988). «Banzala Development Plan: Overcoming the Shallow Gas Hazard» Offshore Technology Conference Proceedings OTC 8893.
- Smith Ronald E., Wahls, Harvey E. «Consolidation Under Constant Rates of Strain». Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. Vol. 95. No. SM2. Proceedings Paper 6452, Marzo 1969. pp 519-539.
- Sparks, A.D. W. (1963). «Theoretical considerations of stress equation for partly saturated soils». Proc. 3rd African Conf. Soil. Mech Fdn. Engng, Salisbury, Rhodesia 1. Pp. 215-218.
- Süklje L. (1969). «Rheological Aspects of Soil Mechanics». Wiley-Interscience. Great Britain.
- Terzaghy, K. (1944). «Theoretical soil mechanics» Pp 305-308. London, Wiley.
- Thomas, S.D. (1987). «The consolidation behaviour of gassy soil». D.Phil. Thesis, University of Oxford, United Kingdom.
- Vanapalli, S. K.; Fredlund, D. E.; Pufahl, D. E. y Clifton A. W. (1996). «Model for the Prediction of Shear Strength with respect to Soil Suction». Canadian Geotechnical Journal, 25. Pp 500-510.
- Vanoudeheusden, E., Sultan, N., and Cochonat, P. (2003). «Hydro-Mechanical Behaviour of Gassy Soils», Submarine Mass Movements and Their Consequences. 1st International Symposium. Editores: Locat, J., Mienert, J, and Boisvert, L. Kluwer Academic Publishers, London. Pp. 1451-153.
- Wheeler, S. J. (1986). «The Stress-Strain Behaviour of Soils Containing Gas Bubbles». D. Phil. Thesis, Oxford University. United Kingdom.
- Wheeler, S. J. (1988). «The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles». Géotechnique 38, No. 3, 399-413.
- Wheeler S. J., Sham W. K., y Thomas, S. D. (1990). «Gas pressure in unsaturated offshore soils». Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, pp. 79-89.
- Wheeler, S. J. y Sivakumar, V. (1995). «An Elasto-Plastic State Framework for Unsaturated soil». Géotechnique 45, No. 1. Pp 35-53.
- Whelan, T. III, Coleman, J.M., Suhayda, J. N., and Garrison, L E. (1975). «The Geochemistry of Recent Mississippi River Delta Sediments: Gas Concentration and Sediment Stability». Proceedings. Offshore Technology Conference. Houston. No. OTC 2342. Pp 71 – 84.
- Whelan, T. III., Coleman, J. M., Suhayda, J. N. and Roberts, H. H. (1977). «Acoustical Penetration and Shear Strength in Gas-Charged Sediment». Marine Geotechnology Volume 2. Marine Slope Stability. Pp. 147-159
- Whelan, T. III; Ishmael, J. T. and Rainey, G. B. (1978). «Gas-Sediment Interaction in Mississippi Delta Sediments». Offshore Technology Conference. Proc. 10th. No. OTC 3166, Houston, Tex. Pp. 1029-1036.
- Whelan, T. (1979) «Methane in Marine Sediments» Lectures Notes for Technical Session Presented to McClelland Engineers, Inc., Houston.
- Wissa E. Z. Anwar, Christian John T., Davis Edward H. y Heiberg Sigurd. «Consolidation at Constant Rate of Strain. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division», ASCE. Vol. 97. No. SM10. Proceedings Paper 8847. Octubre 1971. pp 1393-1411.
- Wroth, C. P., and Houlsby, G. T. (1985). «Soil mechanics: property characterization and analysis procedure». Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Fdn Engng, San Francisco 1, Pp. 1-55.



Apéndice A

Resultados de las pruebas de consolidación, obtenidos durante la reconstitución de las muestras de arcilla sin y con gas metano





Índice

A.1. Introducción	A-1
A.2. Análisis de los resultados de la arcilla marina blanda	A-2
A.2.1. Arcilla marina blanda sin gas metano (SZ0)	A-2
A.2.2. Arcilla marina blanda con zeolita saturada con gas metano al 7 por ciento (SZ7)	A-4
A.2.3. Arcilla marina blanda con zeolita saturada con gas metano al 15 por ciento (SZ15)	A-7
A.3. Análisis de los resultados de la arcilla marina media	A-14
A.3.1. Arcilla marina media sin gas metano (FZ0)	A-14
A.3.2. Arcilla marina media con zeolita saturada con gas metano al 7 por ciento (FZ7)	A-15
A.3.3. Arcilla marina media con zeolita saturada con gas metano al 15 por ciento (FZ15)	A-19
A.4. Referencias	A-24

Relación de Tablas y Figuras

Tabla	Página
Tabla A.1. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina blanda sin gas (SZ0).....	A-3
Tabla A.2. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina blanda con gas al 7 por ciento (SZ7).....	A-8
Tabla A.3. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina blanda con gas metano al 15 por ciento (SZ15).....	A-14
Tabla A.4. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina media sin gas metano.....	A-15
Tabla A.5. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina media con gas metano al 7 por ciento (FZ7).....	A-18
Tabla A.6. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina media con gas metano al 15 por ciento (FZ15).....	A-23



Figura	Página
Figura A.1. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin gas metano, obtenidas durante el primer (SZ0C1) y segundo (SZ0C2) intervalo de carga.....	A-2
Figura A.2. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin gas metano, obtenidas durante el tercer (SZ0C3) y cuarto (SZ0C4) intervalo de carga	A-3
Figura A.3. Curva de consolidación, arcilla marina blanda SZ7C1	A-4
Figura A.4a. Curvas de consolidación, arcilla marina blanda con SZ7C2 y SZ7C3 ...	A-5
Figura A.4b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ7C3	A-6
Figura A.5. Curva de consolidación, arcilla marina blanda SZ7C4.....	A-7
Figura A.6a. Curva de consolidación, arcilla marina blanda SZ15C1	A-8
Figura A.6b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ15C1	A-9
Figura A.7a. Curva de consolidación, arcilla marina blanda SZ15C2.....	A-10
Figura A.7b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ15C2	A-11
Figura A.8a. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda con gas metano al 15 por ciento de gas, obtenida durante el tercer y cuarto intervalos de carga.....	A-12
Figura A.8b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ15C3	A-13
Figura A.8c. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ15C4.....	A-13
Figura A.9. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ0C1 y FZ0C2.	A-14
Figura A.10. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ0C3 a FZ0C61..	A-15
Figura A.11. Curva de consolidación, arcilla marina media FZ7C1.	A-16
Figura A.12. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ7C2 a FZ7C4.	A-17
Figura A.13. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ7C5 y FZ7C6	A-18
Figura A.14. Curva de consolidación, arcilla marina media FZ15C1.	A-19
Figura A.15. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ15C2 y FZ15C3	A-20
Figura A.16a. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ15C4 a FZ15C6	A-21
Figura A.16b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, FZ15C4 y FZ15C5.....	A-22



A.1. Introducción

Las pruebas de consolidación unidimensional por incrementos de carga se realizaron para obtener muestras reconstituidas de arcilla marina con consistencia blanda y media sin y con zeolita saturada con gas metano al 7 y 15 por ciento en peso. Estas pruebas se apegaron, lo más posible, a las recomendaciones indicadas en la norma D2435-07, emitida por la ASTM.

Durante la prueba de consolidación, la muestra de lodo arcilloso marino se restringió lateralmente empleando una cámara de acrílico y se cargó axialmente; cada incremento de carga se aplicó hasta obtenerse el 100 por ciento de consolidación primaria y se iniciara la consolidación secundaria o hasta que la deformación experimentada por el lodo arcilloso marino fuera muy pequeña, exceptuando al último intervalo de carga que se prolongó para que se desarrollara un poco el tramo de la consolidación secundaria.

Durante el proceso de consolidación del lodo arcilloso marino sin gas metano, se efectuaron registros del cambio de altura de la muestra a los intervalos de tiempo recomendados por la norma D2435-07. En lo que respecta a la arcilla con gas, los intervalos de tiempo utilizados se acortaron con la finalidad de obtener una mejor configuración de la curva de consolidación y observar a detalle los posibles cambios que se pudieran presentar durante cada intervalo de carga.

Las hipótesis indicadas en la norma ASTM D2435-07, están basadas en la teoría de Terzaghi y se han adaptado a este estudio; las hipótesis empleadas son:

- a). El lodo arcilloso marino está homogéneamente sobresaturado y tiene las mismas propiedades;
- b). El flujo del agua de poro se presenta solamente en la dirección vertical;
- c). La compresibilidad de la partícula y del agua de poro es insignificante, comparada con la estructura del suelo;
- d). La relación esfuerzo-deformación es lineal para cada incremento de carga; y
- e). La relación de permeabilidad y compresión del suelo es constante para cada incremento de carga.

En lo que respecta a la arcilla con gas metano se siguieron, básicamente, las mismas consideraciones establecidas para la arcilla sin gas con algunas ligeras modificaciones y son:

- a). El lodo arcilloso está homogéneamente sobresaturado con agua y gas y se considera que las propiedades son homogéneas en toda la muestra;



- b). El flujo del gas y del agua de poro se produce solamente en la dirección vertical;
- c). La compresibilidad de la partícula y del agua de poro es insignificante, comparada con el gas y la estructura del suelo.
- d). La relación esfuerzo-deformación es lineal para cada incremento de carga; y
- e). La relación de permeabilidad y compresión del suelo es constante para cada incremento de carga.

A.2. Análisis de los resultados de la arcilla marina blanda

A.2.1. Arcilla marina blanda sin gas metano (SZ0)

En la Figura A.1 se presentan las dos primeras curvas de consolidación que corresponden a la arcilla marina blanda sin gas, obtenidas durante los dos primeros intervalos de carga (SZ0C1 = 6.21 kN/m² y SZ0C2 = 12.07 kN/m²).

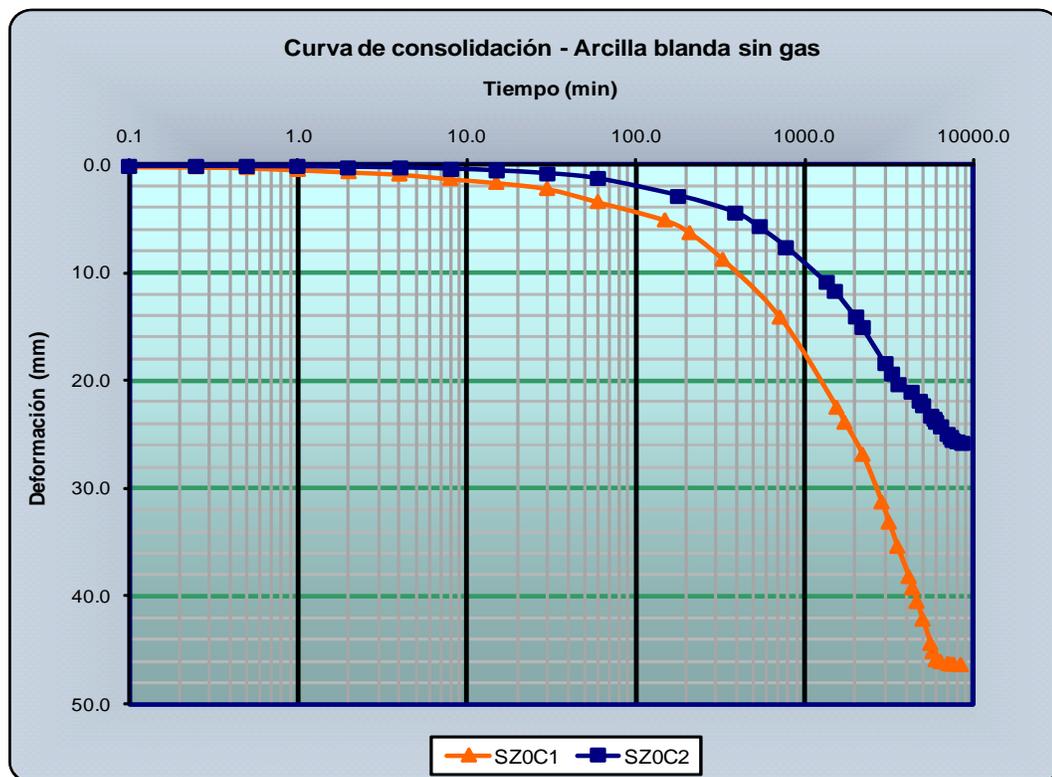


Figura A.1. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin gas metano, obtenidas durante el primer (SZ0C1) y segundo (SZ0C2) intervalo de carga.

En las curvas SZ0C1 y SZ0C2 no se observa ninguna variación en la forma y comportamiento al planteado por Terzaghi (1956); es decir, se observa la etapa de consolidación primaria y el inicio de la secundaria, etapas que constituyen una curva de consolidación. Este



comportamiento, también se presenta en las curvas de consolidación correspondientes a los dos últimos intervalos de carga, Figura A.2. (SZ0C3 = 24.13 kN/m² y SZ0C4 = 48.27 kN/m²).

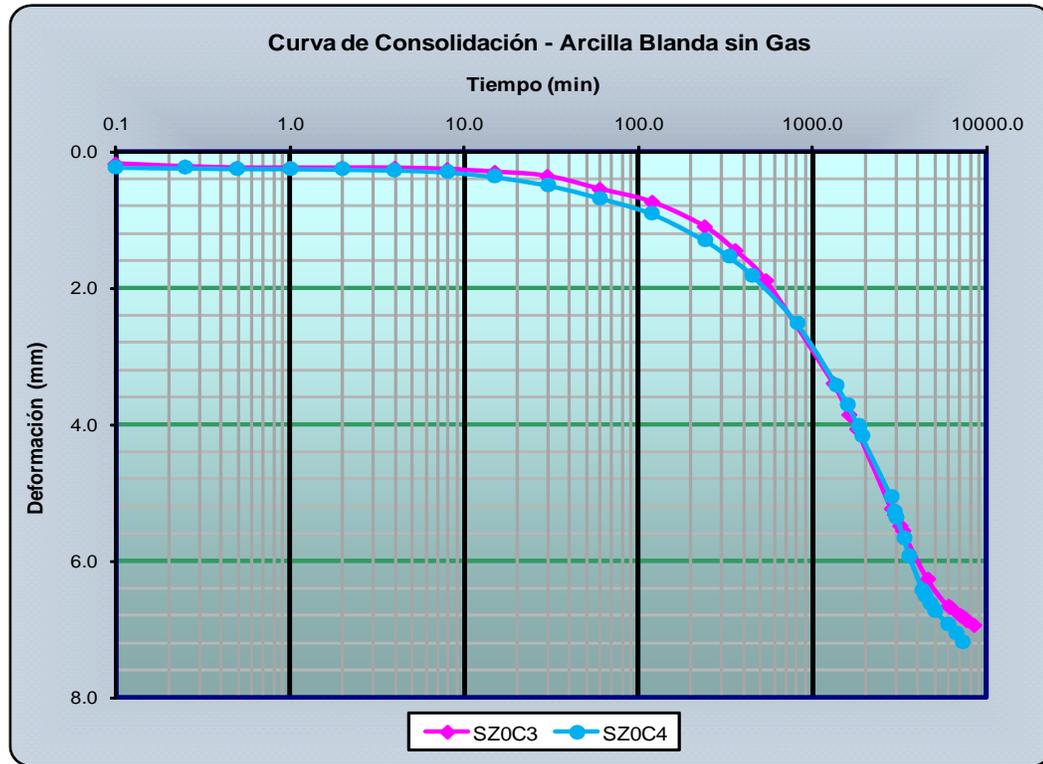


Figura A.2. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda sin gas metano, obtenidas durante el tercer (SZ0C3) y cuarto (SZ0C4) intervalo de carga.

En resumen, para obtener una arcilla marina blanda sin gas metano se emplearon 22.8 días para consolidar el lodo arcilloso marino y se generó una deformación vertical de 86.35 mm. Los tiempos empleados y las deformaciones verticales obtenidas durante la aplicación de cada uno de los intervalos de carga, utilizados para consolidar el lodo arcilloso marino y obtener una arcilla marina con consistencia blanda se presentan en la Tabla A.1.

Tabla A.1. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina blanda sin gas (SZ0).

Intervalo de Carga (kN/m ²)	Tiempo para consolidación (min)	Deformación Vertical (mm)
SZ0C1 (6.21)	8 490	46.39
SZ0C2 (12.07)	8 640	25.83
SZ0C3 (24.13)	8 430	6.95
SZ0C4 (48.27)	7 260	7.18
Total	32 820	86.35



A.2.2. Arcilla marina blanda con zeolita saturada con gas metano al 7 por ciento (SZ7)

En la Figura A.3 se presenta la curva de consolidación de la arcilla marina con zeolita saturada con gas metano al 7 por ciento, obtenida durante el primer intervalo de carga ($SZ7C1 = 6.21 \text{ kN/m}^2$) y se observa un desarrollo similar al establecido por la teoría de consolidación, excepto que una porción en la etapa de la consolidación primaria es ligeramente cóncava. Esta concavidad indica que el gas metano es capaz de soportar, por cierto tiempo, parte de la carga y transferirla parcialmente al agua y a las partículas de arcilla, hasta que se logra el equilibrio en el sistema, i. e. la carga es soportada por las tres fases de la estructura del suelo, obteniéndose como resultado de este comportamiento, una arcilla con menor consistencia al compararla con la arcilla sin gas, es decir, se genera una reducción de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, debido a que el esfuerzo efectivo resultante es menor. La concavidad de la curva $SZ7C1$ inicia aproximadamente a los 1000 minutos (16.7 horas) y termina a los 4140 minutos (69.0 horas) después de aplicada la carga, es decir, se requirieron 2.18 días para efectuarse la transferencia parcial de carga.

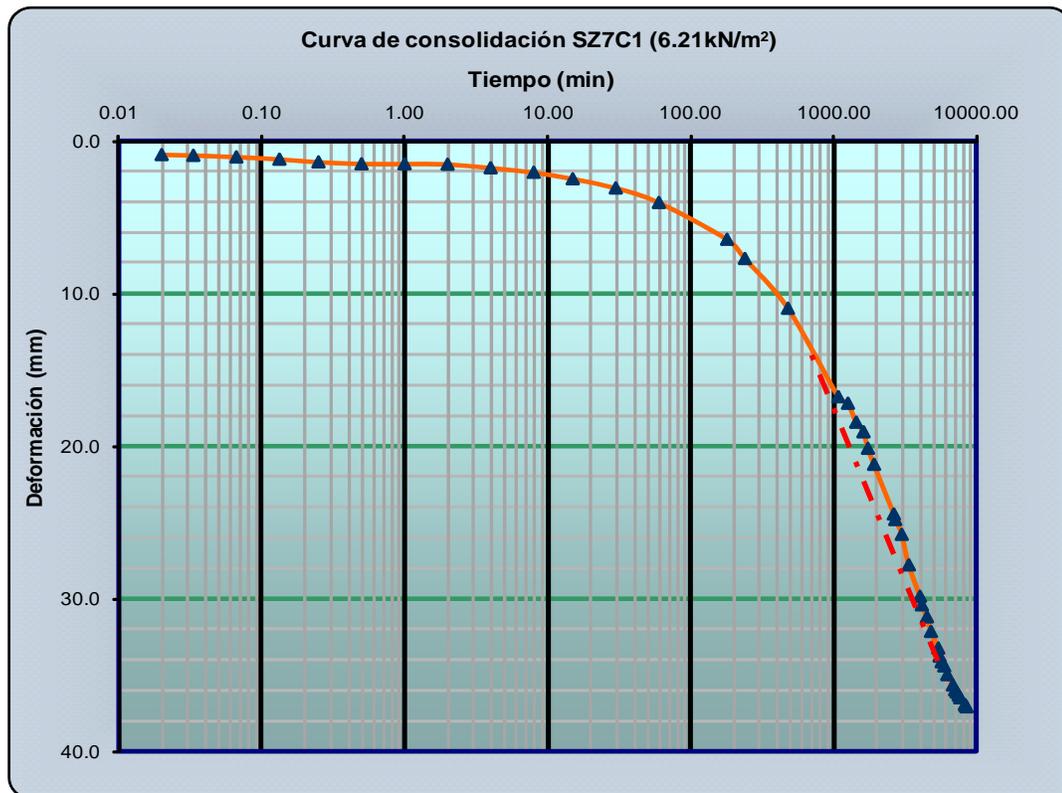


Figura A.3. Curva de consolidación, arcilla marina blanda SZ7C1



En la Figura A.4a se presentan dos curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina blanda con gas al 7 por ciento, obtenidas durante el segundo (SZ7C2 = 12.07 kN/m²) y tercer (SZ7C3 = 24.13 kN/m²) intervalo de carga y se observa que en la etapa de la consolidación primaria se desarrollan concavidades, una en la curva SZ7C2 y dos en la curva SZ7C3 (ver Figura A.4b); en el caso de la curva SZ2C3 la concavidad se asemeja mas a un segmento circular o a una porción de una parábola, mientras que en la curva SZ7C2 se asemeja mas a un sector circular. Adicionalmente en la curva SZ7C2 se observa una porción convexa que está asociada a una disipación parcial de la presión contenida en las burbujas de gas metano, generada porque se sobrepasaron los esfuerzos soportados por el gas metano. Las concavidades indican el desarrollo de alta presión y el intervalo de tiempo en el que la presión se transfiere parcialmente; este comportamiento genera la disminución del volumen de gas y la división de las burbujas, formándose así capas de gas, tal como se presentan en los suelos marinos (Fugro 2001). En estas condiciones el gas soporta mayor carga debido al incremento del confinamiento y *al «aumento de la rigidez de las burbujas de gas, comportándose, el gas, como un rígido plástico dentro de una estructura (agua-suelo) con menor rigidez»*, Vesic 1972.

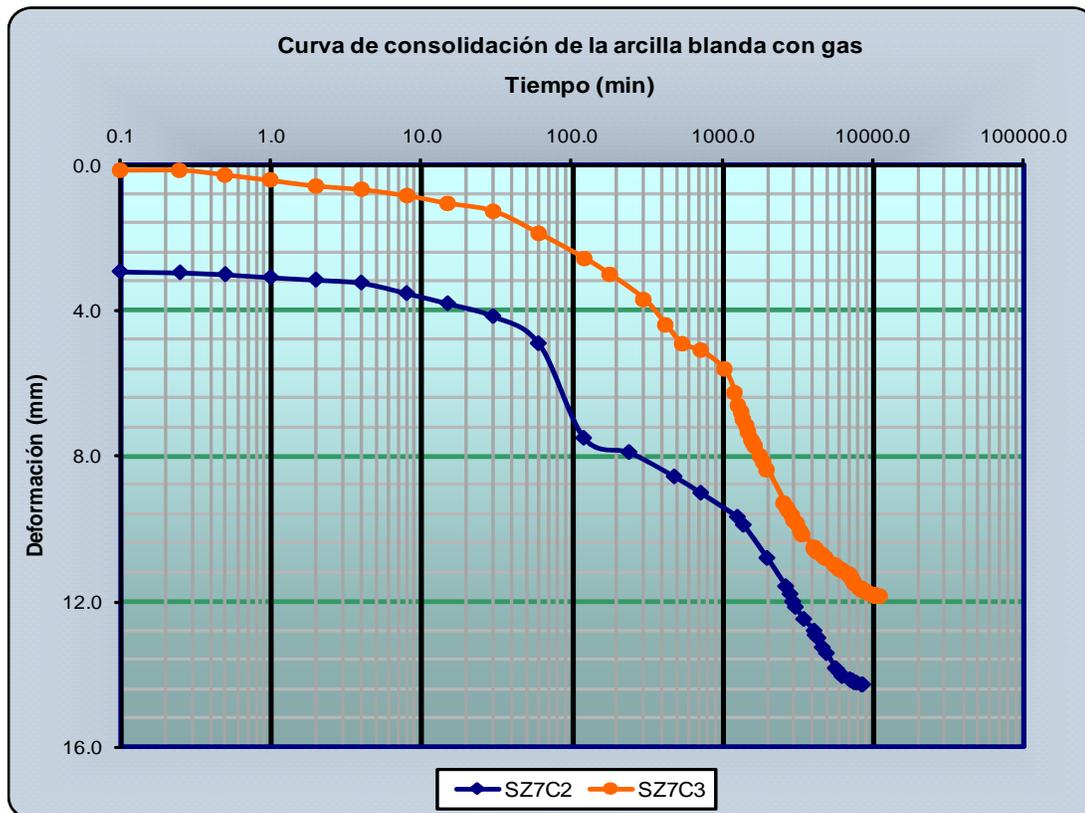


Figura A.4a. Curvas de consolidación, arcilla marina blanda SZ7C2 y SZ7C3.

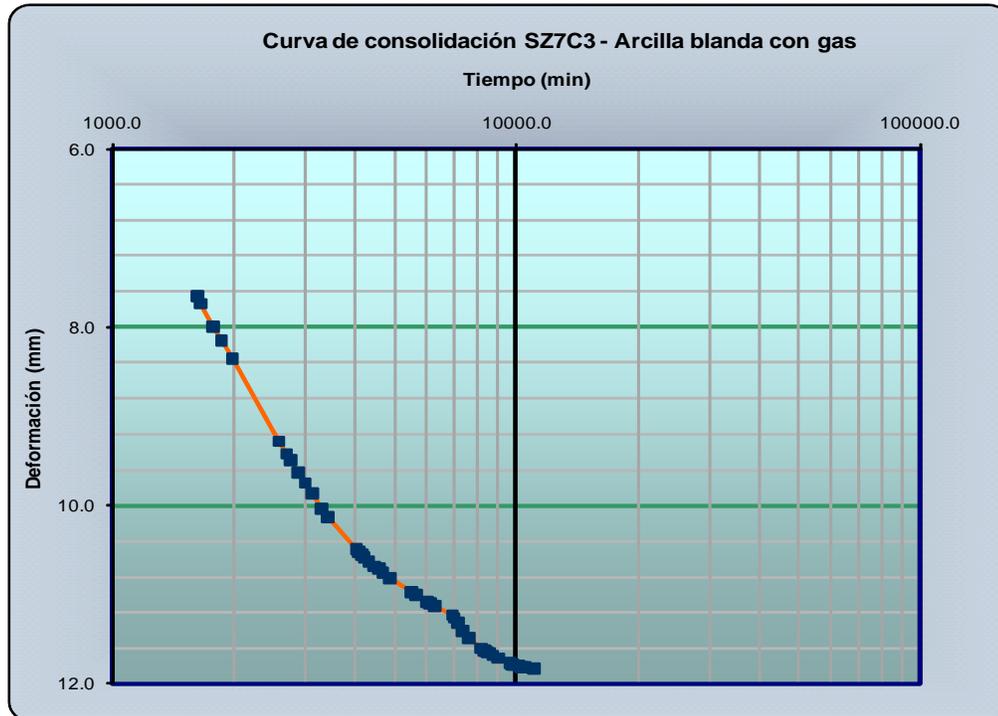


Figura A.4b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ7C3.

Las partes convexas y cóncavas indican la existencia de dos presiones límites, una que se relaciona con el confinamiento proporcionado por las laminas de arcilla, es decir, por las fuerzas intermoleculares desarrolladas por la arcilla al confinar al gas y la segunda presión, posiblemente, está relacionada con la «tensión superficial entre la interfase gas-agua»; Schuurman (1966); Wheeler (1986, 1988a, 1988b y 1990); y Sills (1991) y con las consideraciones de expansión y contracción de las burbujas de gas, Wheeler et al. 1989. Estos dos juegos de presiones son las que, aparentemente, gobiernan el estado de esfuerzos en la nueva estructura (i.e. gas metano, agua y láminas de arcilla).

La convexidad en la curva SZ7C2 inicia y termina a los 30 y 450 minutos, respectivamente, después de aplicada la carga, mientras que la transferencia parcial de carga en la curva SZ7C2 inicia y termina a los 450 y 3 000 minutos, respectivamente, lo que equivale a 1.8 días para efectuarse la transferencia parcial de carga del gas al sistema agua-arcilla, hasta que se equilibra la presión del gas. En el caso de la curva SZ7C3, la primera concavidad inicia y termina a los 540 y 1 340 minutos, respectivamente, requiriendo 15.0 horas para efectuarse la transferencia parcial de carga. En la parte final del tramo de la consolidación primaria de la curva SZ7C3 (Figura A.4b), se observa una concavidad que inicia y termina a los 3 960 y 8 340 minutos, respectivamente después de aplicada la carga, requiriendo 2.6 días para efectuar la transferencia parcial de carga.



En la Figura A.5 se presenta la curva de consolidación de la arcilla marina blanda con gas metano al 7 por ciento, obtenida durante el último intervalo de carga ($SZ7C4 = 48.27 \text{ kN/m}^2$).

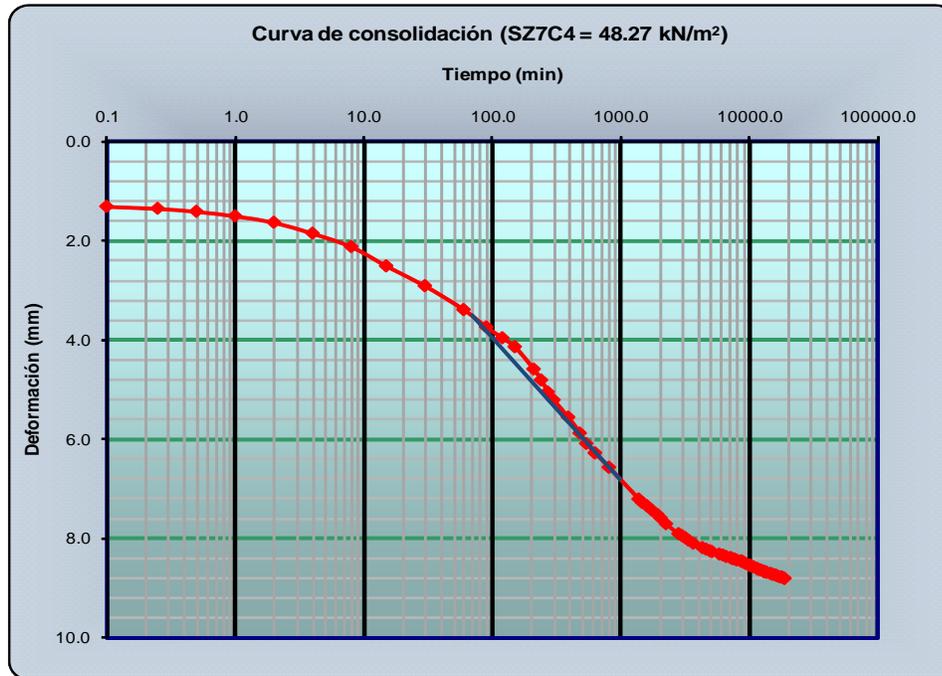


Figura A.5. Curva de consolidación, arcilla marina blanda SZ7C4

En la curva SZ7C4 no es evidente la concavidad, comparándola con las dos curvas anteriores, pero es posible observar que el inicio de la concavidad empieza a los 90 minutos y termina a los 540 minutos después de aplicada la carga, lo que equivale a 7.5 horas para que se efectúe la transferencia parcial de carga hacia el sistema agua-arcilla. Este comportamiento es debido a que la carga aplicada no es lo suficientemente alta como para generar una sobrepresión en las burbujas de gas, como la de la curva SZ7C3, por lo tanto, una vez que parte de la baja sobrepresión es trasferida, entonces las burbujas de gas se comportan como un rígido plástico, lo que representa el comportamiento de elementos rígidos plásticos dentro de una estructura con menor rigidez; Opus citatus, página A-5.

En resumen, para obtener una arcilla marina blanda con gas metano al 7 por ciento¹ se emplearon 32.6 días para consolidar la muestra de lodo arcilloso marino y la deformación vertical obtenida fue de 71.96 mm. En la Tabla A.2 se presentan los intervalos de tiempo y las deformaciones verticales obtenidas para cada uno de los intervalos de carga empleados para

¹ La frase: *con gas metano al 7 por ciento*, se refiere a la cantidad de zeolita saturada con gas metano agregada a la arcilla, aplica lo mismo para el resto de este apéndice y los demás.



consolidar la muestra de lodo arcilloso marino y obtener una arcilla marina con gas al 7 al ciento por ciento y de consistencia blanda.

Tabla A.2. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina blanda con gas al 7 por ciento (SZ7).

Intervalo de Carga (kN/m ²)	Tiempo para consolidación (min)	Deformación Vertical (mm)
SZ7C1 (6.21)	8 520	37.04
SZ7C2 (12.07)	8 580	14.28
SZ7C3 (24.13)	11 100	11.83
SZ7C4 (48.27)	18 780	8.81
Total	46 980	71.96

A.2.3. Arcilla marina blanda con zeolita saturada con gas metano al 15 por ciento (SZ15)

En la Figura A.6a se muestra la curva de consolidación de la arcilla marina con gas metano al 15 por ciento, obtenida durante el primer incremento de carga (SZ15C1 = 6.21 kN/m²).

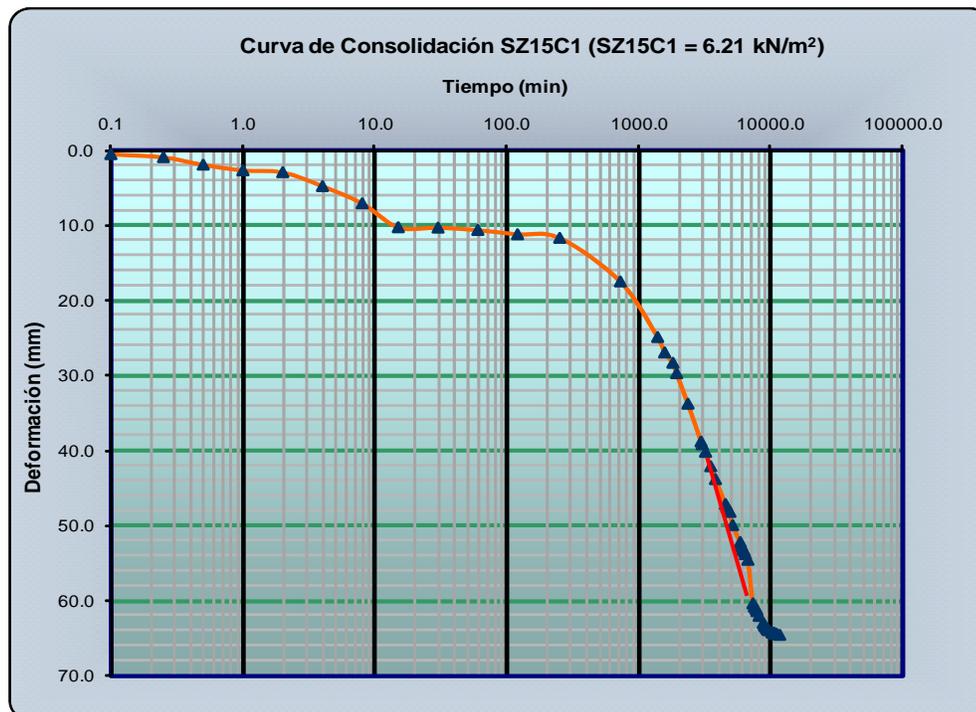


Figura A.6a. Curva de consolidación, arcilla marina blanda SZ15C1.

En curva SZ15C1 se observa que durante el inicio de la etapa de la consolidación primaria se presenta un escalón que termina a los 15 minutos después de haberse aplicado la carga. Este



peldaño está asociado a una compresión y disipación parcial de la presión contenida en las burbujas de gas y, por lo tanto se genera un cambio súbito del volumen de la muestra provocado por la carga aplicada, reacomodando el gas dentro del sistema agua-arcilla, para posteriormente continuar el desarrollo de la consolidación primaria, indicando que el sistema esta en equilibrio, es decir, la carga es soportada por el gas, el agua y la arcilla, pero dado que el agua no soporta carga, entonces esta se transfiere al gas y a las partículas de arcilla. En la curva SZ15C1 también se observa una concavidad que se asocia a una zona de mayor presión y a una transferencia parcial de carga del gas hacia el agua y a la arcilla, Figura A.6b.

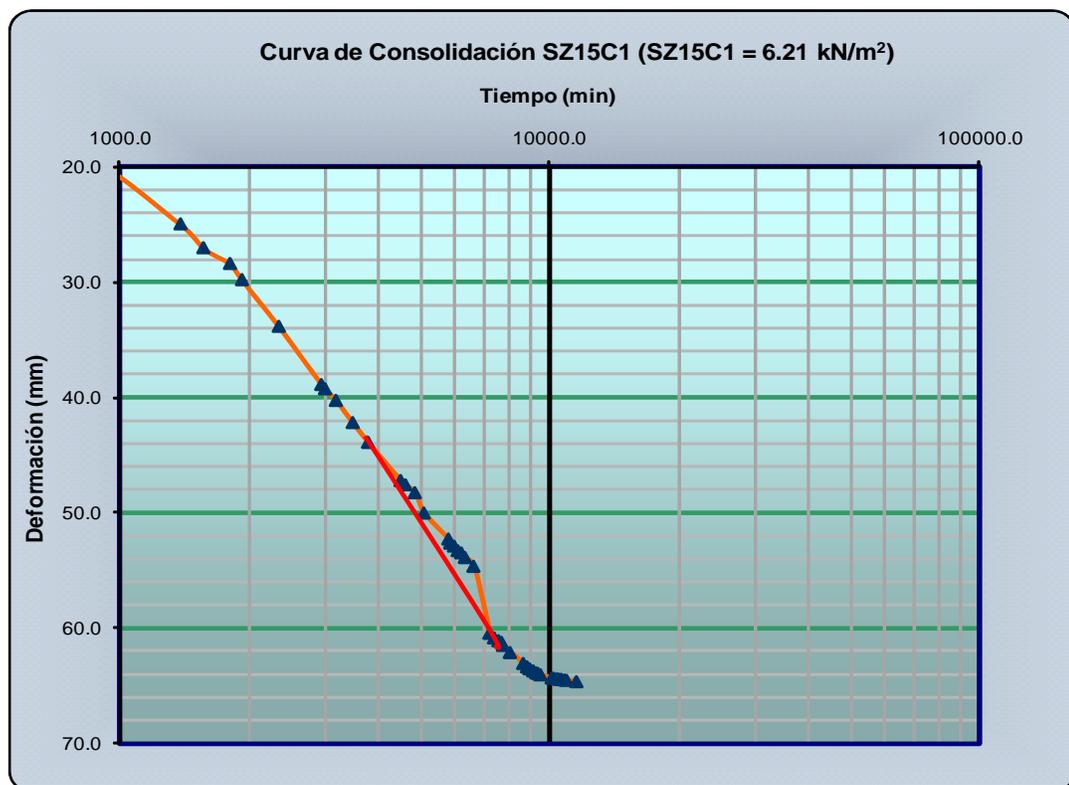


Figura A-6b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ15C1.

Los cambios que se presentan en la curva de consolidación SZ15C1 indican que las burbujas de gas disminuyen su volumen y generan zonas de mayor presión provocando que se disminuya o dividan en burbujas mas pequeñas, acercándose las burbujas de gas a un estado de presión crítico (Schuurman, 1966). La concavidad de la curva SZ15C1 inicia aproximadamente a los 3 780 minutos y termina aproximadamente a los 7 440 minutos después de aplicada la carga, lo que equivale a 2.5 días para realizarse la transferencia parcial de carga.



En la Figura A-7a se presenta la curva de consolidación correspondiente a la arcilla marina con gas al 15 por ciento, obtenida durante el segundo intervalo de carga ($SZ15C2 = 12.07 \text{ kN/m}^2$). La curva $SZ15C2$ no presenta ningún cambio perceptible, excepto que el tramo recto de la consolidación primaria es relativamente largo y con poca deformación vertical, esto indica que las burbujas de gas adquieren mayor rigidez y, por lo tanto, resisten mayor parte de la carga inducida, aunado a la mayor cantidad de gas metano con respecto a la arcilla con el 7 por ciento de gas. Esto generaría que la resistencia al esfuerzo cortante de la estructura (gas, agua y partículas de arcilla) sea menor, debido a que se reduce el esfuerzo efectivo del suelo, (Opus citatus, segundo párrafo, página •••17, Capítulo III) comparándolo con la arcilla blanda con gas metano al 7 por ciento y con la arcilla sin gas.

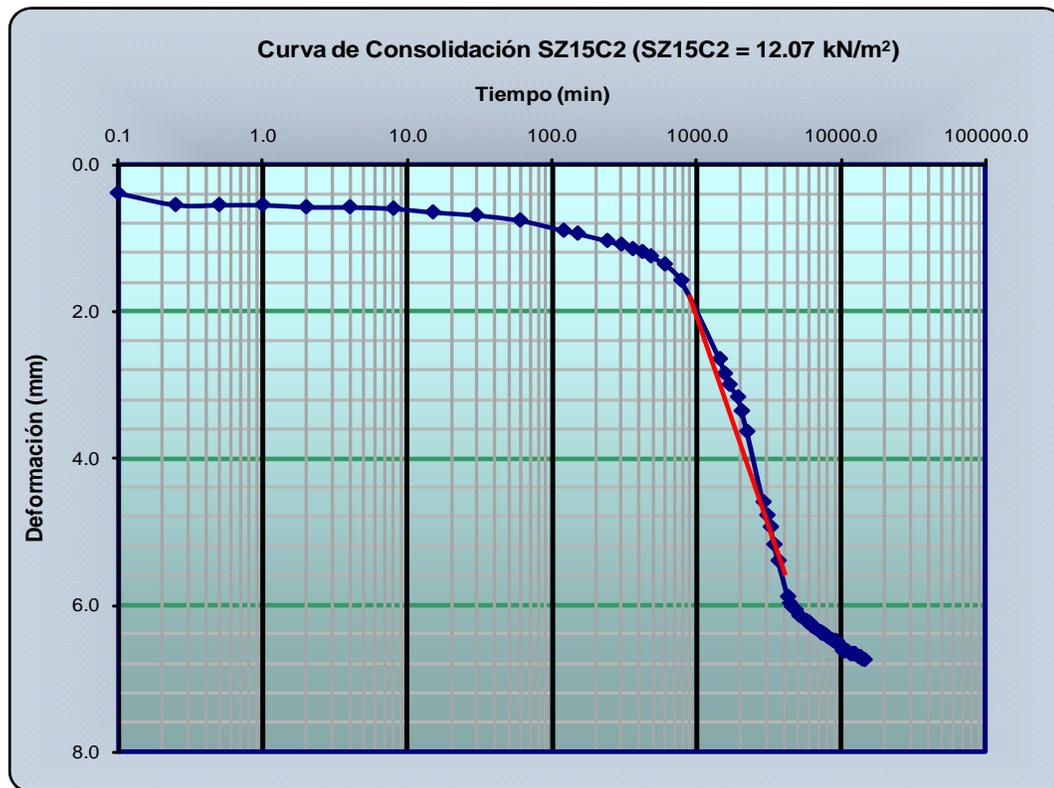


Figura A-7a. Curva de consolidación, arcilla marina blanda SZ15C2.

Una diferencia que se presenta en la curva $SZ15C2$ es que el tramo descendente de la consolidación primaria tiene mayor pendiente con tendencia a la verticalidad, comparándola con las curvas de consolidación obtenidas de la arcilla sin gas y con gas al 7 por ciento. Esta pendiente indica que la carga es soportada por todo el sistema, por ello se genera un tramo recto inicial más largo, por lo tanto se presenta un incremento en la presión dentro de las burbujas de gas metano,



que esta representado por la concavidad, para posteriormente presentarse una transferencia parcial de carga con el tiempo.

La concavidad, Figura A.7b, inicia a los 1 440 minutos y termina a los 2 500 minutos después de aplicada la carga. Dado que la concavidad se asemeja mas a un segmento circular, se asume que la presión del gas en esta parte no es alta.

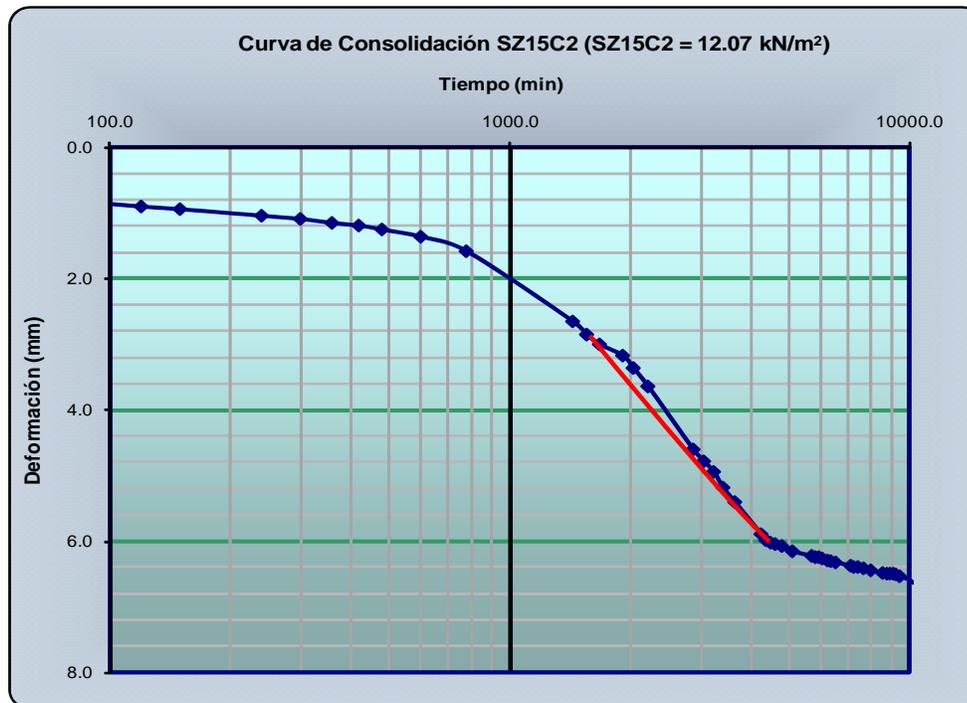


Figura A.7b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ15C2.

En la Figura A.8a se presentan dos curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina blanda con gas metano al 15 por ciento, obtenidas durante los dos últimos intervalos de carga (SZ15C3 = 24.13 kN/m² y SZ15C4 = 48.27 kN/m²). En cada una de las curvas presentadas se desarrolla una concavidad en la etapa de la consolidación primaria, pero a diferentes intervalos de tiempo. Esta configuración de la curva indica que el gas metano interactúa con el agua y las partículas de arcilla para resistir la carga aplicada, formándose así una nueva estructura trifásica parcialmente saturada. Esta estructura se mantiene en equilibrio hasta que los esfuerzos soportados por las burbujas de gas se sobrepasan y, entonces, las burbujas de gas se dividen y reducen su volumen, pero aumentando la presión interna dentro de ellas y, por lo tanto, aumentan su rigidez, lo que indica que la estructura resistirá mayor carga en intervalos de carga posteriores.

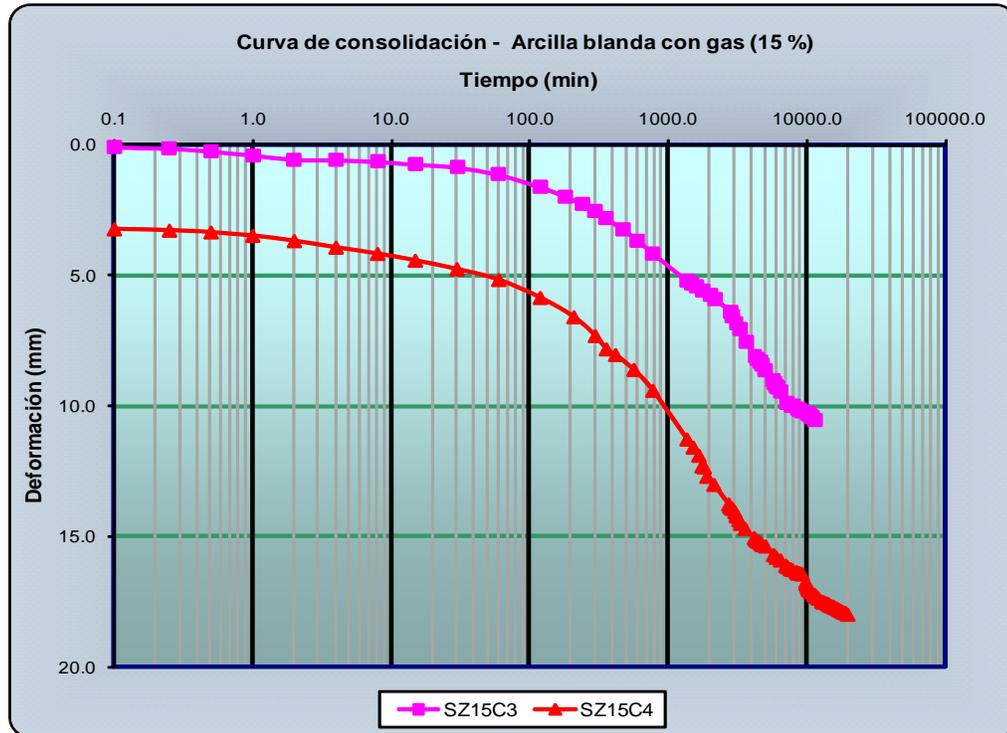


Figura A-8a. Curvas de consolidación de la arcilla marina blanda con gas metano al 15 por ciento de gas, obtenida durante el tercer y cuarto intervalos de carga.

En lo que respecta al tercer intervalo de carga, SZ15C3, la concavidad o transferencia parcial de carga inicia a los 1 620 minutos y termina a los 4 260 minutos después de aplicada la carga, Figura A-8b, esto equivale a 1.8 días para transferir parcialmente la carga soportada por el gas al agua y a las partículas de arcilla. En cuanto al último intervalo de carga, SZ15C4, la transferencia se efectúa al final de la consolidación primaria, Figura A-8c, y la concavidad inicia a los 7 320 minutos y termina a los 10 560 minutos, lo que equivale a 54.0 horas para transferir parcialmente la carga soportada por el gas al agua y a las partículas de arcilla.

De los resultados presentados se deduce que el gas metano soporta parte de la carga aplicada, una vez que esta confinado por las partículas de arcilla y, a medida que se aumenta la carga, el gas interactúa con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga inducida; este comportamiento aumenta la rigidez de las burbujas de gas, lo que implica que para mayores cargas no existiría transferencia de carga, formándose entonces, un solo fluido de poro con diferentes características de compresibilidad y permeabilidad. Por lo tanto, las arcilla marinas con gas serán de menor resistencia al esfuerzo cortante.

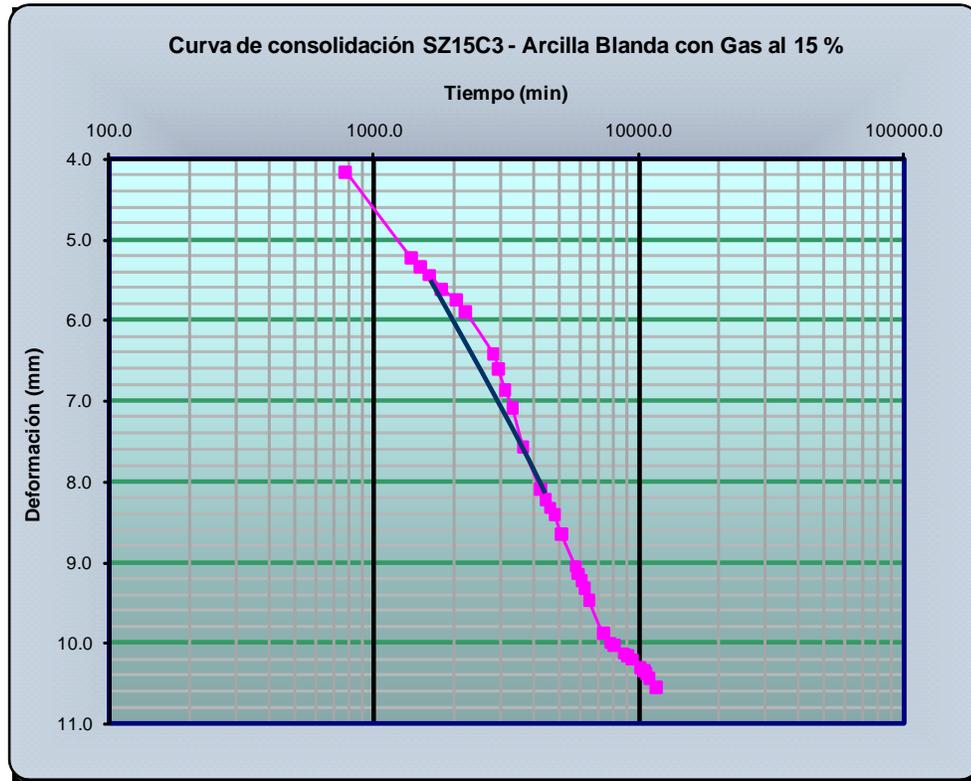


Figura A.8b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, SZ15C3.



Figura A.8c. Detalle del tramo la consolidación primaria, SZ15C4.



En resumen, para obtener una arcilla marina blanda con gas al 15 por ciento se requirieron 40.0 días para consolidar el lodo arcilloso marino y la deformación vertical obtenida fue de 99.93 mm. En la Tabla A.3 se presentan los tiempos empleados y las deformaciones obtenidas para cada uno de los intervalos de carga empleados para consolidar la muestra.

Tabla A.3. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina blanda con gas metano al 15 por ciento (SZ15).

Intervalo de Carga (kN/m ²)	Tiempo para consolidación (min)	Deformación Vertical (mm)
SZ15C1 (6.21)	11 580	64.62
SZ15C2 (12.07)	14 400	6.75
SZ15C3 (24.13)	11 580	10.55
SZ15C4 (48.27)	20 010	18.01
Total	57 570	99.93

A.3. Análisis de los resultados de la arcilla marina media

A.3.1. Arcilla marina media sin gas metano (FZ0)

En las Figuras A.9 y A.10 se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina media sin gas metano.

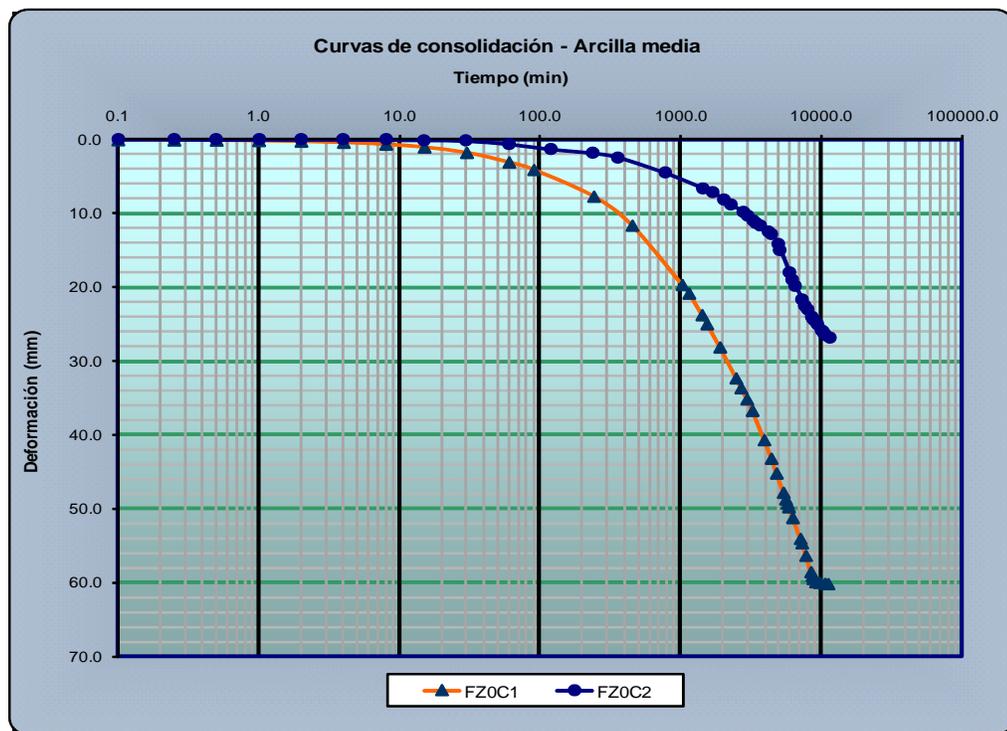


Figura A.9. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ0C1 y FZ0C2.

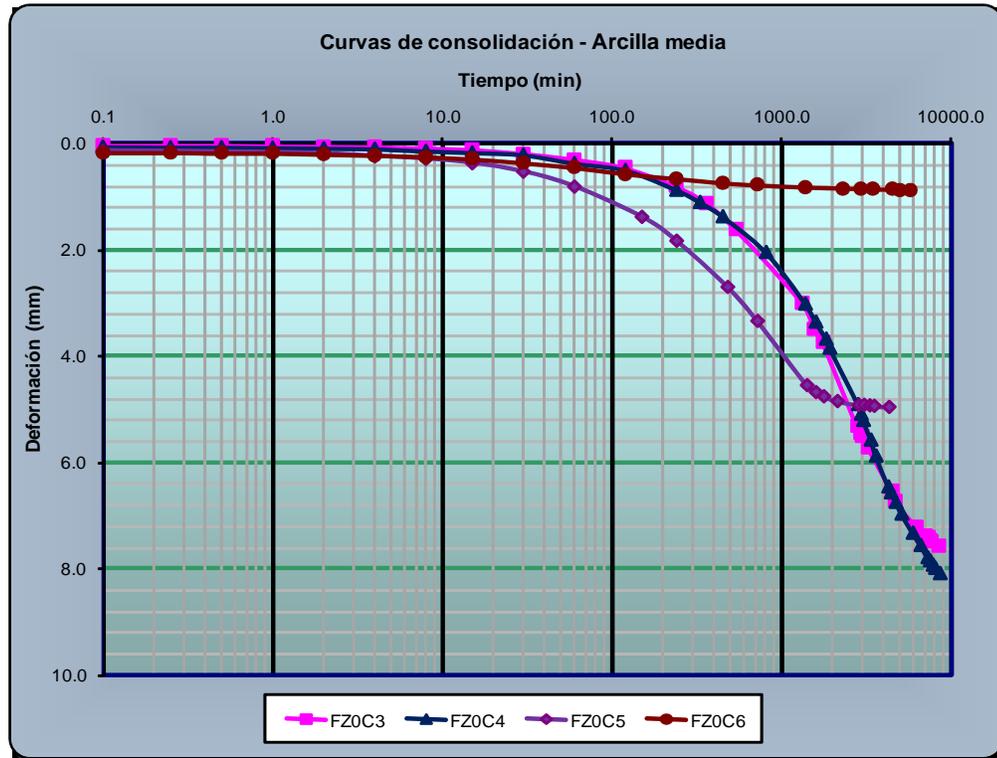


Figura A.10. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ0C3 a FZ0C6.

Las curvas de la arcilla media sin gas se presentan en dos gráficos, ya que no muestran variación en su forma y comportamiento al planteado por Terzaghi (1956); es decir, se observa la consolidación primaria y secundaria. En resumen, para obtener una arcilla marina media sin gas se emplearon 34.5 días para consolidar el lodo arcilloso marino y la deformación vertical obtenida fue de 108.42 mm. En la Tabla A.4 se presentan los tiempos empleados y las deformaciones verticales obtenidas para cada uno de los intervalos de carga utilizados, para obtener una arcilla media.

Tabla A.4. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina media sin gas metano.

Intervalo de carga (kN/m ²)	Tiempo para consolidación (min)	Deformación vertical (mm)
FZ0C1 (6.21)	11 100	60.16
FZ0C2 (12.07)	11 580	26.78
FZ0C3 (24.13)	8 430	7.56
FZ0C4 (48.27)	8 580	8.08
FZ0C5 (96.53)	4 290	4.96
FZ0C6 (193.06)	5 700	0.88
Total	49 680	108.42



A.2.2. Arcilla marina media con zeolita saturada con gas metano al 7 por ciento (FZ7)

La curva de consolidación correspondiente a la arcilla marina media con gas metano al 7 por ciento, obtenida durante el primer incremento de carga ($FZ7C1 = 6.21 \text{ kN/m}^2$) se presenta en la Figura A.11. En la curva FZ7C1 se observa que la parte inicial de la etapa de consolidación primaria es prácticamente recta hasta los 8 minutos, posteriormente se estabiliza y continúa hasta cambiar abruptamente a los 90 minutos, indicando que existe una disipación parcial rápida de la presión del gas, por otra parte, utilizando una línea, en la curva se observan dos concavidades que indican zonas de alta presión, también indican que el gas soporta parte de la carga inducida, así como un intervalo de transferencia de carga. Este comportamiento genera una reducción de la resistencia al esfuerzo cortante en el suelo, debido a que el esfuerzo efectivo resultante sería menor, comparándolo con el de una arcilla blanda sin gas; Opus citatus, segundo párrafo página ●●17, Capítulo III.

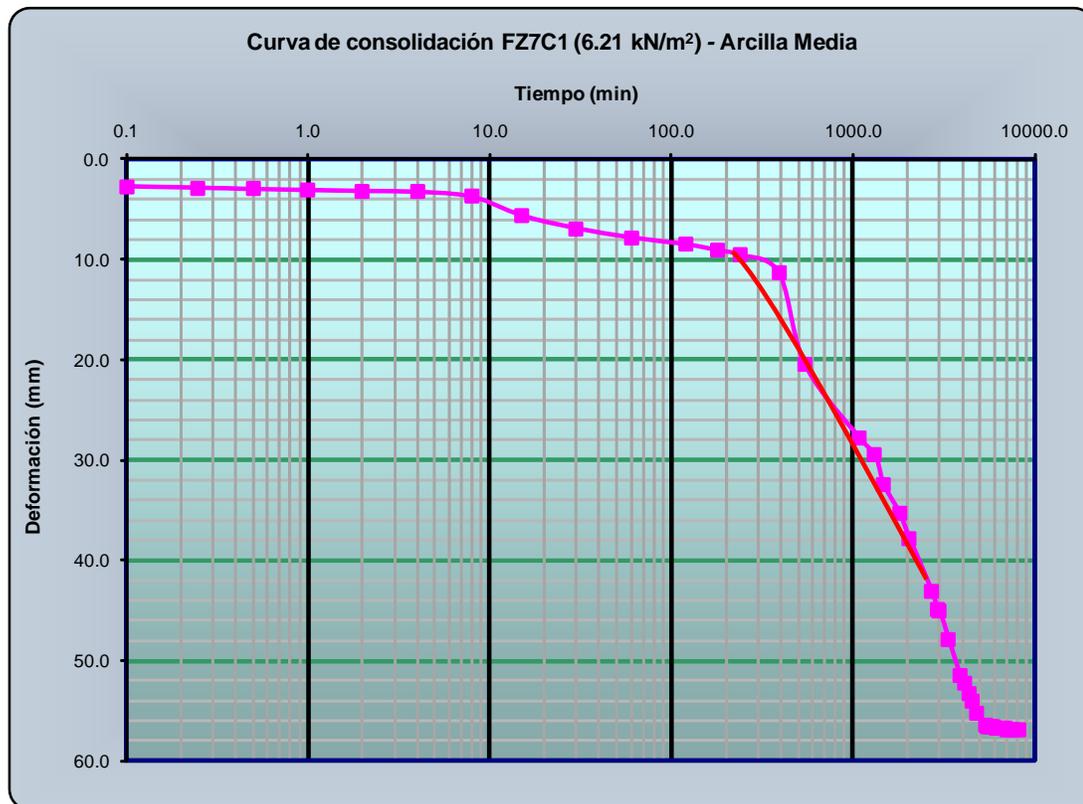


Figura A.11. Curva de consolidación, arcilla marina media FZ7C1.

En la curva FZ7C1 se presentan dos concavidades, la primera inicia aproximadamente a los 250 minutos y termina aproximadamente a los 500 minutos, lo que equivale a 4.2 horas y la segunda concavidad inicia aproximadamente a los 700 minutos y termina a los 2000 minutos



después de aplicar la carga, lo que equivale a 21.7 días para realizarse la transferencia parcial de carga.

En la Figura A.12 se presentan las curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina media, obtenidas durante el segundo al cuarto intervalos de carga.

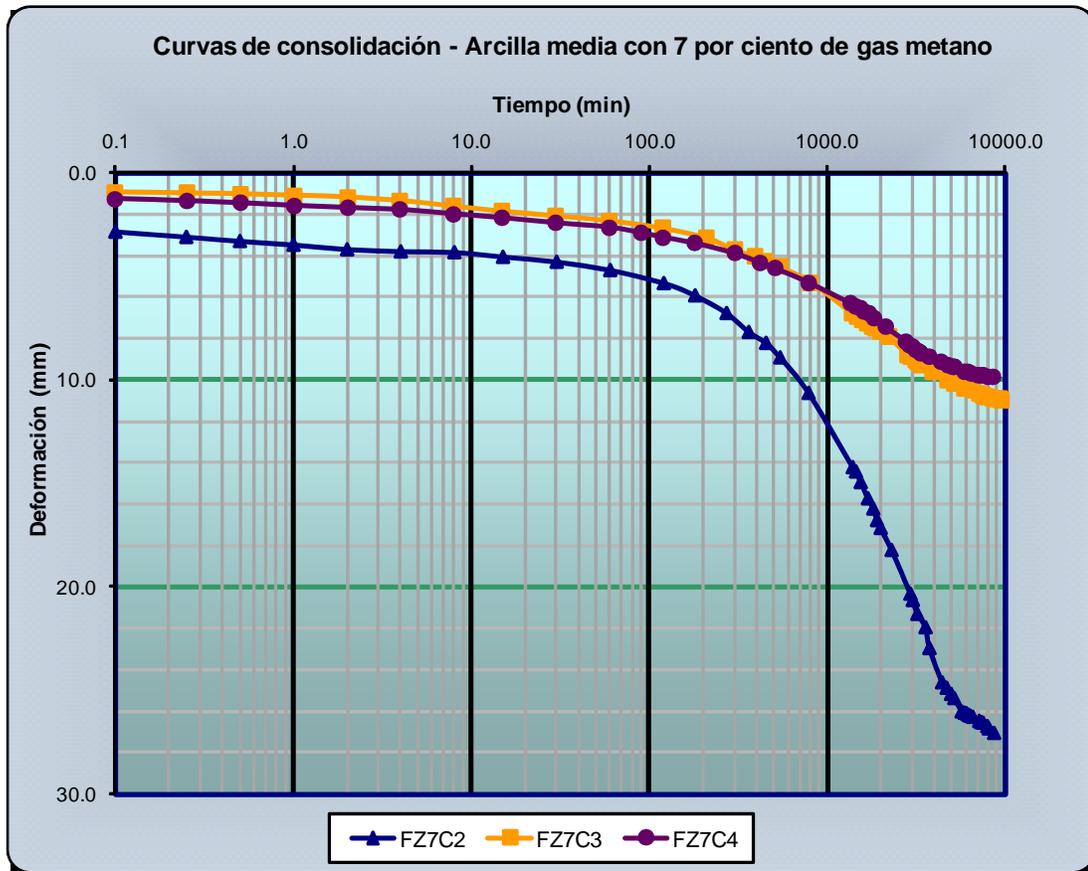


Figura A.12. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ7C2 a FZ7C4.

Las curvas no presentan variación en su configuración, por lo tanto el comportamiento es muy similar al indicado por Terzaghi; este comportamiento puede ser debido al escape de gas generado por el reajuste del pistón de carga, pero no afectó las características finales de la arcilla debido a que fue gas libre que se encontraba bajo la placa de poro, es decir, aquel que no estaba confinado por la arcilla, esto se comprueba de los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia de laboratorio. Este comportamiento indica que el gas confinado interactúa con el agua y la arcilla para soportar la carga aplicada. El mismo comportamiento se observa en las curvas de consolidación de la arcilla marina, correspondiente a los dos últimos intervalos de carga, Figura A.13.

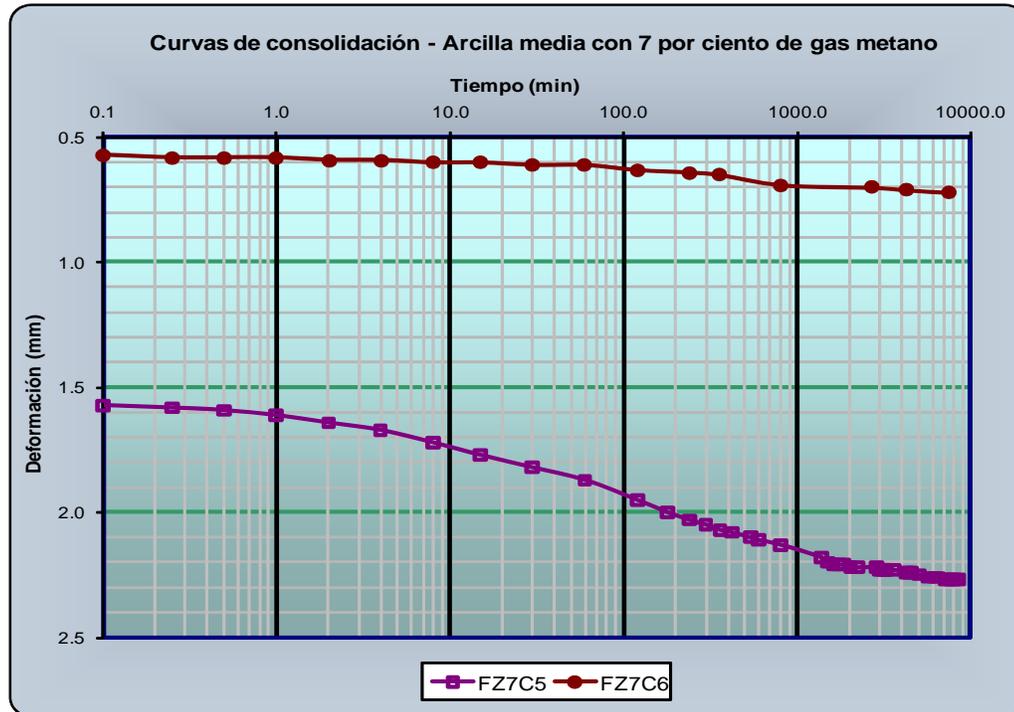


Figura A.13. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ7C5 y FZ7C6.

En resumen, para obtener una arcilla marina media sin gas metano se emplearon 35.7 días para consolidar el lodo arcilloso marino y la deformación vertical obtenida fue de 107.74 mm. En la Tabla A.5 se presentan los tiempos empleados y las deformaciones verticales obtenidas para cada uno de los intervalos de carga utilizados para consolidar la muestra de lodo arcilloso marino y obtener una arcilla marina con consistencia media.

Tabla A.5. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina media con gas metano al 7 por ciento (FZ7).

Intervalo de Carga (kN/m ²)	Tiempo para consolidación (min)	Deformación Vertical (mm)
FZ7C1 (6.21)	8 220	56.86
FZ7C2 (12.07)	8 580	27.01
FZ7C3 (24.13)	10 020	11.00
FZ7C4 (48.27)	8 490	9.88
FZ7C5 (96.53)	8 550	2.27
FZ7C6 (193.06)	7 530	0.72
Total	51 390	107.74



A.3.3. Arcilla marina media con zeolita saturada con gas metano al 15 por ciento (FZ15)

En la Figura A.14 se presenta la curva de consolidación de la arcilla marina media con gas metano al 15 por ciento, obtenida durante el primer incremento de carga (FZ15C1 = 6.21 kN/m²). En la curva FZ15C1 se observa que la etapa inicial de la consolidación primaria no está bien definida ya que esta está compuesta por dos secciones, esta configuración en la curva o tipo de comportamiento es muy similar al presentado por la curva SZ7C1, ya que también presenta dos secciones al inicio de la etapa de consolidación primaria. En la curva FZ15C1 también se observan dos concavidades, una que inicia a los 60 minutos y termina a los 300 minutos aproximadamente y es en la segunda concavidad en la que se desarrolla mayor presión. Estas concavidades indican que el gas soporta parte de la carga aplicada, así como el periodo de tiempo en que se transfiere parcialmente la carga del gas al agua y a las partículas de arcilla.

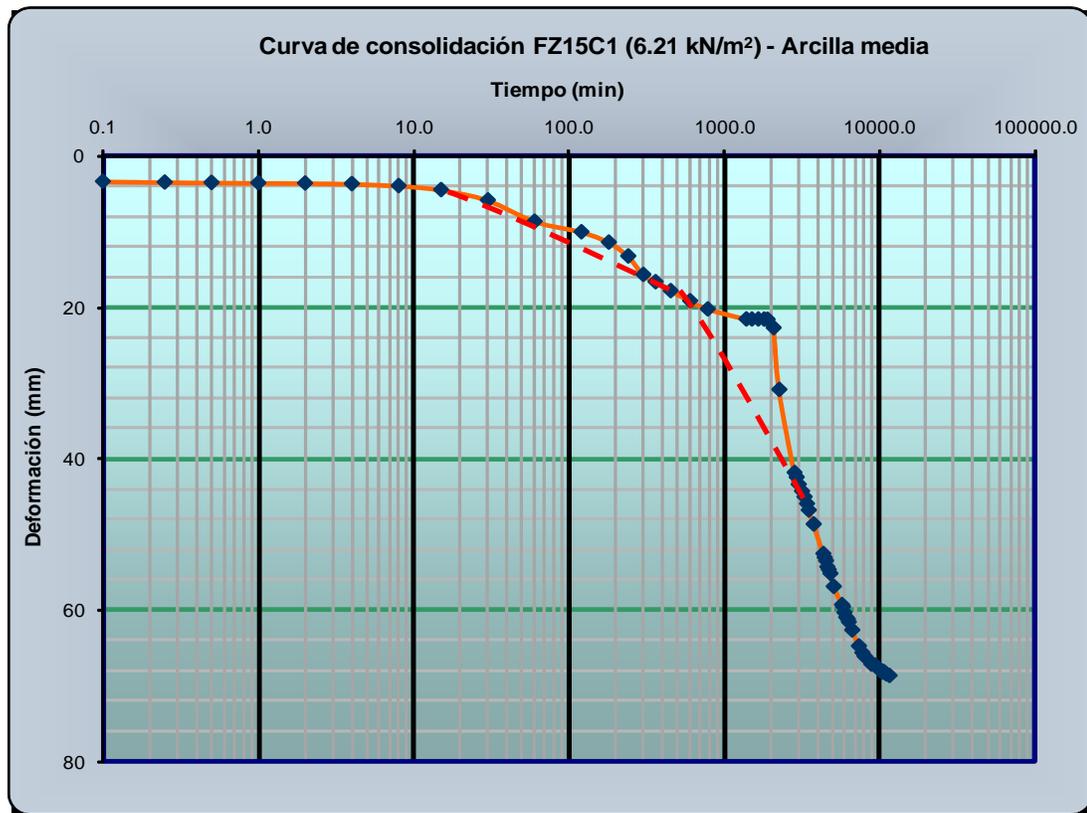


Figura A.14. Curva de consolidación, arcilla marina media FZ15C1.

La mayor concavidad que se desarrolla en la curva FZ15C1 inicia aproximadamente a los 750 minutos y termina aproximadamente a los 2700 minutos después de aplicada la carga, este intervalo equivale a 1.4 días para efectuarse la transferencia parcial de carga, en el caso de la concavidad que se presenta en el tramo recto inicia a los 60 minutos y termina a los 300 minutos



después de aplicada la carga, lo que equivale a 10.0 horas para realizarse la transferencia parcial de carga.

En la Figura A.15 se presentan dos curvas de consolidación correspondientes a la arcilla marina media con gas metano al 15 por ciento, obtenidas durante el segundo y tercer incremento de carga (FZ15C2 = 12.07 y FZ15C3 = 24.13 kN/m²).

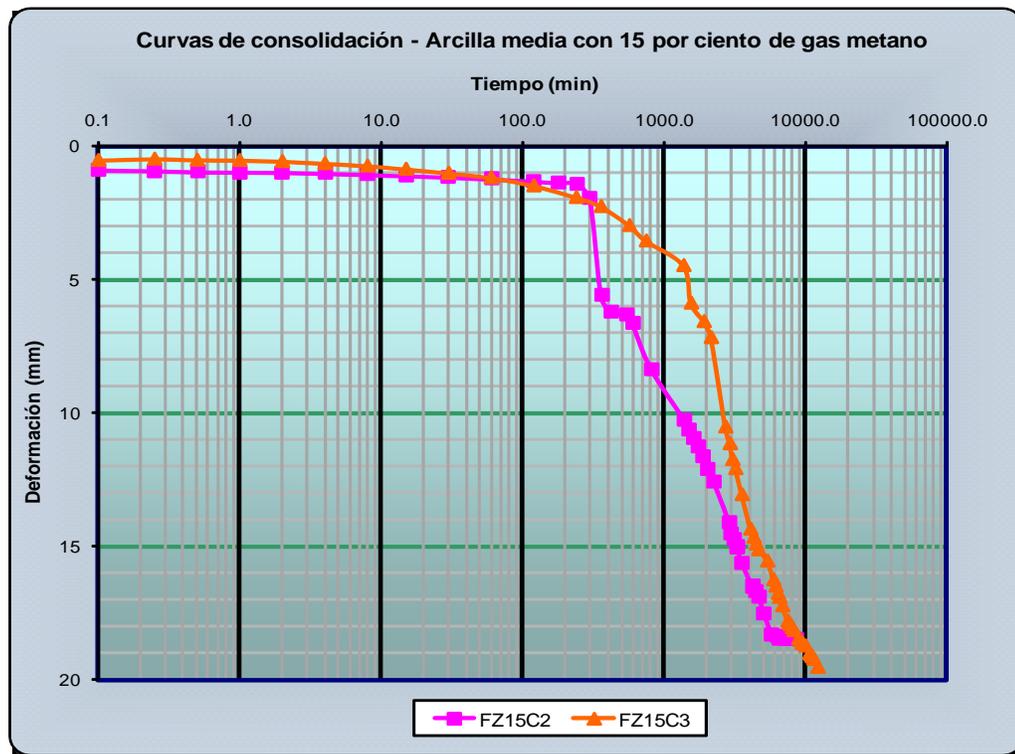


Figura A.15. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ15C2 y FZ15C3.

En la curva FZ15C2 se observa que la parte inicial de la consolidación primaria es prácticamente recta, este comportamiento indica que el gas soporta parte de la carga inducida y una vez que la carga sobrepasa la resistencia generada por el gas, existe una disipación rápida de la presión contenida en las burbujas de gas. Imaginando una línea se observa que existen dos zonas de alta presión, siendo la primera la mayor. En el caso de la curva FZ15C3 se observa que el gas se ha acomodado de tal forma que es capaz de soportar mayor carga y esta representada por una prolongación del tramo recto en la consolidación primaria que el de la curva FZ15C2, formándose, además, una concavidad indicando que las burbujas de gas están subpresionadas. Esta concavidad o transferencia de carga inicia a los 750 minutos y termina a los 2730 minutos, lo que equivale a 33.0 horas.



En la Figura A.16a se presentan las tres curvas restantes de consolidación correspondientes a la arcilla marina media con gas metano al 15 por ciento, obtenidas durante los tres últimos intervalos de carga (FZ15C4 = 48.27, FZ15C5 = 96.53 y FZ15C6 = 193.06 kN/m²). En la Figura se observa que en las curvas FZ15C4 y FZ15C5 se presentan dos y una concavidad, respectivamente. Estas concavidades indican una transferencia parcial de carga del gas hacia el sistema agua-arcilla; para observar a detalle estas concavidades se presentan las porciones finales de ambas curvas en la Figura 16b. En el caso de la curva FZ15C6 no se observa ninguna concavidad, esto es debido a que el gas está reaccionando con el agua y las partículas de arcilla para soportar la carga.

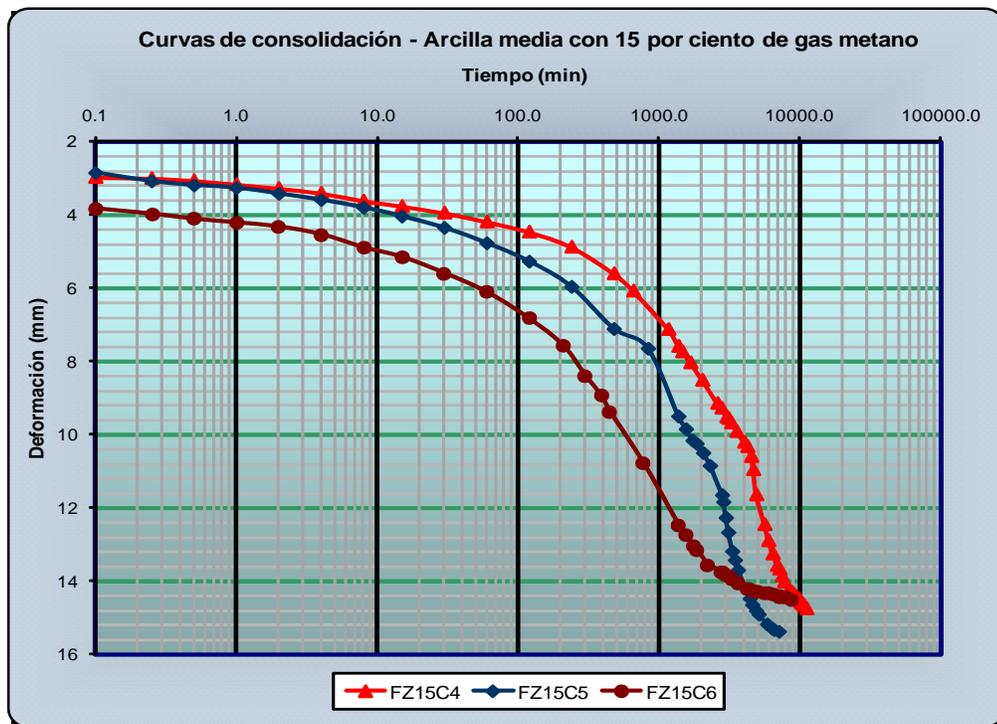


Figura A.16a. Curvas de consolidación, arcilla marina media FZ15C4 a FZ15C6.

La concavidad que se presenta en la curva FZ15C4 inicia a los 2 000 minutos y termina a los 5 000 minutos, lo que equivale a 2.1 días para que se efectúe la transferencia parcial de carga hacia el agua y las partículas de arcilla. En lo que respecta a la curva FZ15C5 la primera concavidad empieza a los 490 minutos y termina a los 1 500 minutos aproximadamente, lo que equivale a 16.8 horas para que se efectúe la transferencia parcial de carga y la segunda concavidad inicia a los 1 600 minutos y termina a los 3 100 minutos, este intervalo equivale a 1.0 día para que se lleve a cabo la transferencia parcial de carga, Figura A.16b.

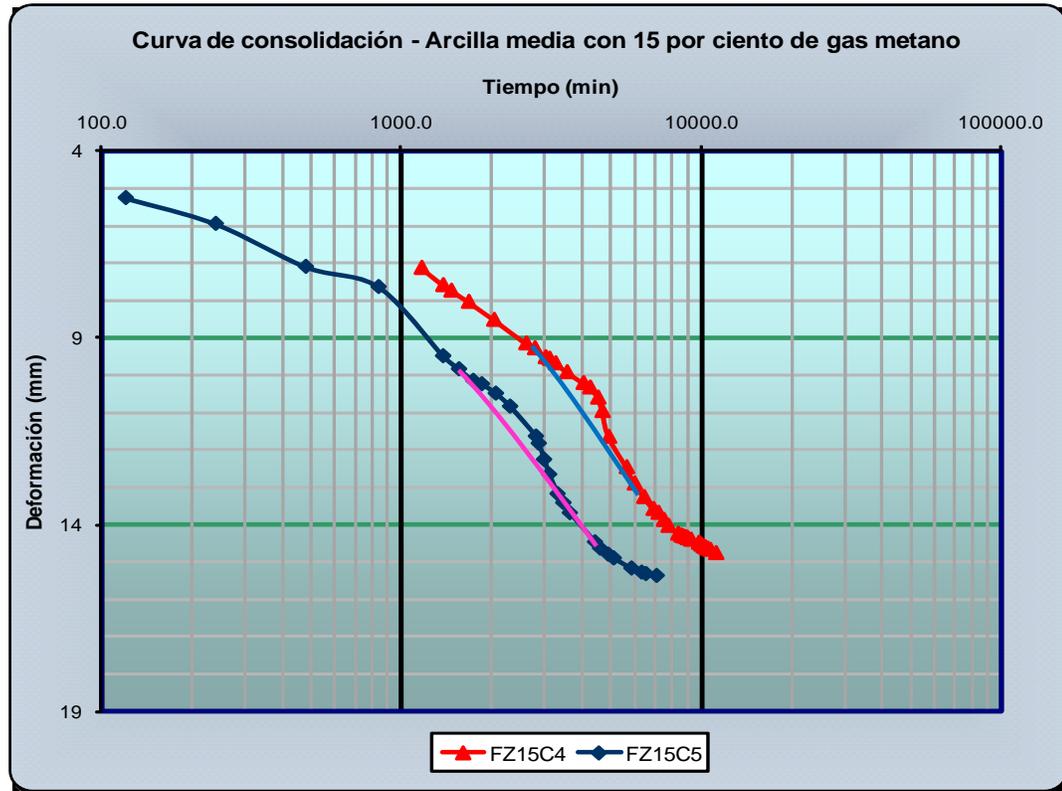


Figura A-16b. Detalle del tramo de la consolidación primaria, FZ15C4 y FZ15C5.

En resumen, para obtener una arcilla marina media se requirieron 41.4 días para consolidar el lodo arcilloso marino y se obtuvo una deformación vertical de 151.19 mm. En la Tabla A.6 se presentan los intervalos de tiempo y las deformaciones verticales obtenidas en cada uno de los intervalos de carga empleados para consolidar la muestra y obtener una arcilla marina con consistencia media.

Tabla A.6. Resultados de la prueba de consolidación de la arcilla marina media con gas metano al 15 por ciento (FZ15).

Intervalo de Carga (kN/m ²)	Tiempo para consolidación (min)	Deformación Vertical (mm)
FZ15C1 (6.21)	11 520	68.58
FZ152 (12.07)	8 580	18.44
FZ15C3 (24.13)	12 270	19.54
FZ15C4 (48.27)	11 190	14.76
FZ15C5 (96.53)	7 140	15.37
FZ15C6 (193.06)	8 850	14.50
Total	59 550	151.19



A.4. Referencias

American Society for Testing and Materials (2006). «Soil and Rock; Building Stones; Geotextiles». Annual Book of ASTM Standards, Vols. 4.08 y 4.09, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania. December.

Fugro-McClelland Marine Geosciences, Inc. Sucursal Venezolana Registrada. (2001) «Final Data Report. Geotechnical Site Investigation NGL Tank. Atlantic LNG Expansion Project. Point Fortin, Trinidad». Report No. 01/FT/577-2.

Schuurman, E. (1966) «The Compressibility of an Air/Water Mixture and a Theoretical Relation Between the Air and Water Pressures». Géotechnique 16. No. 4. Pp 269 – 281.

Sills, G. C., Wheeler, S. J., Thomas S.D. and Gardner T. N. (1991) «Behavior of Offshore Soils Containing Gas Bubbles». Géotechnique 41. No. 2, Pp 227-241.

Vesic, A. S. (1972) «Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass» Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. American Society of Civil Engineers. Vol. 98, No. SM3. Pp. 265-290. March.

Wheeler, S. J. (1986). «The Stress-Strain Behaviour of Soils Containing Gas Bubbles». D. Phil. Thesis, Oxford University. United Kingdom..

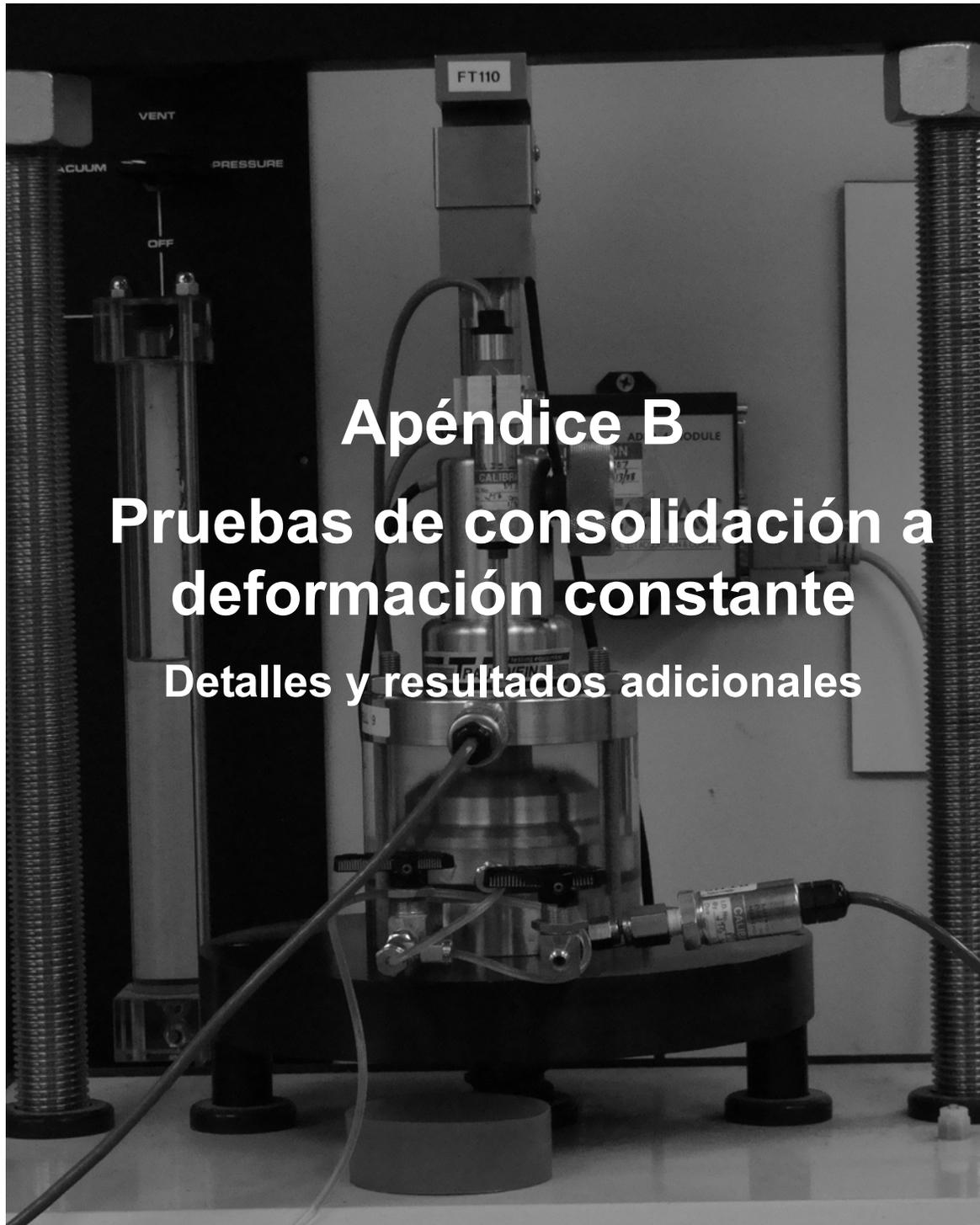
Wheeler, S. J. (1988a). «A conceptual model for soils containing large gas bubbles». Géotechnique 38, No. 3, Pp 389-397.

Wheeler, S. J. (1988b). «The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles». Géotechnique 38, No. 3, 399-413.

Wheeler, S. J. Sham, W. K. & Thomas, S. D. (1990) «Gas Pressure in Unsaturated Offshore Soils». Canadian Géotechnique. J. 27, No. 1. Pp 79-89.

Whelan, T. III, Coleman, J.M., Suhayda, J. N., and Garrison, L E.: (1975) «The Geochemistry of Recent Mississippi River Delta Sediments: Gas Concentration and Sediment Stability». Proceedings. Offshore Technology Conference. Houston. No. OTC 2342. Pp 71 – 84.

Whelan, T. III., Coleman, J. M., Suhayda, J. N. and Roberts, H. H. (1977). «Acoustical Penetration and Shear Strength in Gas-Charged Sediment». Marine Geotechnology Volume 2. Marine Slope Stability. Pp 47-159



Apéndice B

Pruebas de consolidación a deformación constante

Detalles y resultados adicionales



Índice

Apéndice B. Pruebas de consolidación a deformación constante Detalles y resultados adicionales

B.1. Consideraciones del ensaye de consolidación a deformación constante.....	B-1
B.2. Procedimiento del ensaye de consolidación a deformación constante.....	B-2
a). Método de Becker.....	B-4
B.3. Resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano	B-5
B.4. Resultados de la arcilla media sin y con gas metano	B-16
B.5. Referencias	B-27

Relación de Tablas y Figuras

Tabla	Página
Tabla B-1. Propiedades índice de la arcilla blanda sin y con gas metano, prueba de CRS.....	B-5
Tabla B-2. Propiedades índice de la arcilla media sin y con gas metano, prueba de CRS.....	B-16

Figura	Página
Figura B-1. Procedimiento de la prueba de consolidación a deformación constante.....	B-3
Figura B-2. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación. Ardilla blanda sin gas metano.....	B-7
Figura B-3. Curva de compresibilidad. Método de Becker. Ardilla blanda sin gas metano.....	B-8
Figura B-4. Conductividad hidráulica. Ardilla blanda sin gas metano.....	B-9
Figura B-5. Presión de poro. Ardilla blanda sin gas metano	B-9
Figura B-6. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación. Ardilla blanda con gas metano al 7 por ciento	B-10
Figura B-7. Curva de compresibilidad. Método de Becker. Ardilla blanda con gas metano al 7 por ciento.	B-11
Figura B-8. Conductividad hidráulica. Ardilla blanda con gas metano al 7 por ciento.....	B-12
Figura B-9. Presión de poro. Ardilla blanda con gas metano al 7 por ciento	B-12
Figura B-10. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación. Ardilla blanda con gas metano al 15 por ciento.....	B-13
Figura B-11. Curva de compresibilidad. Método de Becker. Ardilla blanda con gas metano al 14 por ciento.	B-14
Figura B-12. Conductividad hidráulica. Ardilla blanda con gas metano al 15 por ciento.....	B-15



Figura	Página
Figura B-13. Presión de poro. Arcilla blanda con gas metano al 15 por ciento	B-15
Figura B-14. Agua expulsada por la presión del gas metano durante la reconstitución de la arcilla	B-17
Figura B-15. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación. Arcilla media sin gas metano	B-18
Figura B-16. Curva de compresibilidad. Método de Becker. Arcilla media sin gas metano.....	B-19
Figura B-17. Conductividad hidráulica. Arcilla media sin gas metano.....	B-20
Figura B-18. Presión de poro. Arcilla media sin gas metano	B-20
Figura B-19. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación. Arcilla media con gas metano al 7 por ciento.....	B-21
Figura B-20. Curva de compresibilidad. Método de Becker. Arcilla media con gas metano al 7 por ciento	B-22
Figura B-21. Conductividad hidráulica. Arcilla media con gas metano al 7 por ciento.....	B-23
Figura B-22. Presión de poro. Arcilla media con gas metano al 7 por ciento	B-23
Figura B-23. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación. Arcilla media con gas metano al 15 por ciento.....	B-24
Figura B-24. Curva de compresibilidad. Método de Becker. Arcilla media con gas metano al 15 por ciento	B-25
Figura B-25. Conductividad hidráulica. Arcilla media con gas metano al 15 por ciento.....	B-26
Figura B-26. Presión de poro. Arcilla media con gas metano al 15 por ciento	B-26



Una opción para conocer las características de compresibilidad de la arcilla sin y con gas metano es realizar ensayos de consolidación a deformación constante (CRS, por sus siglas en inglés), esta prueba se ha realizado desde hace aproximadamente 47 años (Crawford, 1986) con bastante éxito, por lo cual se ha convertido en una práctica común. Este ensayo permite obtener resultados en un tiempo relativamente corto y una mejor definición de la curva de compresibilidad, lo que permite evaluar la velocidad de deformación resultante. Desde que se implementó este ensayo, se han desarrollado teorías que han permitido evaluar las propiedades mecánicas asociadas a la compresibilidad (Crawford, 1986; y Olson, 1986).

La teoría para este ensayo ha sido desarrollada para suelos saturados, pero también se han efectuado modificaciones a los equipos para estudiar a los suelos parcialmente saturados, pero considerando que *las burbujas de aire se disuelven o precipitan instantáneamente cuando la presión del aire cambia* (Olson, 1986).

En este estudio las pruebas de consolidación a deformación constante se realizaron de la misma forma para la arcilla sin y con gas, es decir, se le considera como saturada, esto permitió apreciar las variaciones en la compresibilidad de la arcilla con gas metano, permitiendo plantear el posible comportamiento de la arcilla con gas metano, aunque posiblemente tal consideración no está del todo alejada de algunos suelos con gas, ya que *en suelos con burbujas ocluidas la presión del agua de poro es considerada con valores hidrostáticos y los valores de la presión del gas están por arriba de las presiones atmosféricas, por lo que la ecuación de esfuerzos efectivos de Terzaghi es válida* (Olson, 1986).

Los ensayos de CRS realizados a las muestras de arcilla blanda y media sin y con gas metano siguieron las recomendaciones indicadas en la norma ASTM D4186-06.

B.1. Consideraciones del ensayo de consolidación a deformación constante

Las consideraciones realizadas durante el desarrollo de la prueba para la arcilla blanda y media son similares a las de la prueba de consolidación unidimensional por incrementos, que tienen como fundamento las consideraciones realizados por Terzaghi (Smith and Wahls, 1969) y son:

- a) La arcilla es homogénea y está saturada,
- b) La compresibilidad de las láminas de arcilla y el agua son insignificantes,
- c) El flujo de agua es en dirección vertical,

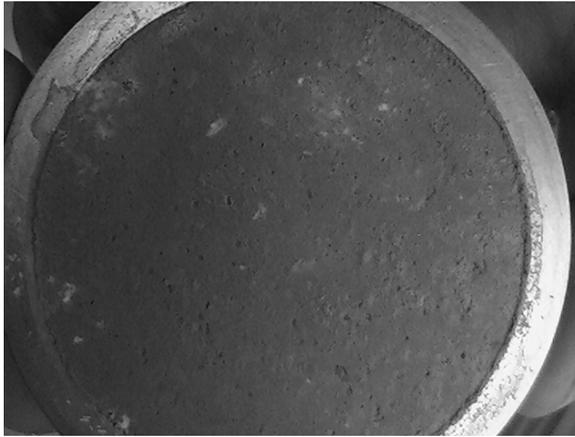


- d) Es válida la ley de Darcy,
- e) La relación de la conductividad hidráulica y la compresibilidad del suelo son constantes a través del espécimen durante el intervalo de tiempo en el que se efectúan las lecturas; y
- f) Los esfuerzos totales y efectivos son uniformes a lo largo del plano horizontal, i. e., los esfuerzos diferenciales ocurren entre planos horizontales diferentes.
- g) La compresibilidad del sistema de medición del exceso de presión de poro es insignificante comparada con la del suelo.

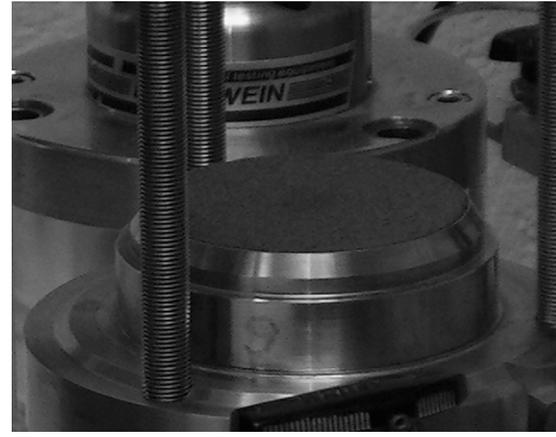
B.2. Procedimiento del ensayo de consolidación a deformación constante

El procedimiento empleado para efectuar las pruebas de consolidación unidimensional a deformación constante es el mismo para la arcilla blanda y media sin y con gas metano, el cual consiste en:

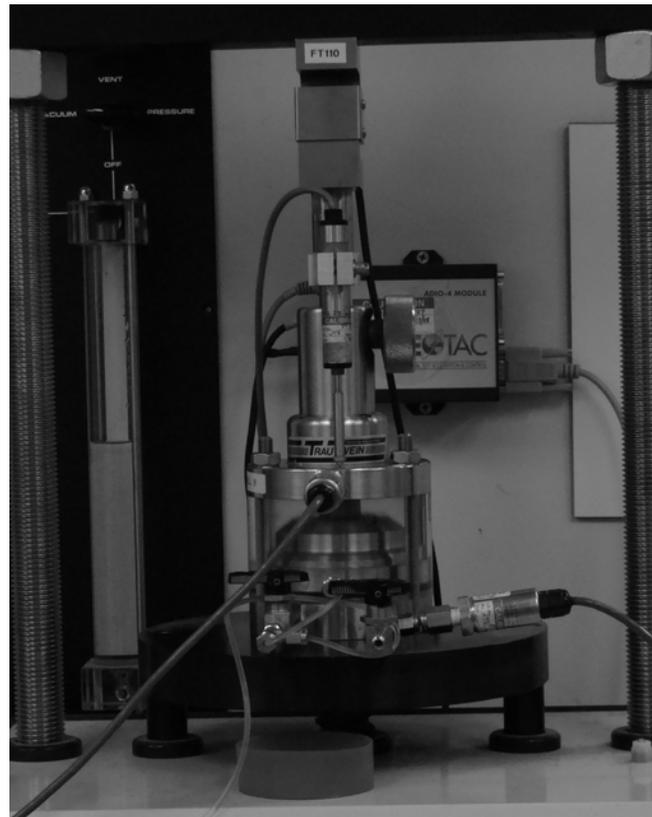
- a) La arcilla es recortada y colocada en un anillo de acero inoxidable con diámetro interno de 63.5 mm, Figura B.1a.
- b) El conjunto del anillo y la arcilla, se coloca dentro de una cámara de presión, en la que la base de la arcilla está aislada del fluido de confinamiento (agua) y su superficie está expuesta al mismo; posteriormente se coloca sobre la superficie de la arcilla una piedra porosa y el pistón de carga se pone en contacto con ella. El montaje del espécimen es realizado con la cámara sumergida en agua para evitar que quede atrapado aire en el sistema y se vea afectada la respuesta de la presión de poro, durante la etapa de carga, Figura B-1b, por lo tanto, los valores resultantes son generados simultáneamente, tanto por el gas, como por el agua.
- c) Se ensambla la cámara y se coloca en un marco de carga, donde el espécimen es saturado por contrapresión, empleando aproximadamente 480 kPa y se aplica un esfuerzo de asentamiento de aproximadamente 5 kPa para inicializar el indicador de deformación. Posteriormente, el espécimen es deformado axialmente 0.2 por ciento y saturado por contrapresión sin permitir que se expanda la muestra, Figura B-1c.
- d) Se aplica carga a una velocidad de deformación constante mientras se registran los datos de presión de poro, deformación y fuerza axial, hasta completar la primera etapa de la prueba, que consistió en deformar a la arcilla un 15 por ciento y posteriormente se descargó.



(a)



(b)



(c)

Figura B.1. Procedimiento de la prueba de consolidación a deformación constante.

A medida que el espécimen es comprimido durante la aplicación de carga, el fluido de poro sale de la arcilla a través de la piedra porosa. El exceso de la presión de poros generada durante la aplicación de la carga es medido utilizando un transductor de



presión que es conectado al fondo del espécimen, a través de la cámara. Un programa de computadora registra los datos y, de requerirse, ajusta la velocidad de carga para mantener una relación de presión de poros entre el 3 y 10 por ciento. Se seleccionó como límite el 15 por ciento de deformación para estimar los índices de compresibilidad y coeficientes de velocidad de consolidación.

- e) Después de completar la descarga de la arcilla, se continuó con la segunda etapa de la prueba, que consistió en cargar nuevamente a la arcilla para deformarla del 15 al 25 por ciento.
- f) Una vez obtenido el 25 por ciento de deformación la arcilla se descarga gradualmente, por aproximadamente un logaritmo de carga.
- g) Se concluye el ensaye determinando algunas propiedades índice de la arcilla, entre ellas el peso específico relativo de los sólidos, el contenido de agua, el grado de saturación, entre otros.

Con los resultados se generaron curvas de compresibilidad y se estimó la presión de preconsolidación, empleando el método de Casagrande y el de Becker (Becker et al, 1987); el primero método es ampliamente conocido, mientras que el segundo no es utilizado comúnmente, por lo cual se describe brevemente en el siguiente párrafo.

- a). **Método de Becker.** Este método para determinar la presión de preconsolidación fue desarrollado en 1987 por Becker y se basa en el criterio de trabajo por unidad de volumen (W), el cual se gráfica, en escala aritmética, con el promedio del esfuerzo vertical (σ). Donde el trabajo por unidad de volumen es el producto del incremento del esfuerzo vertical empleado por el incremento de la deformación generada, esto es:

$$W = (\sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3) \quad (A.1)$$

Para estimar la presión de preconsolidación se traza una línea recta en la parte curva del inicio de la prueba y se traza otra línea para prolongar el tramo virgen; las líneas pueden ser aproximadas o ajustadas empleando relaciones lineales. La intersección entre ambas líneas proporcionan la estimación de la presión de preconsolidación, con bastante aproximación.



B.3. Resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano

Los resultados de las pruebas de consolidación a deformación constante de la arcilla blanda sin y con gas metano se presentan al final de la sección (Figuras B.2 a B.13), mientras que en los siguientes párrafos se comentan las propiedades índice obtenidas para cada una de las muestras de arcilla blanda con y sin gas metano, Tabla B.1.

Tabla B.1. Propiedades índice de la arcilla blanda sin y con gas metano, prueba de CRS.

Propiedades Índice	Muestra SZ0	Muestra SZ7	Muestra SZ15
Contenido de humedad, [%]			
Inicial, w_o	66	76	72
Final, w_f	46	60	56
Límites de Atterberg			
Límite Líquido, LL	78	99	80
Límite Plástico, LP	25	24	25
Índice Plástico, IP	53	75	55
Peso volumétrico [kN/m^3]			
Total inicial, $\gamma_{t,o}$	15.80	14.69	14.33
Total final, $\gamma_{t,f}$	17.36	16.10	15.98
Seco inicial, $\gamma_{d,o}$	9.50	8.33	8.33
Seco final, $\gamma_{d,f}$	11.89	10.07	10.21
Gravedad específica, G_s	2.754	2.698	2.563
Relación de vacíos			
Inicial, e_o	1.838	2.171	2.012
Final, e_f	1.268	1.623	1.456
Grado de saturación Inicial, S_o (%)	99.3	94.9	91.6
Altura de sólidos [mm]	6.731	5.938	6.339
Altura de la muestra [mm]			
Inicial, h_o	19.10	18.83	19.09
Final, h_f	15.27	15.58	15.57

En los resultados se observa que el contenido de agua es mayor para la arcilla con gas metano al 7 por ciento y menor para la arcilla sin gas; se infiere que la diferencia obtenida es debido a que en la arcilla con gas se generan mayores presiones y, por lo tanto, se expulsa mayor



cantidad de agua, tal como pasó durante la reconstitución de las muestras de arcilla. Esta tendencia también se observa en el límite líquido, mientras que el límite plástico es prácticamente el mismo.

En el caso del peso volumétrico se observa que este decrece a medida que aumenta el contenido de gas metano, tal como se espera para este tipo de suelos, exceptuando que el peso seco inicial es el mismo para ambas arcillas con gas. En cuanto a la relación de vacíos inicial y final se observa que es mayor para la arcilla con gas metano al 7 por ciento y menor para la arcilla con mayor contenido de gas, este comportamiento está influenciado por la mayor cantidad de agua en la muestra y en lo que respecta al grado de saturación se observa que disminuye conforme aumenta la cantidad de gas metano, tal como se espera para un suelo gaseoso.

En lo que respecta a la gravedad específica relativa de los sólidos se observa que el valor decrece a medida que aumenta el contenido de zeolita, pero se encuentra en rangos similares que el de la arcilla utilizada en este estudio y por lo tanto no altera sus propiedades significativamente, Nageswaran, 1983.

En la tabla también se observa que la reducción de la altura de la muestra fue de 3.83, 3.25 y 3.52 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, lo que indica que la mayor reducción fue para la arcilla sin gas y la menor para la arcilla con gas metano al 7 por ciento, este comportamiento está influenciado porque se obtiene muy rápidamente la deformación en la muestra con gas.

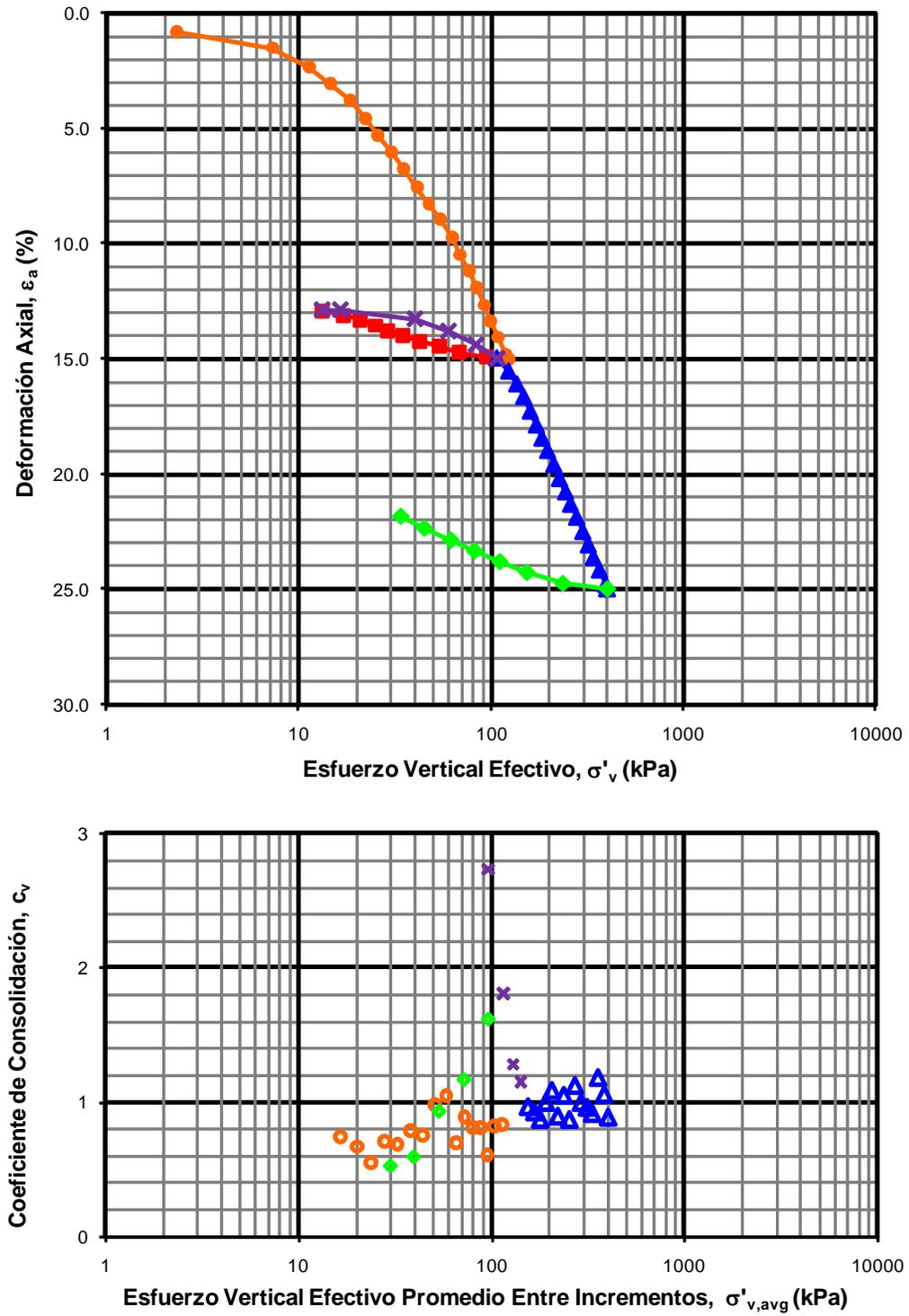


Figura B.2. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación
Arcilla blanda sin gas metano

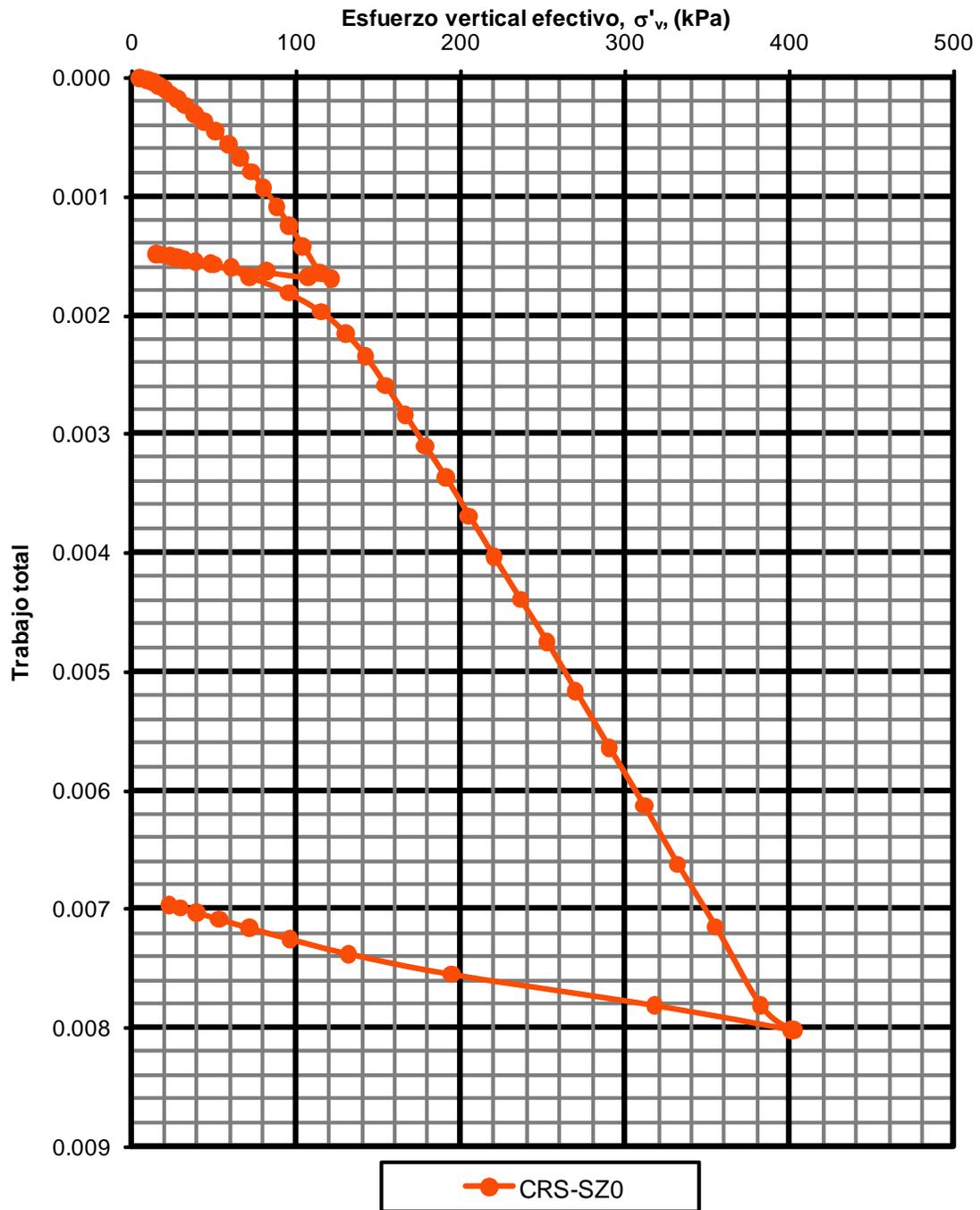


Figura B.3. Curva de compresibilidad. Método de Becker
Arcilla blanda sin gas metano

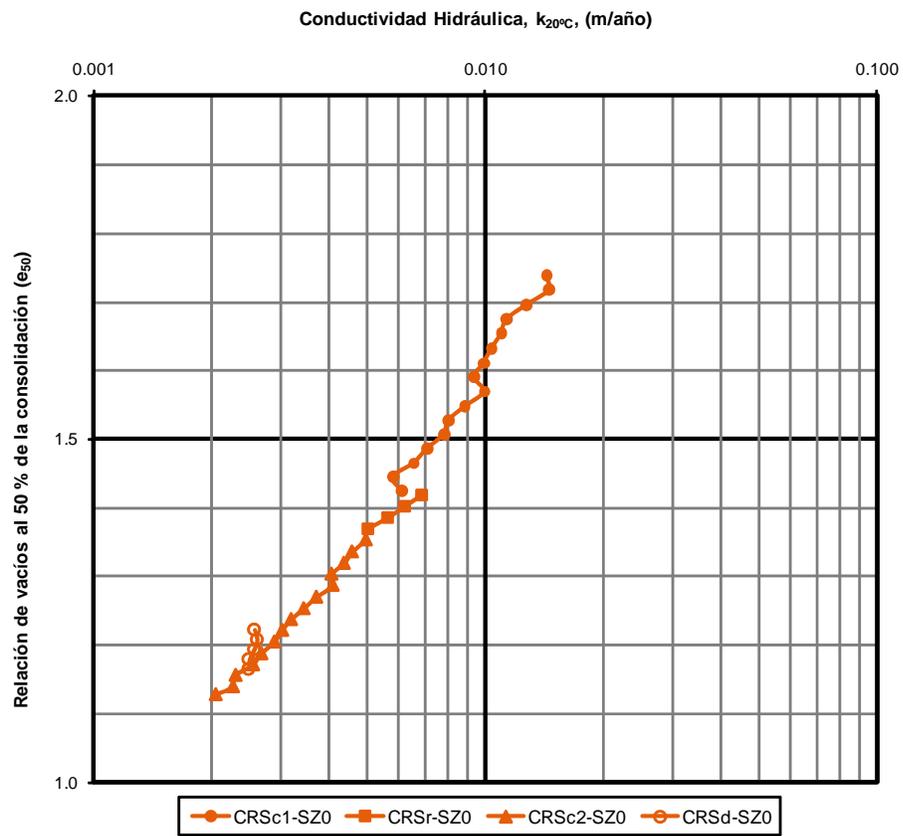


Figura B.4. Conductividad hidráulica. Arcilla blanda sin gas metano

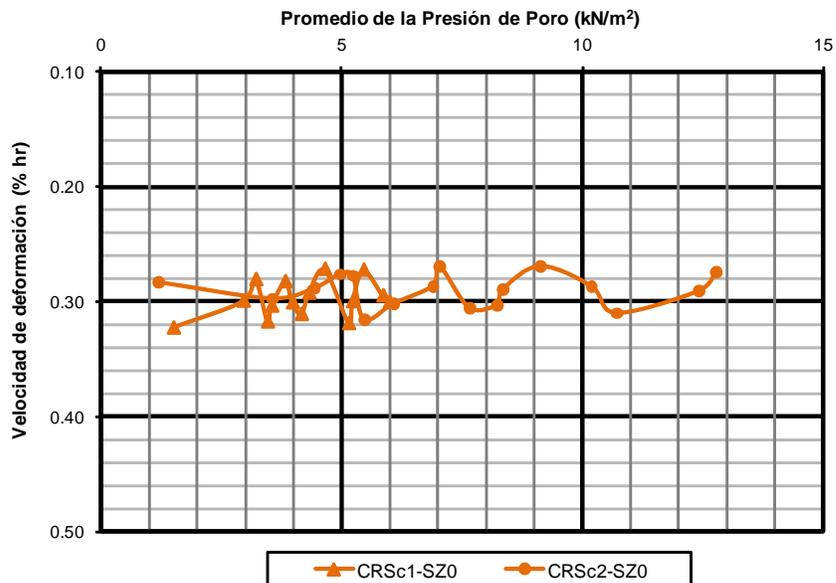


Figura B.5. Presión de poro. Arcilla blanda sin gas metano

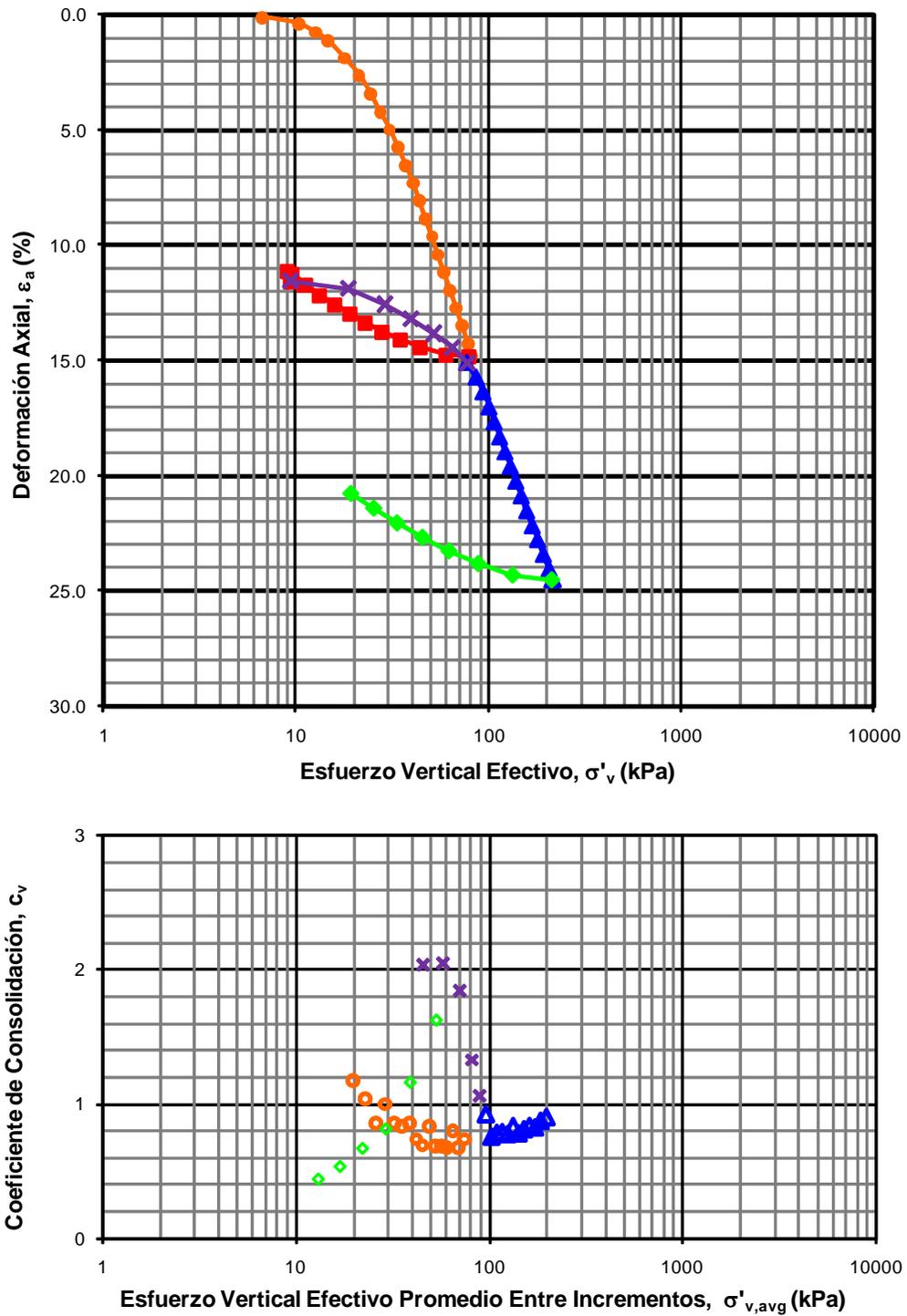


Figura B.6. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación
Arcilla blanda con gas metano al 7 por ciento.

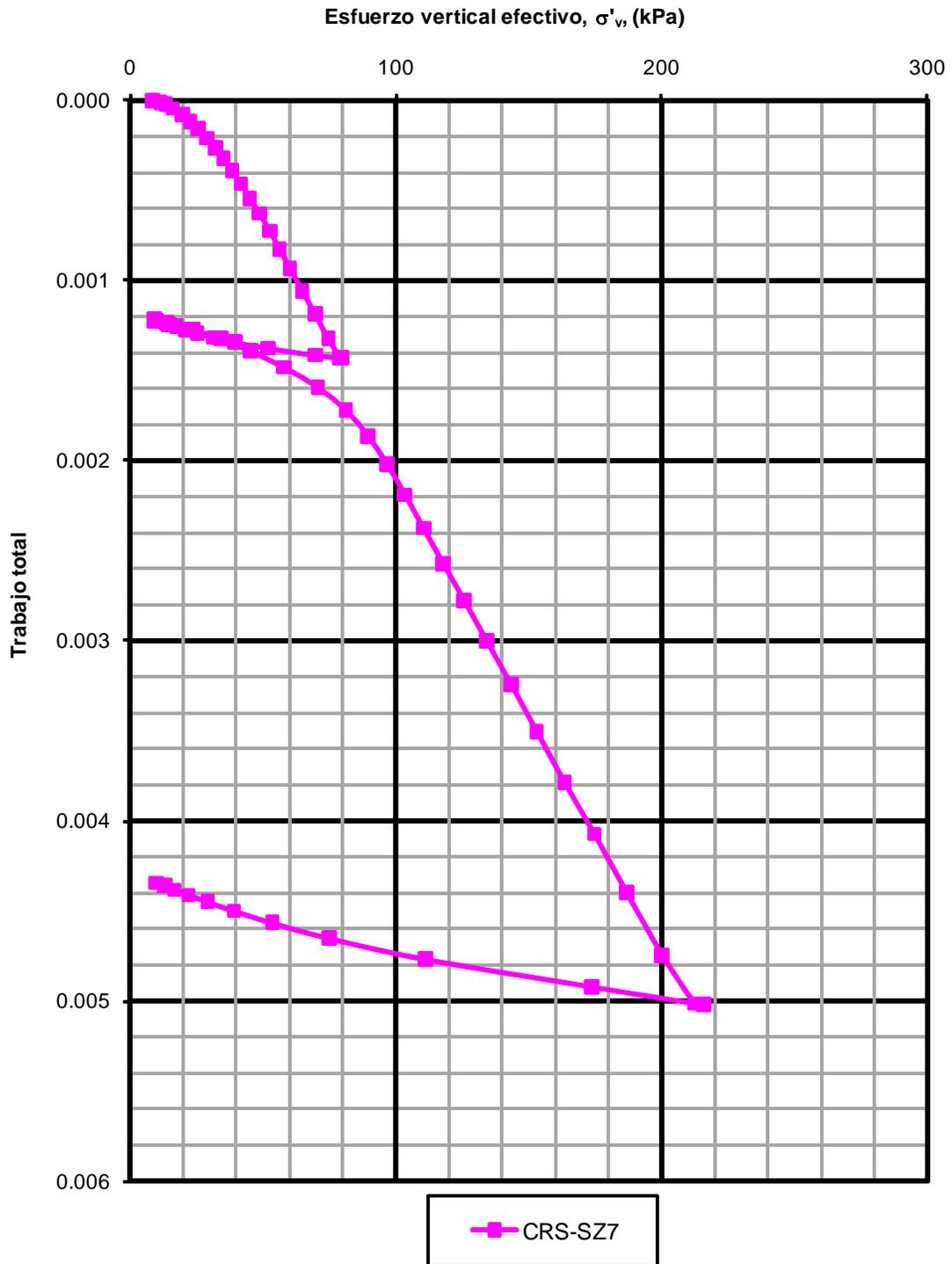


Figura B.7. Curva de compresibilidad. Método de Becker
Arcilla blanda con gas metano al 7 por ciento.

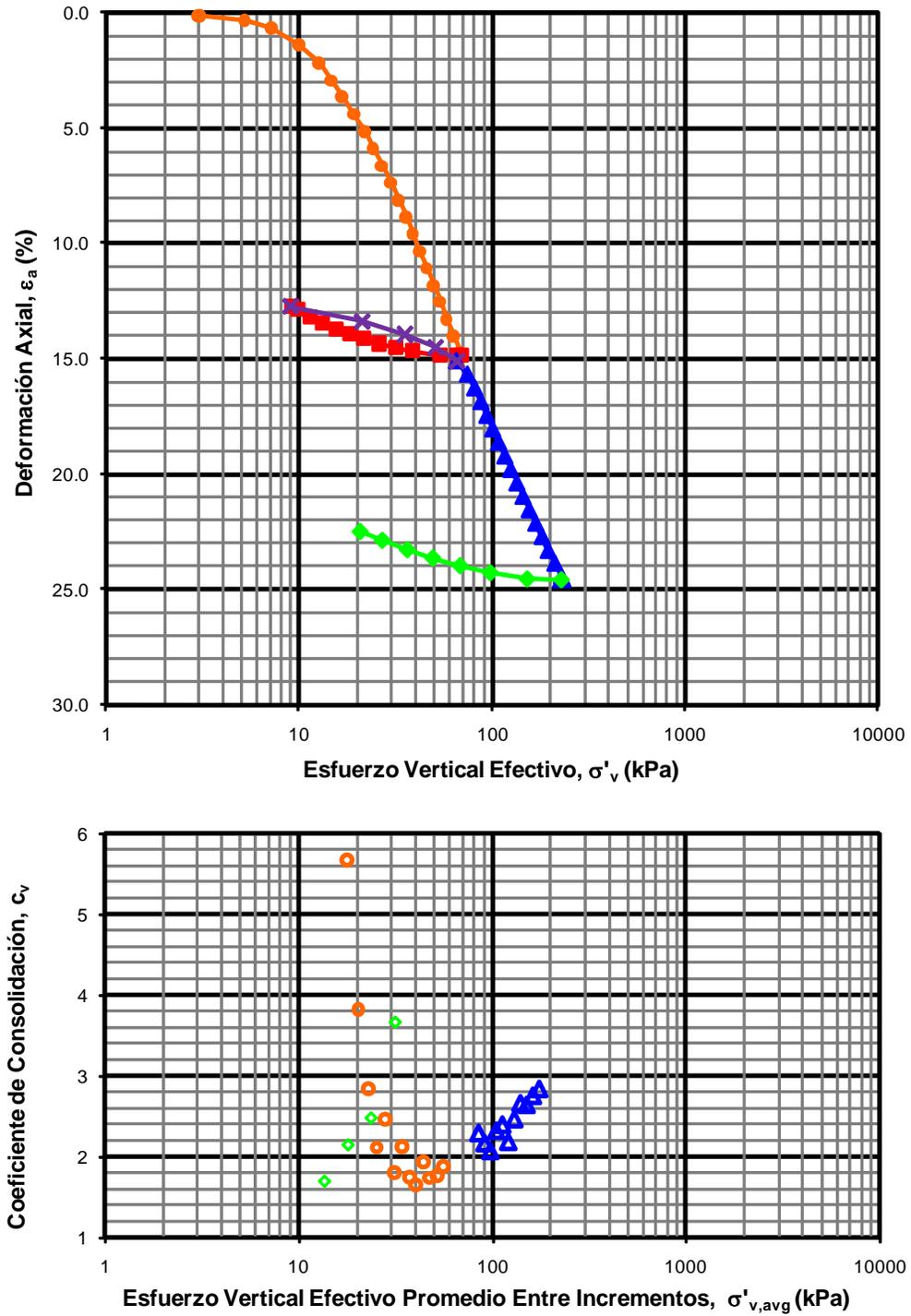


Figura B.10. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación.
Arcilla blanda con gas metano al 15 por ciento.

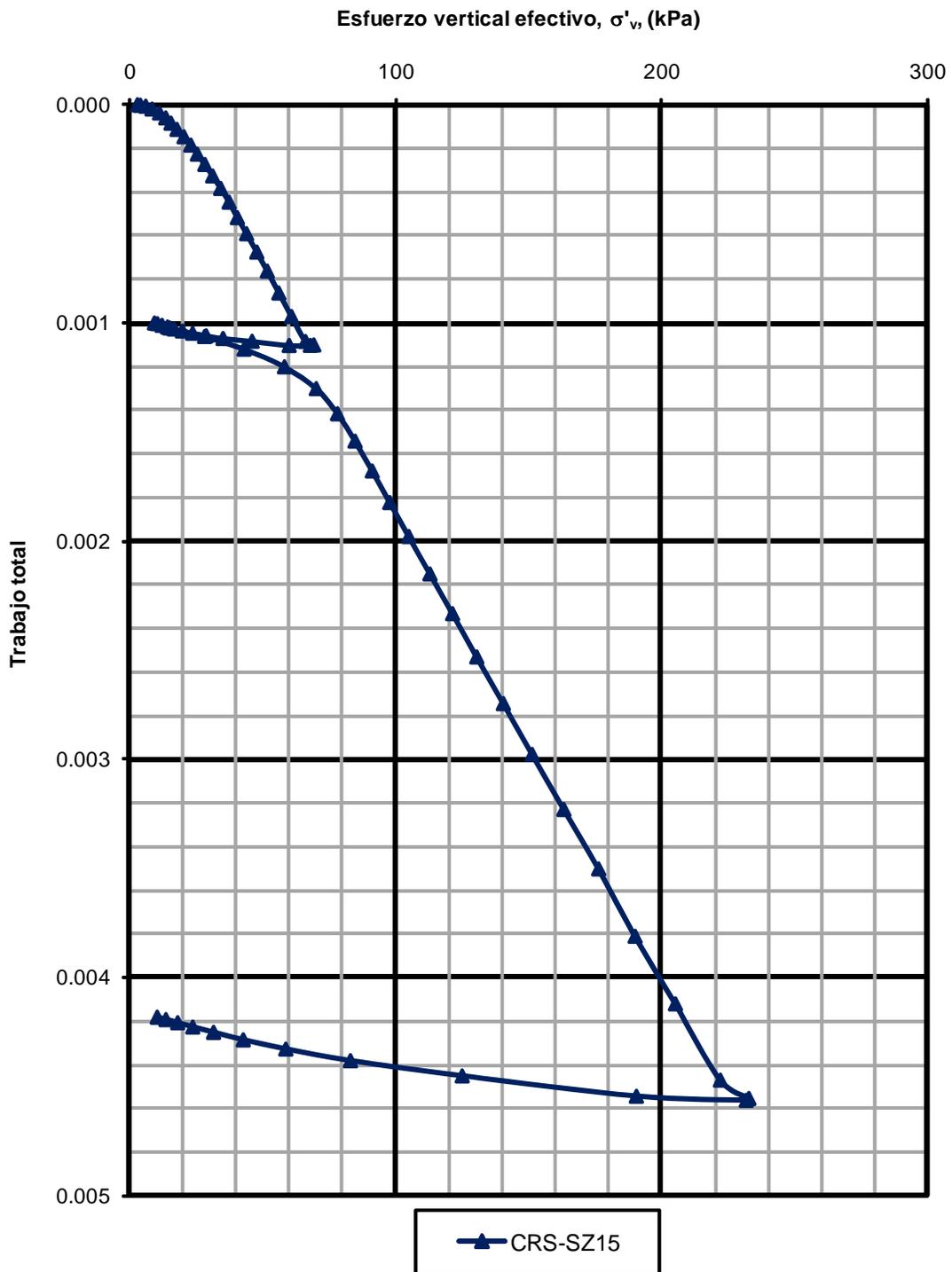


Figura B.11. Curva de compresibilidad. Método de Becker
Arcilla blanda con gas metano al 15 por ciento.

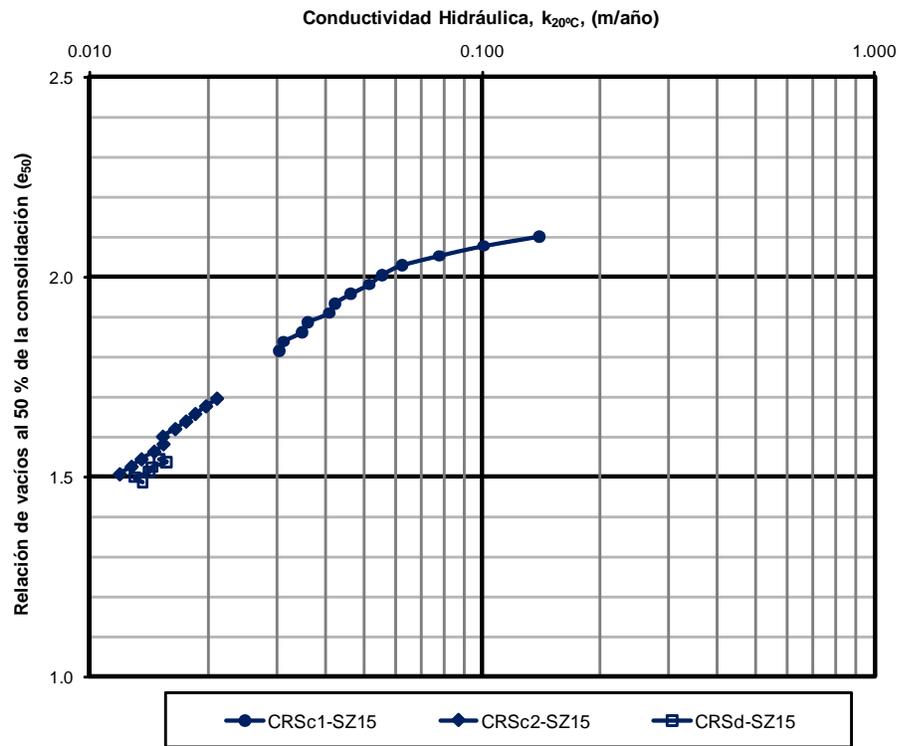


Figura B.12. Conductividad hidráulica. Arcilla blanda con gas metano al 15 por ciento.

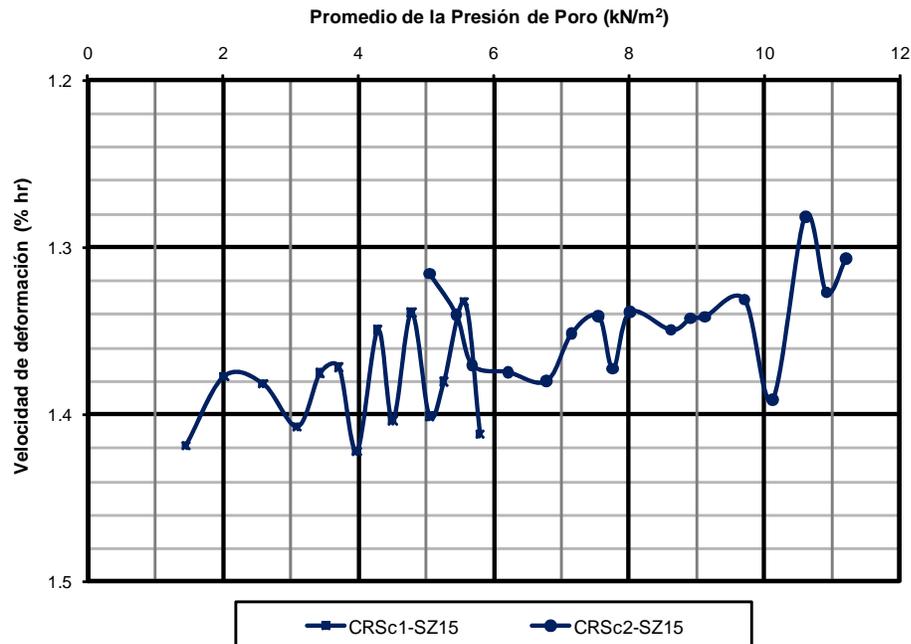


Figura B.13. Presión de poro. Arcilla blanda con gas metano al 15 por ciento.



B.4. Resultados de la arcilla media sin y con gas metano

Las Figuras generadas con los resultados provenientes de cada una de las pruebas de CRS se presentan al final de la sección, mientras que en los siguientes párrafos se comentan las propiedades índice obtenidas para la arcilla media sin y con gas metano, Tabla B.2.

Tabla B.2. Propiedades índice de la arcilla media sin y con gas metano, prueba de CRS.

Propiedades Índice	Muestra FZ0	Muestra FZ7	Muestra FZ15
Contenido de humedad, [%]			
Inicial, w_o	55	74	61
Final, w_f	40	58	47
Límites de Atterberg			
Límite Líquido, LL	82	83	75
Límite Plástico, LP	23	24	26
Índice Plástico, IP	59	59	49
Peso volumétrico [kN/m^3]			
Total inicial, $\gamma_{t,o}$	16.51	15.22	15.27
Total final, $\gamma_{t,f}$	18.07	15.87	17.23
Seco inicial, $\gamma_{d,o}$	10.63	8.29	9.49
Seco final, $\gamma_{d,f}$	12.96	10.05	11.69
Gravedad específica, G_s	2.760	2.641	2.564
Relación de vacíos			
Inicial, e_o	1.540	2.119	1.645
Final, e_f	1.085	1.573	1.147
Grado de saturación Inicial, S_o (%)	99.0	92.5	95.0
Altura de sólidos [mm]	7.583	5.769	7.125
Altura de la muestra [mm]			
Inicial, h_o	19.19	18.74	18.85
Final, h_f	15.76	15.46	15.29

En los resultados se observa que el contenido de agua es mayor para la arcilla con gas metano al 7 por ciento y menor para la arcilla sin gas (tal como sucede para la arcilla blanda), se infiere que la diferencia es debido a que se ejercen mayores presiones en el fluido de poro a mayor

cantidad de gas y por lo tanto se expulsa mayor cantidad de agua, como sucedió durante la reconstitución de la arcilla con gas, Figura B.14, la misma tendencia se observa en el límite líquido, que es prácticamente el mismo en la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, mientras que el límite plástico es prácticamente el mismo en todas las muestras de arcilla.



Figura B.14. Agua expulsada por la presión del gas metano durante la reconstitución de la arcilla

En el caso del peso total y el peso seco se observa que este decrece en la arcilla con gas, al compararlo con de la arcilla sin gas, pero el de la arcilla con gas al 15 por ciento es ligeramente mayor que el de la arcilla con gas al 7 por ciento indicando, posiblemente, la mayor cantidad de gas en la muestra al inicio de la prueba, por lo tanto, mayor cantidad de gas queda confinado o atrapado dentro de la estructura de la arcilla o que las capas de gas creadas durante la reconstitución de la arcilla, transfirieron mayor carga durante la consolidación. En cuanto a la relación de vacíos inicial y final se observa que es mayor para la arcilla con gas metano al 7 por ciento y menor para la arcilla con mayor contenido de gas, este comportamiento está influenciado por la mayor cantidad de agua en la muestra.

En lo que respecta a la gravedad específica relativa de los sólidos se observa que el valor decrece a medida que aumenta el contenido de zeolita, pero se encuentra en rangos similares que el de la arcilla utilizada en este estudio y por lo tanto no altera sus propiedades significativamente, Nageswaran, 1983. En cuanto al grado de saturación, se observa que es ligeramente mayor en la arcilla con gas al 15 por ciento que en la arcilla con gas al 7 por ciento.

En la tabla se observa que la reducción de la altura de la muestra fue de 3.43, 3.28 y 3.56 mm para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, por lo que la mayor reducción fue para la arcilla con gas al 15 por ciento y la menor para la arcilla con gas metano al 7 por ciento.

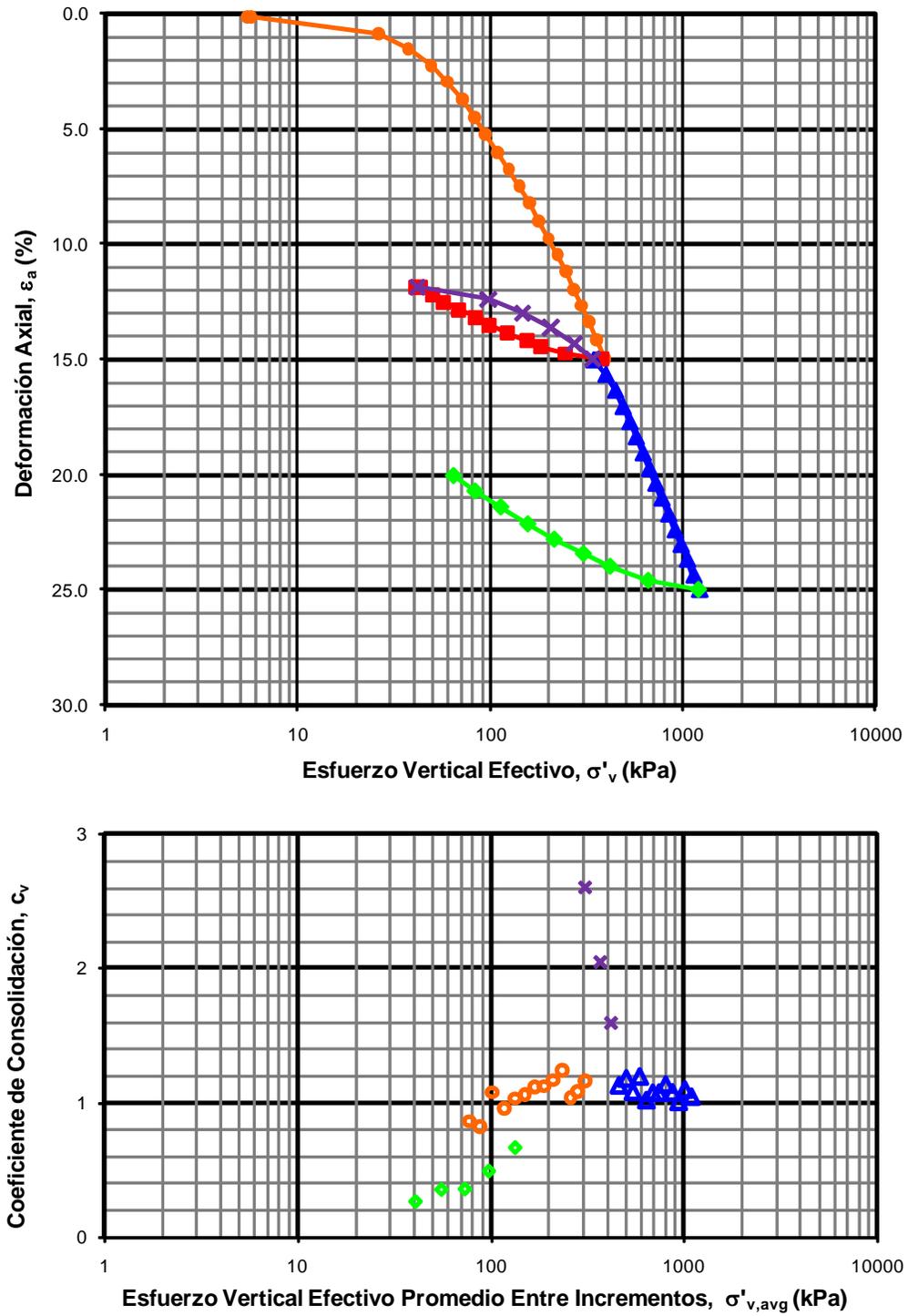


Figura B.15. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación Arcilla media sin gas metano.

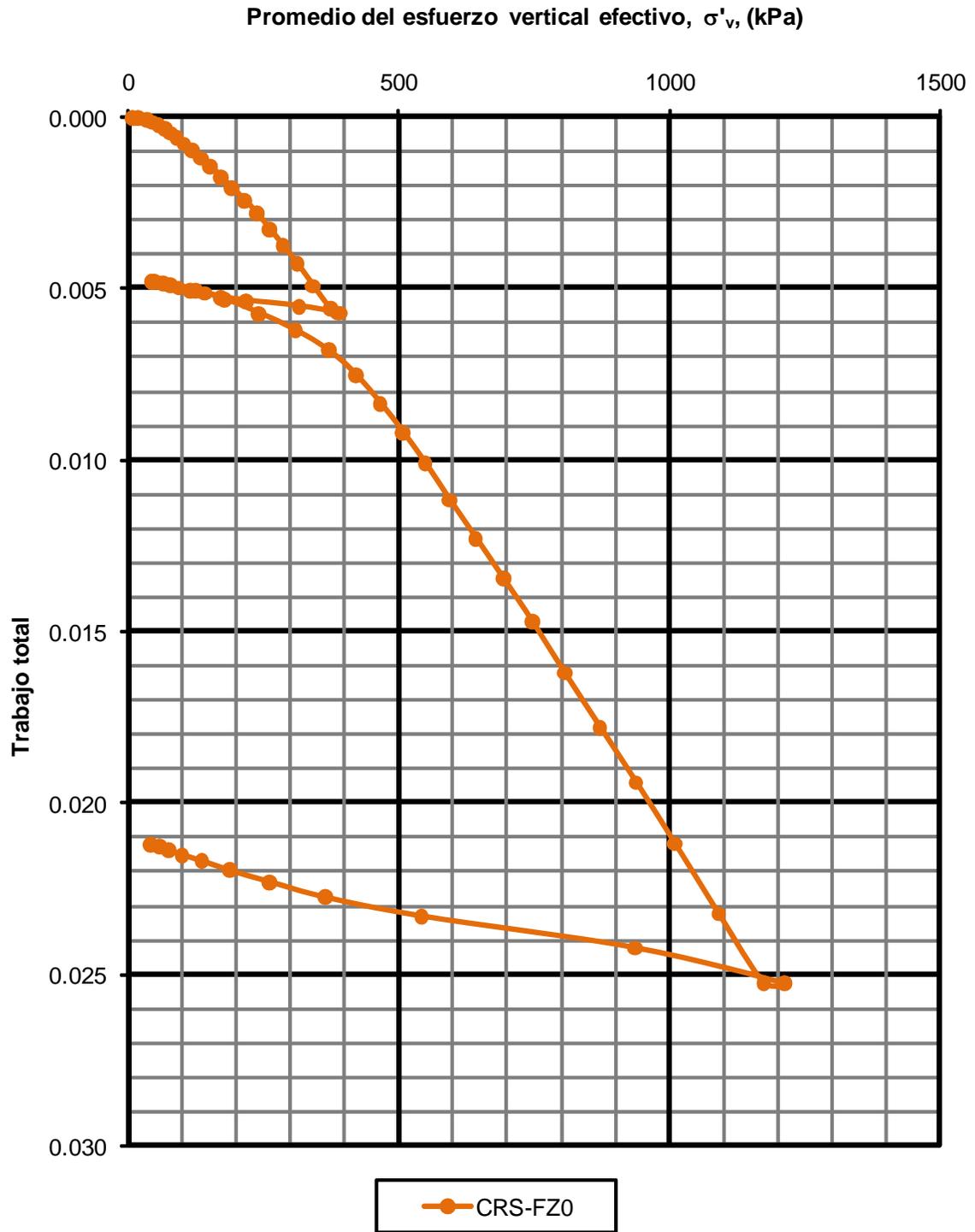


Figura B.16. Curva de compresibilidad. Método de Becker
Arcilla media sin gas metano.

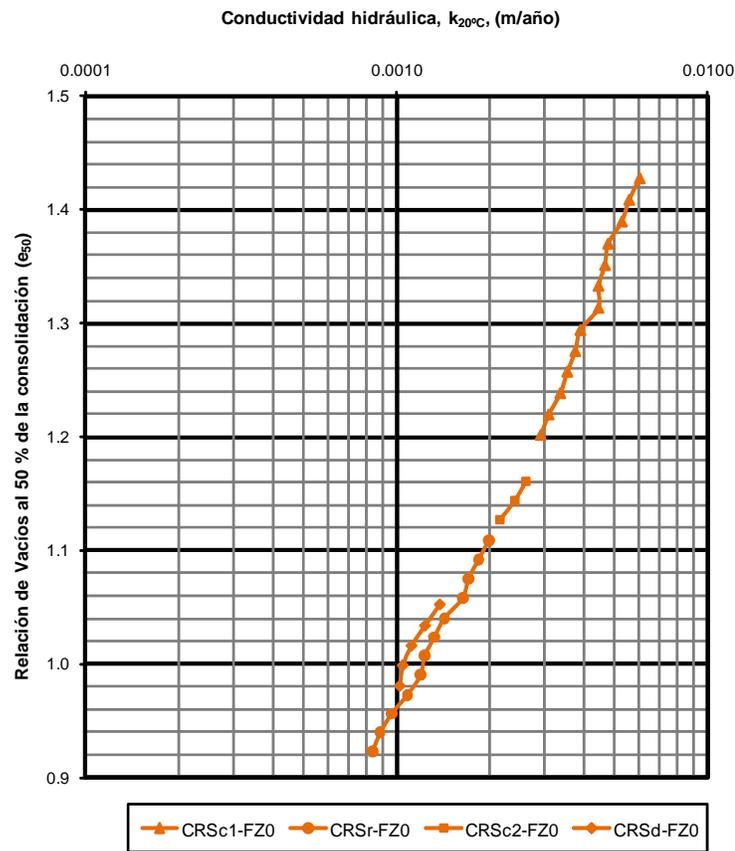


Figura B.17. Conductividad hidráulica. Arcilla media sin gas metano.

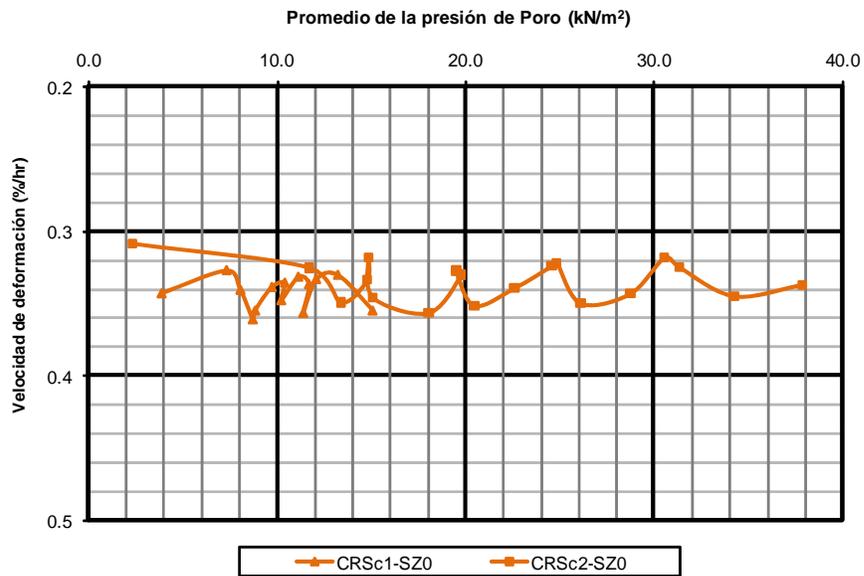


Figura B.18. Presión de poro. Arcilla media sin gas metano.

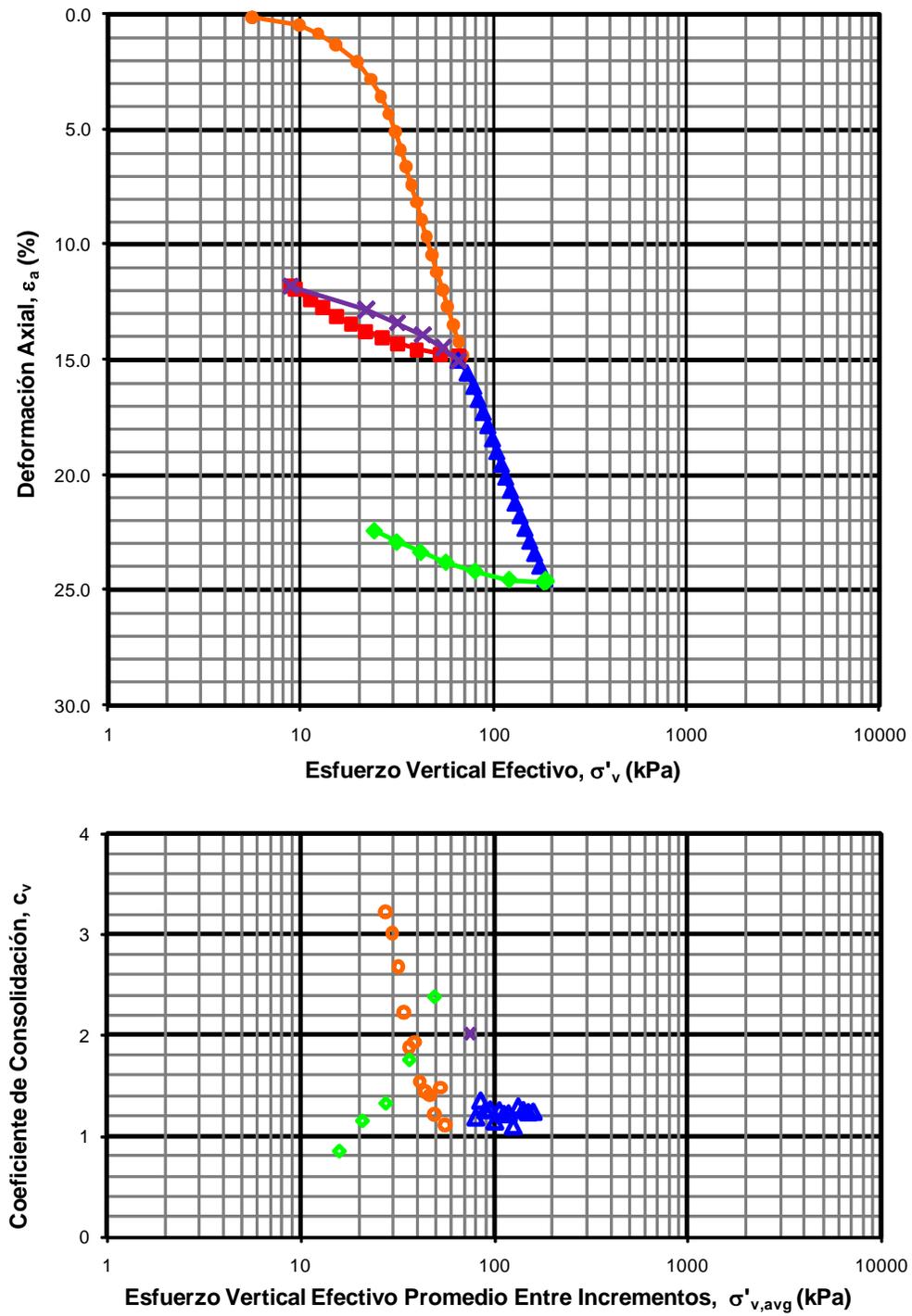


Figura B.19. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación
Arcilla media con gas metano al 7 por ciento.

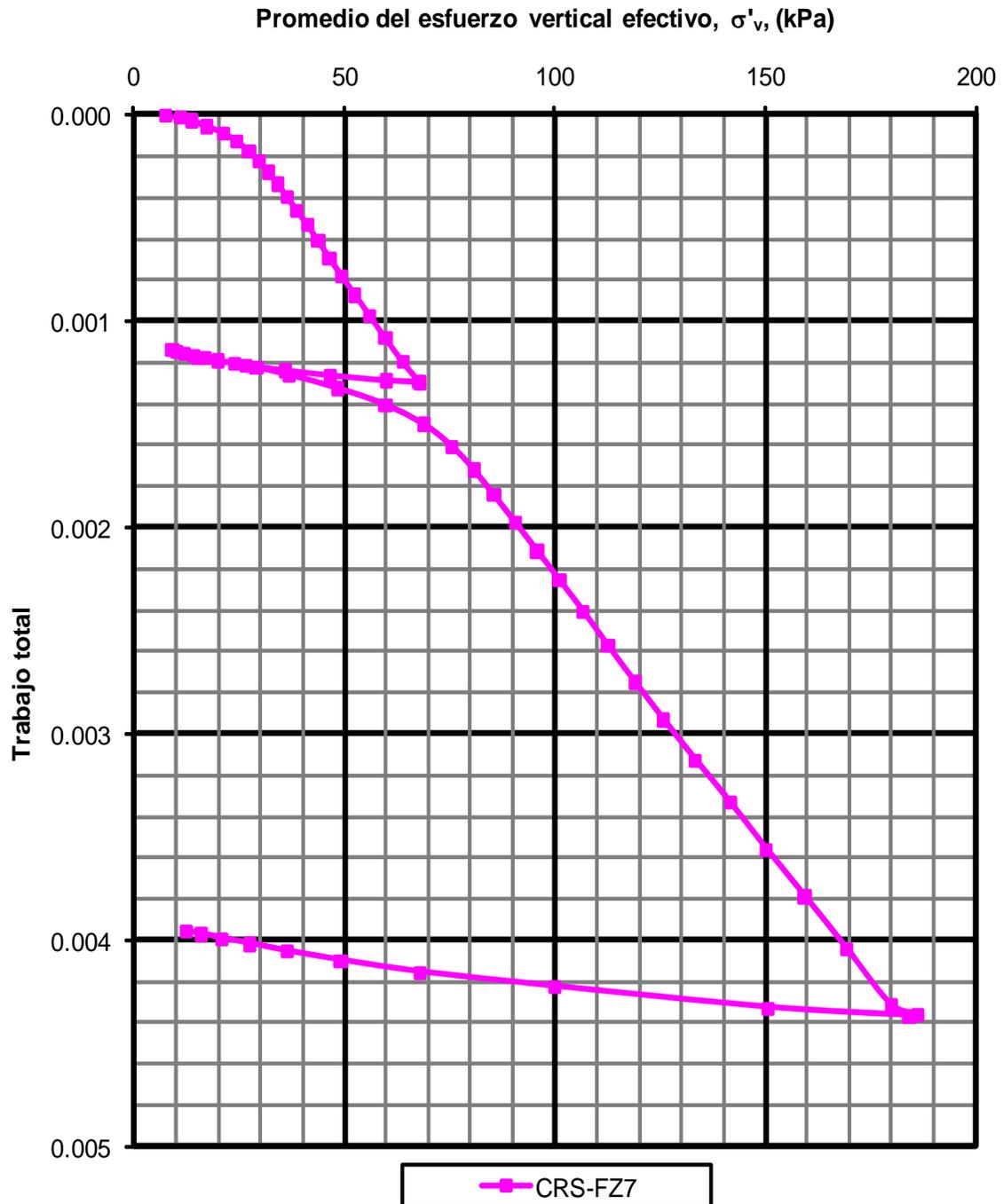


Figura B.20. Curva de compresibilidad. Método de Becker
Arcilla media con gas metano al 7 por ciento.

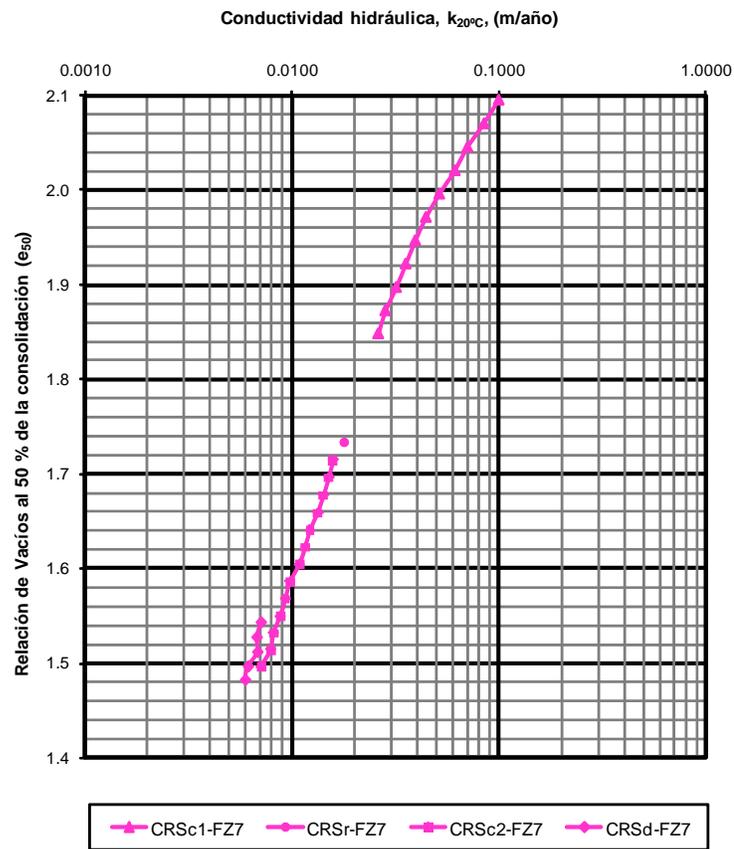


Figura B.21. Conductividad hidráulica. Arcilla media con gas metano al 7 por ciento.

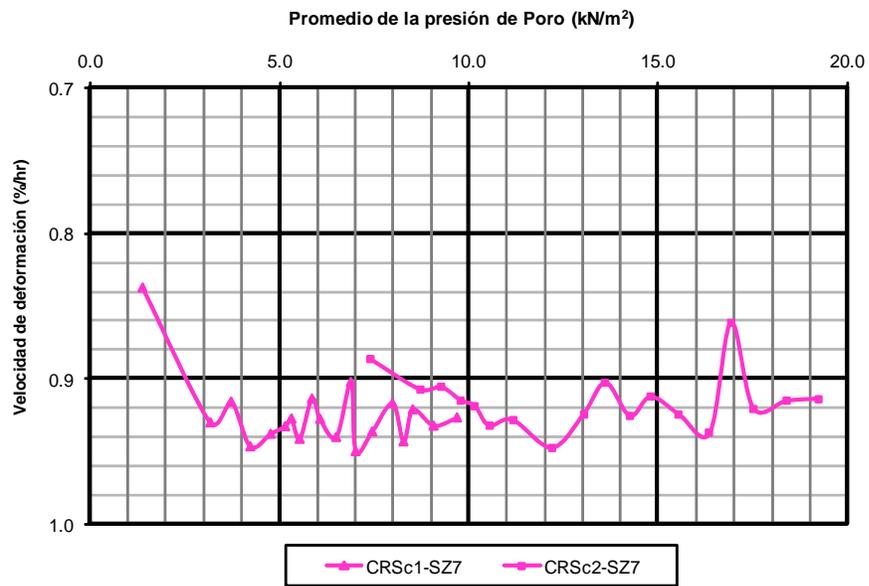


Figura B.22. Presión de poro. Arcilla media con gas metano al 7 por ciento.

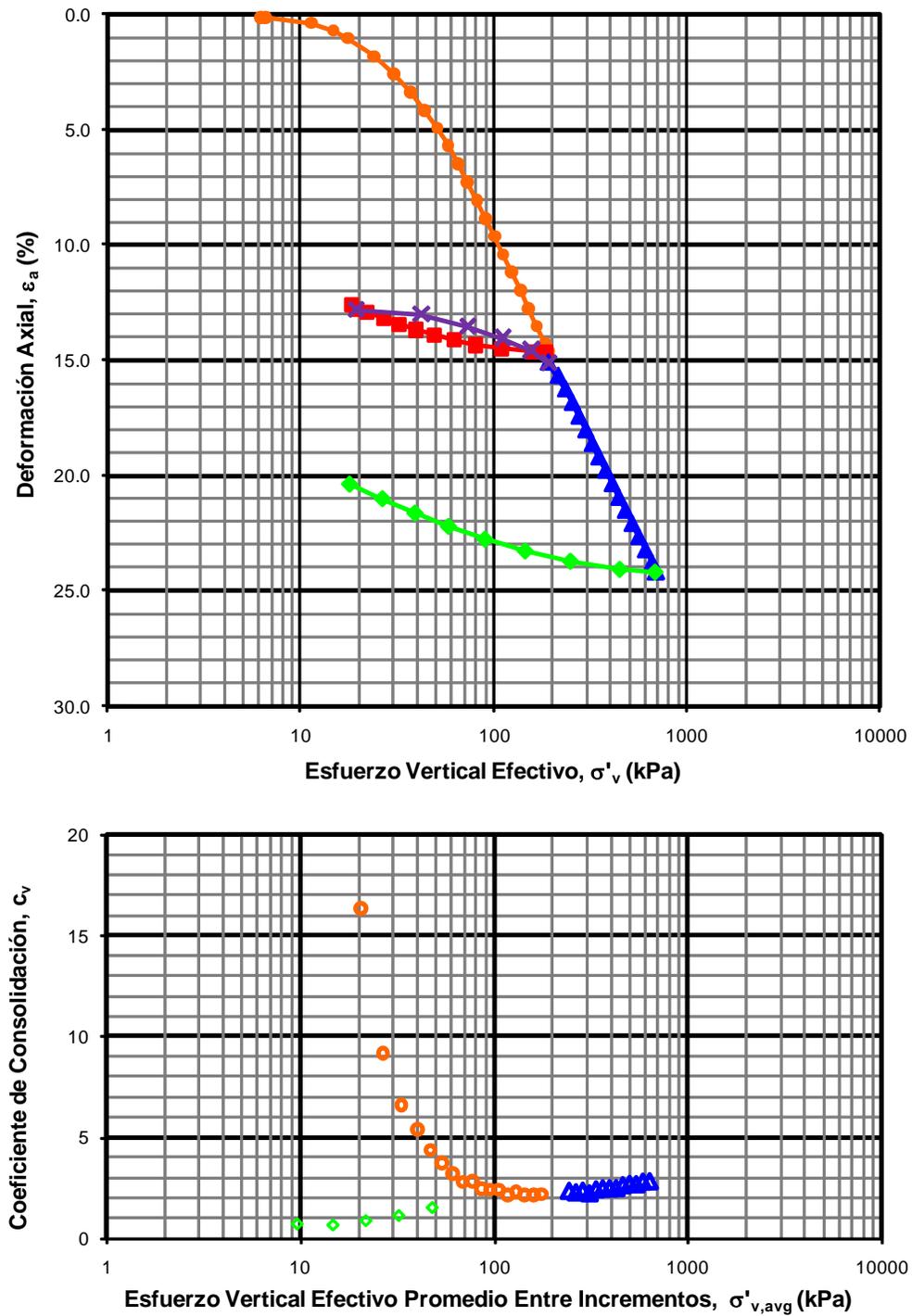


Figura B.23. Curva de compresibilidad y coeficiente de consolidación
Arcilla con gas metano al 15 por ciento

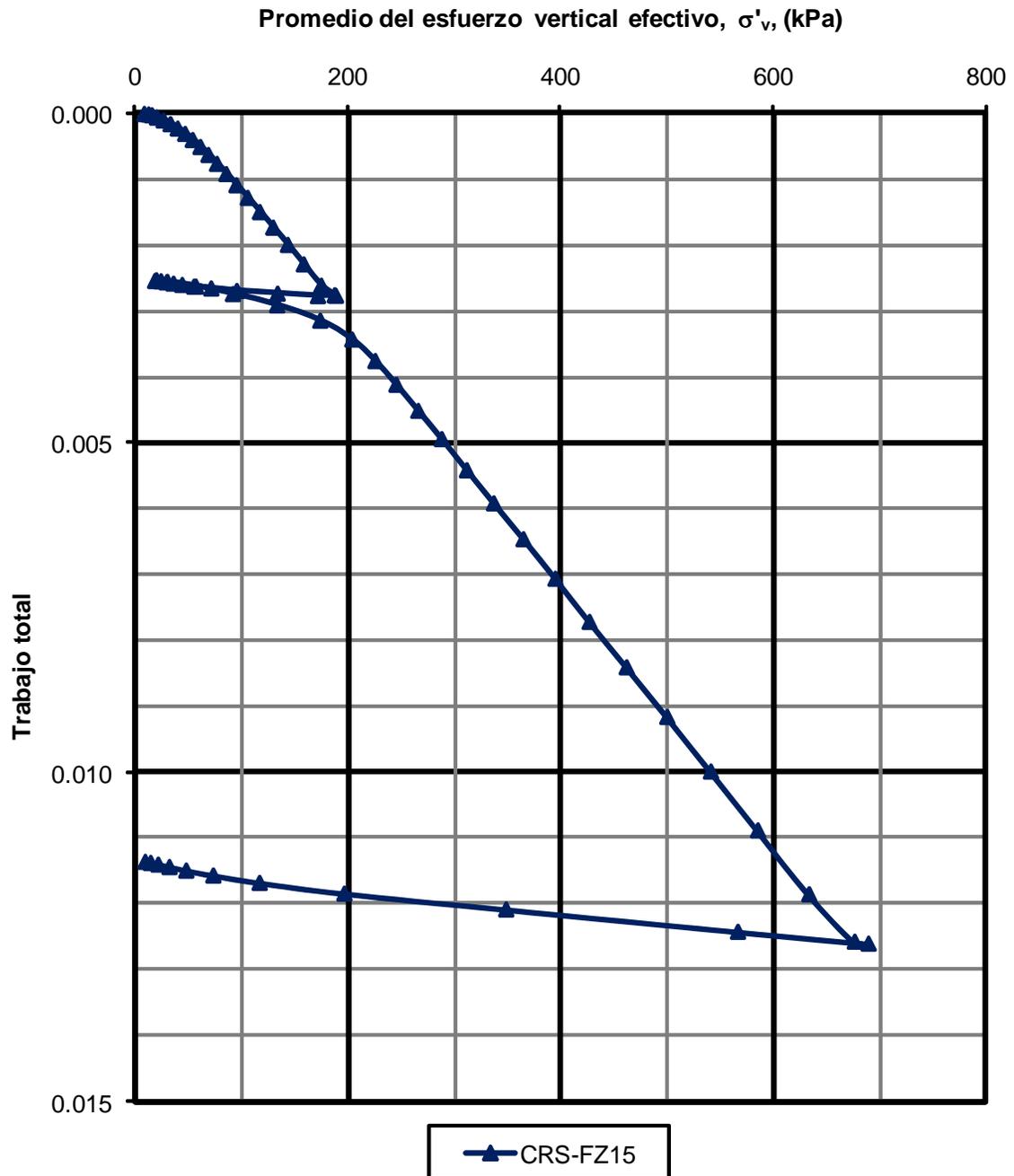


Figura B.24. Curva de compresibilidad. Método de Becker
Arcilla con gas metano al 15 por ciento

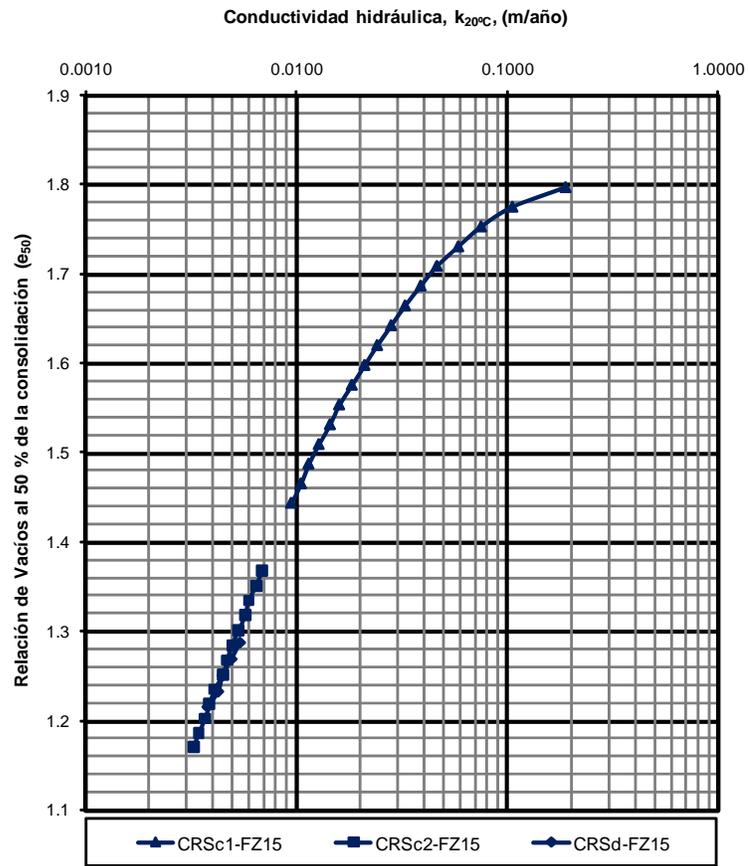


Figura B.25. Conductividad hidráulica. Arcilla media con gas metano al 15 por ciento.

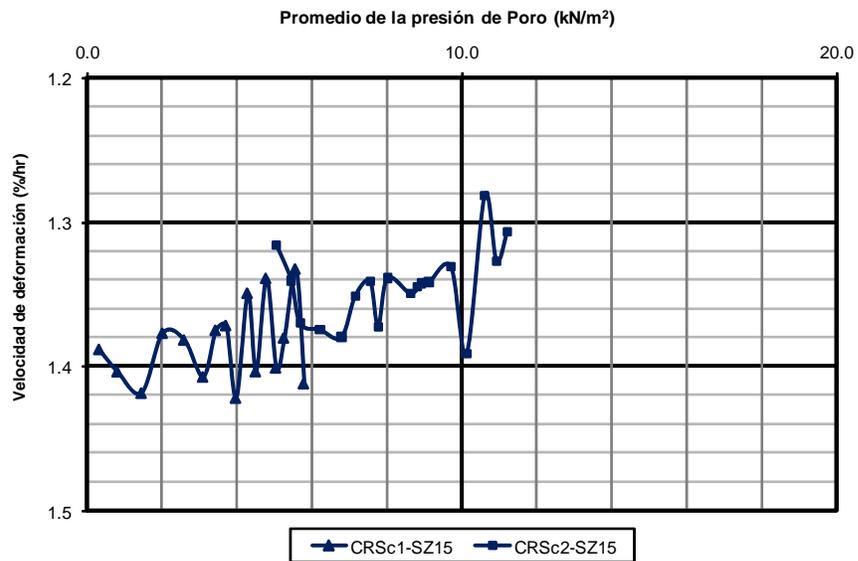


Figura B.26. Presión de poro. Arcilla media con gas metano al 15 por ciento.



B.5. Referencias

American Society for Testing and Materials «Soil and Rock; Building Stones; Geotextiles». Annual Book of ASTM Standards, Vols. 4.08 y 4.09, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania. December 2006.

Becker, D.E., Crooks, J.H.A., Been, K., y Jefferies, M.G. (1987), «Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays». Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, pp. 549-564.

Crawford, C. B., «State of the Art: Evaluation and Interpretation of Soil Consolidation Tests,» Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892, R. N. Yong and F. C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pp. 71-103.

Nageswaran, S. (1983). «Effect of Gas Bubbles on the Sea Bed Behaviour». Doctor Philosophy Thesis. Oxford University. England.

Olson, R.E., (1986) «State of the Art: Consolidation Testing,» Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892, R. N. Yong and F. C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pp. 7-70.

Smith R. E., and Wahls H. E. «Consolidation Under Constant Rates of Strain». Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceeding ASCE, Vol. 95, No SM 2, March, 1969, pp 519 – 539.

Wissa E. Z. Anwar, Christian John T., Davis Edward H. y Heiberg Sigurd. «Consolidation at Constant Rate of Strain. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division», ASCE. Vol. 97. No. SM10. Proceedings Paper 8847. Octubre 1971. pp 1393-1411.





Índice

C.1. Procedimiento y resultados de las pruebas de veleta miniatura	C-1
C.1.1. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas metano .	C-2
C.1.2. Resultados de las pruebas índice de la arcilla media sin y con gas metano...	C-3
C.2. Procedimiento y resultados de las pruebas triaxiales	C-4
C.2.1. Resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano	C-5
C.2.2. Resultados de la arcilla media sin y con gas metano	C-10
C.3. Procedimiento y resultados de las pruebas de corte simple directo	C-15
C.3.1. Resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano	C-17
C.3.1.1. Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora.....	C-17
C.3.1.2. Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora	C-28
C.3.1.3. Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora.....	C-38
C.3.2. Resultados de la arcilla media sin y con gas metano	C-47
C.3.1.1. Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora.....	C-47
C.3.1.2. Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora	C-56
C.3.1.3. Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora.....	C-65
C.1.3. Referencias	C-74

Relación de Tablas y Figuras

Tabla	Página
Tabla C-1. Propiedades índice de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-2
Tabla C-2. Propiedades índice de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-3
Tabla C-3. Resultados de la prueba triaxial en la arcilla blanda sin y con gas metano	C-5
Tabla C-4. Resultados de la prueba triaxial en la arcilla blanda sin y con gas metano	C-6
Tabla C-5. Resultados de la prueba triaxial en la arcilla media sin y con gas metano.....	C-10
Tabla C-6. Resultados de la prueba triaxial en la arcilla media sin y con gas metano	C-11
Tabla C-7a. Características de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora	C-17
Tabla C-7b. Características normalizadas de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora.....	C-18
Tabla C-8. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas metano (Pruebas estáticas de DSS)	C-27



Tabla	Página
Tabla C-9. Características de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora	C-28
Tabla C-10. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas metano (Pruebas rápidas DSS a 100 por ciento de deformación por hora)	C-37
Tabla C-11. Características de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora	C-38
Tabla C-12. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas (Pruebas rápidas DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora)	C-47
Tabla C-13. Características de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora	C-48
Tabla C-14. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas metano (Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora)	C-55
Tabla C-15a. Características de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora.....	C-56
Tabla C-15b. Características normalizadas de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora	C-56
Tabla C-16. Resultados de las pruebas índice de la arcilla media sin y con gas metano (Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora	C-64
Tabla C-17. Resultados de la prueba de DSS de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora.	C-65
Tabla C-18. Resultados de las pruebas índice de la arcilla media sin y con gas metano. (Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora).	C-73

Figura	Página
Figura C-1. Procedimiento de la prueba de veleta miniatura en la arcilla sin y con gas metano	C-1
Figura C-2. Equipo de la prueba triaxial.....	C-4
Figura C-3. Curvas de la prueba triaxial para la arcilla blanda sin y con gas	C-7
Figura C-4. Curvas de la prueba triaxial para la arcilla blanda sin y con gas	C-8
Figura C-5. Oblicuidad de las pruebas triaxiales de la arcilla blanda sin y con gas	C-9
Figura C-6. Curvas de la prueba triaxial para la arcilla media sin y con gas	C-12
Figura C-7. Curvas de presión de poro en prueba triaxial para la arcilla media sin y con gas metano.....	C-13
Figura C-8. Oblicuidad de las pruebas triaxiales de la arcilla media sin y con gas	C-14
Figura C-9. Prueba de corte simple directo	C-16
Figura C-10. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-18
Figura C-11. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano	C-19
Figura C-12. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla blanda sin y con gas metano	C-20
Figura C-13. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-21



Figura	Página
Figura C-14. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-21
Figura C-15. Presión de poro normalizada de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-22
Figura C-16a. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-23
Figura C-16b. Detalle del módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas.....	C-24
Figura C-17a. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-25
Figura C-17b. Detalle del módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas.....	C-25
Figura C-18. Angulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-26
Figura C-19. Angulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-26
Figura C-20. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-29
Figura C-21. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-29
Figura C-22a. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-30
Figura C-22b. Detalle del decremento de esfuerzo vertical de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-31
Figura C-23. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-32
Figura C-24. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-32
Figura C-25. Presión de poro normalizada de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-33
Figura C-26a. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-34
Figura C-26b. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-35
Figura C-27. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-35
Figura C-28. Angulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-36
Figura C-29. Angulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-37
Figura C-30. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-39
Figura C-31. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-39
Figura C-32. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-40
Figura C-33. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-41
Figura C-34. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-42
Figura C-35. Presión de poro normalizada de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-43
Figura C-36a. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-44
Figura C-36b. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-44
Figura C-37a. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-45
Figura C-37b. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-46



Figura	Página
Figura C-38. Angulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano	C-46
Figura C-39. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-49
Figura C-40. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano	C-49
Figura C-41. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla media sin y con gas metano	C-50
Figura C-42. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-50
Figura C-43. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano	C-51
Figura C-44. Presión de poro normalizada de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-52
Figura C-45. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.	C-53
Figura C-46. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano	C-54
Figura C-47. Angulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano	C-54
Figura C-48. Angulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-55
Figura C-49. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-57
Figura C-50. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano	C-58
Figura C-51. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla media sin y con gas metano	C-59
Figura C-52. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-59
Figura C-53. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano	C-60
Figura C-54. Presión de poro normalizada de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-61
Figura C-55. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.	C-61
Figura C-56a. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-62
Figura C-56b. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-62
Figura C-57. Angulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano	C-63
Figura C-58. Angulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-64
Figura C-59. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-60
Figura C-60. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano	C-60
Figura C-61. Decremento de esfuerzo vertical normalizado de la arcilla media sin y con gas metano	C-67
Figura C-62. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-68
Figura C-63. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano	C-68
Figura C-64. Presión de poro normalizada de la arcilla blanda sin y con gas metano.....	C-69
Figura C-65. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.	C-70
Figura C-66a. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.....	C-71
Figura C-66b. Detalle del módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas.....	C-72
Figura C-67. Angulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano	C-72

C.1. Procedimiento y resultados de las pruebas de veleta miniatura

En este estudio se realizaron pruebas de veleta miniatura, Figura C.1, motorizada para medir la resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla blanda y media sin y con gas metano, con la finalidad de conocer las posibles variaciones en su resistencia inalterada, residual y remoldeada. Las pruebas de veleta miniatura se apegaron a las recomendaciones emitidas en la norma D4648 de la ASTM y el procedimiento consistió en:

- 1) Previo a la prueba de veleta miniatura se realizó una prueba de torcómetro en las muestras inalteradas sin y con gas metano, Figura C.1a;
- 2) Se colocó la muestra en el equipo de veleta miniatura y se introdujo una veleta pequeña de cuatro aspas en la muestra inalterada de arcilla;
- 3) Una vez estando la veleta en posición, se aplicó una fuerza de torsión a través de un resorte calibrado que se activó a través de un sistema motorizado de polea y banda, generando una rotación lenta de la veleta hasta que ocurrió la falla por corte en la arcilla sin y con gas metano, Figura C.1b;



(a). Prueba de torcómetro



(b). Prueba de veleta miniatura

Figura C.1. Procedimiento de la prueba de veleta miniatura en la arcilla sin y con gas metano.

- 4) Una vez terminada la prueba, se retiró el resorte y se giró la veleta en sentido contrario a su rotación y se obtuvo la resistencia residual de la arcilla;



- 5) Una vez completada la prueba para conocer la resistencia residual de la arcilla, se extrajo la muestra y se remoldeó para medir la resistencia remoldeada al esfuerzo cortante de la arcilla sin y con gas metano, siguiendo la secuencia (1) a (3);

La resistencia al esfuerzo cortante inalterada, residual y remoldeada de la arcilla se obtuvo de la fuerza de torsión transmitida por el resorte calibrado, multiplicando la rotación neta, en grados, por el factor de calibración del resorte.

- 6) Una vez terminada la medición de la resistencia inalterada, residual y remoldeada se tomaron partes representativas de la arcilla y se determinaron los límites de Atterberg, el contenido de agua y el peso específico relativo de sólidos.

C.1.1. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas metano

En la Tabla C.1 se presentan los resultados de los límites de Atterberg y del contenido de agua correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas metano.

Tabla C.1. Propiedades índice de la arcilla blanda sin y con gas metano.

Propiedades índice						
Arcilla blanda	Número de muestra	Límites de Atterberg			Contenido de agua (ω), [%]	
		LL	LP	IP	Inalterada	Remoldeada
sin gas metano	MVSZ0-4	76	23	53	73	72
	MVSZ0-2	75	23	52	72	72
	MVSZ0-3	74	24	50	71	72
con gas metano al 7 por ciento	MVSZ7-10	82	23	59	75	73
	MVSZ7-9	87	23	64	74	72
	MVSZ7-7	83	25	58	74	73
con gas metano al 15 por ciento	MVSZ15-7	73	26	47	71	70
	MVSZ15-8	75	27	48	71	70
	MVSZ15-6	72	25	47	70	70

En la Tabla C.1 se observa que el contenido de agua de la muestra inalterada equivale en promedio al 72, 74 y 71 por ciento para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente, lo que indica que es prácticamente la misma para la primera y la última muestra; mientras que para la arcilla remoldeada el contenido de agua es de 72, 73 y 70 por ciento para la



arcilla sin y con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, que son prácticamente los mismos que los de la muestra inalterada.

En cuanto a los límites de Atterberg se observa que prácticamente no existe variación en el límite líquido entre la arcilla sin y con gas metano al 15 por ciento. Mientras que la variación con la arcilla con gas al 7 por ciento, es de aproximadamente ± 10 por ciento. En lo que respecta al límite plástico se observa que es, prácticamente, el mismo para la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento, mientras que la variación con la arcilla con gas al 15 por ciento es del 3 por ciento.

El valor obtenido del peso específico relativo de sólidos es de 2.741, 2.587 (para la muestra MVSZ7-7; de 2.672 y 2.584 para la muestra MVSZ7-9 y MVSZ7-10, respectivamente) y 2.579 (para la muestra MVSZ15-6; para la muestra MVSZ15-8 se obtuvo 2.592) para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente.

C.1.2. Resultados de las pruebas índice de la arcilla media sin y con gas metano

En la Tabla C.2 se presentan los resultados de los límites de Atterberg y del contenido de agua correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano.

Tabla C.2. Propiedades índice de la arcilla media sin y con gas metano.

Propiedades índice						
Arcilla media	Número de muestra	Límites de Atterberg			Contenido de agua (ω), [%]	
		LL	LP	IP	Inalterada	Remoldeada
sin gas metano	MVFZ0-5	79	24	55	57	57
	MVFZ0-6	80	24	56	53	53
	MVFZ0-7	79	24	54	53	53
con gas metano al 7 por ciento	MVFZ7-4	87	25	62	73	74
	MVFZ7-5	88	27	61	74	74
	MVFZ7-8	85	26	59	73	73
con gas metano al 15 por ciento	MVFZ15-6	73	27	46	55	54
	MVFZ15-7	73	27	46	56	54
	MVFZ15-8	74	27	47	55	55

En la Tabla C.2 se observa que el contenido de agua correspondiente a la muestra inalterada es de aproximadamente 53, 73 y 55 por ciento para la arcilla sin y con gas metano al 7 y



15 por ciento, siendo prácticamente el mismo entre la arcilla sin y con gas a 15 por ciento; mientras que para la muestra remoldeada el contenido de agua es del 53, 74 y 54 por ciento para la arcilla sin y con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, comportándose similarmente que la arcilla inalterada.

En cuanto a los límites de Atterberg se observa que el límite líquido es del 79, 87 y 73 por ciento para la arcilla sin y con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, obteniéndose una variación del 8 y de menos seis (-6), con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto al límite plástico se observa que es prácticamente el mismo para la arcilla con gas y ligeramente menor en la arcilla sin gas. Por lo tanto, el índice de plasticidad es mayor en la arcilla con gas al 7 por ciento y menor en la arcilla con gas al 15 por ciento.

El valor obtenido del peso específico relativo de los sólidos es de 2.748, 2.560 (para la muestra MVFZ7-4; 2.560 y 2.550 para la muestra MVFZ7-9 y MVFZ7-8, respectivamente) y 2.669 para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente.

C.2. Procedimiento y resultados de las pruebas triaxiales

Las pruebas triaxiales efectuadas a la arcilla media y blanda sin y con gas metano se realizaron tal como se describe en la norma D2850-95e1 de la ASTM, con la única variante de medir la presión de poro durante su desarrollo, para tal efecto se empleó el equipo de las pruebas triaxiales consolidadas, Figura C-2.

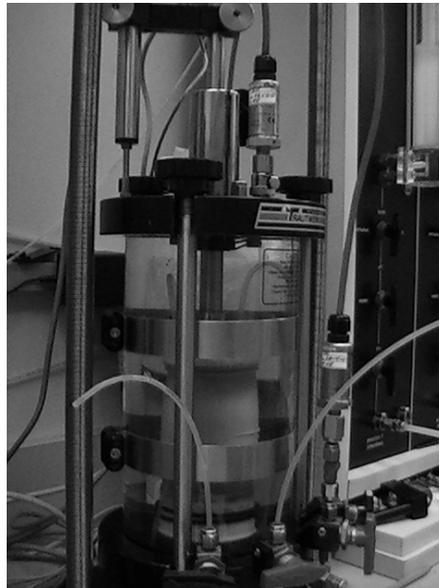


Figura C-2. Equipo de la prueba triaxial.



Una vez terminada la medición de la resistencia al esfuerzo cortante se tomaron partes representativas de la arcilla para determinar los límites de Atterberg, el contenido de agua y el peso específico relativo de sólidos, para ambas consistencias de la arcilla.

C.2.1. Resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano

En la Tabla C.3 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas triaxiales y algunas de las propiedades índice correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas metano. Las pruebas índice restantes se presentan en la Tabla C.4. Los resultados del esfuerzo cortante se comentan en el Capítulo IV de este estudio.

Tabla C.3. Resultados de la prueba triaxial en la arcilla blanda sin y con gas metano.

Resistencia al esfuerzo cortante y propiedades índice								
Arcilla blanda	Número de muestra	Su kPa	ε_a^* %	Gs	n_o	e_o	S_o	ω
sin gas metano (SZ0)	UUSZ0-4	11.01	8.83	2.656	0.635	1.741	101.3	68
	UUSZ0-7	7.85	8.05	2.658	0.639	1.771	100.8	69
con gas metano al 7 por ciento (SZ7)	UUSZ7-3	9.29	6.45	2.700	0.691	2.241	92.2	77
	UUSZ7-4	6.70	6.36	2.708	0.691	2.231	92.0	76
	UUSZ7-5	9.10	6.88	2.684	0.683	2.154	95.0	76
con gas metano al 15 por ciento (SZ15)	UUSZ15-3	6.22	4.81	2.560	0.688	2.209	89.4	72
	UUSZ15-4	5.70	4.93	2.444	0.687	2.191	89.7	72
	UUSZ15-5	6.42	4.97	---	0.692	2.244	88.6	72

Nota: El * representa el valor a la falla de la muestra

En la Tabla C.3 se observa que la deformación, ε_a , a la que falla la muestra es consistente para cada una de las muestras; promediando la deformación, para efectos de comparación, se obtiene una diferencia de aproximadamente el 22 y 42 por ciento por ciento, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto al peso específico relativo de los sólidos se observa que los menores valores obtenidos corresponden a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En cuanto a la porosidad, Tabla C.3, se observa que los mayores valores corresponden a la arcilla con gas metano al 7 por ciento y los menores a los de la arcilla sin gas. Promediando los valores, para efectos de comparación, se obtiene la misma porosidad para ambas muestras de arcilla con gas; la diferencia obtenida equivale aproximadamente al 8 por ciento de mayor



porosidad en la arcilla con gas, con respecto a la arcilla sin gas. En el caso de la relación de vacíos se observa que también sigue la misma tendencia que la porosidad. Promediando los valores, para efectos de comparación, se obtiene una diferencia equivalente al 26 y 27 por ciento de mayor relación de vacíos para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, con respecto a la arcilla sin gas.

En cuanto al grado de saturación se observa que este disminuye con el contenido de gas, tal como se espera para un suelo en el que la cantidad de gas metano aumenta. En cambio, el contenido de agua es mayor en la arcilla con gas al 7 por ciento y el menor contenido de agua es para la arcilla sin gas.

Tabla C.4. Resultados de la prueba triaxial en la arcilla blanda sin y con gas metano.

Propiedades índice						
Arcilla blanda	Número de muestra	Peso Volumétrico (kN/m ³)		Límites de Atterberg (%)		
		Total	Seco	LL	LP	IP
sin gas metano (SZ0)	UUSZ0-4	15.87	9.49	83	26	57
	UUSZ0-7	15.83	9.39	81	25	56
con gas metano al 7 por ciento (SZ7)	UUSZ7-3	14.40	8.16	82	27	55
	UUSZ7-4	14.42	8.20	80	26	54
	UUSZ7-5	14.68	8.33	81	23	58
con gas metano al 15 por ciento (SZ15)	UUSZ15-	14.42	8.39	74	28	46
	UUSZ15-	14.47	8.44	72	28	44
	UUSZ15-	14.30	8.30	---	---	---

En la Tabla C.4 se observa que el peso volumétrico total es muy similar para la arcilla con gas metano. La diferencia obtenida con respecto a la arcilla sin gas es de aproximadamente 9 por ciento, para ambas arcillas con gas. En cuanto al peso volumétrico seco se observa que es mayor para la arcilla sin gas y el menor es para la arcilla con gas al 7 por ciento, promediando los valores, para efectos de comparación, se obtiene una diferencia equivalente al 13 y 11 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Estos resultados, probablemente, se deben a que se crearon capas de gas durante la reconstitución de la arcilla con gas al 15 por ciento, generando una transferencia mayor carga, pero obteniéndose menor resistencia debido a que la cantidad de gas, genera vacíos son más grandes



En lo que respecta al límite líquido y plástico se observa que los valores son muy consistentes para la arcilla sin y con gas metano, indicando que se ensayó la misma arcilla.

En la Figura C.3 se presentan las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a la arcilla sin y con gas metano y se observa que la configuración de las curvas es muy similar para todas las muestras ensayadas, indicando que el modo de falla general no cambia con la presencia de las burbujas de gas.

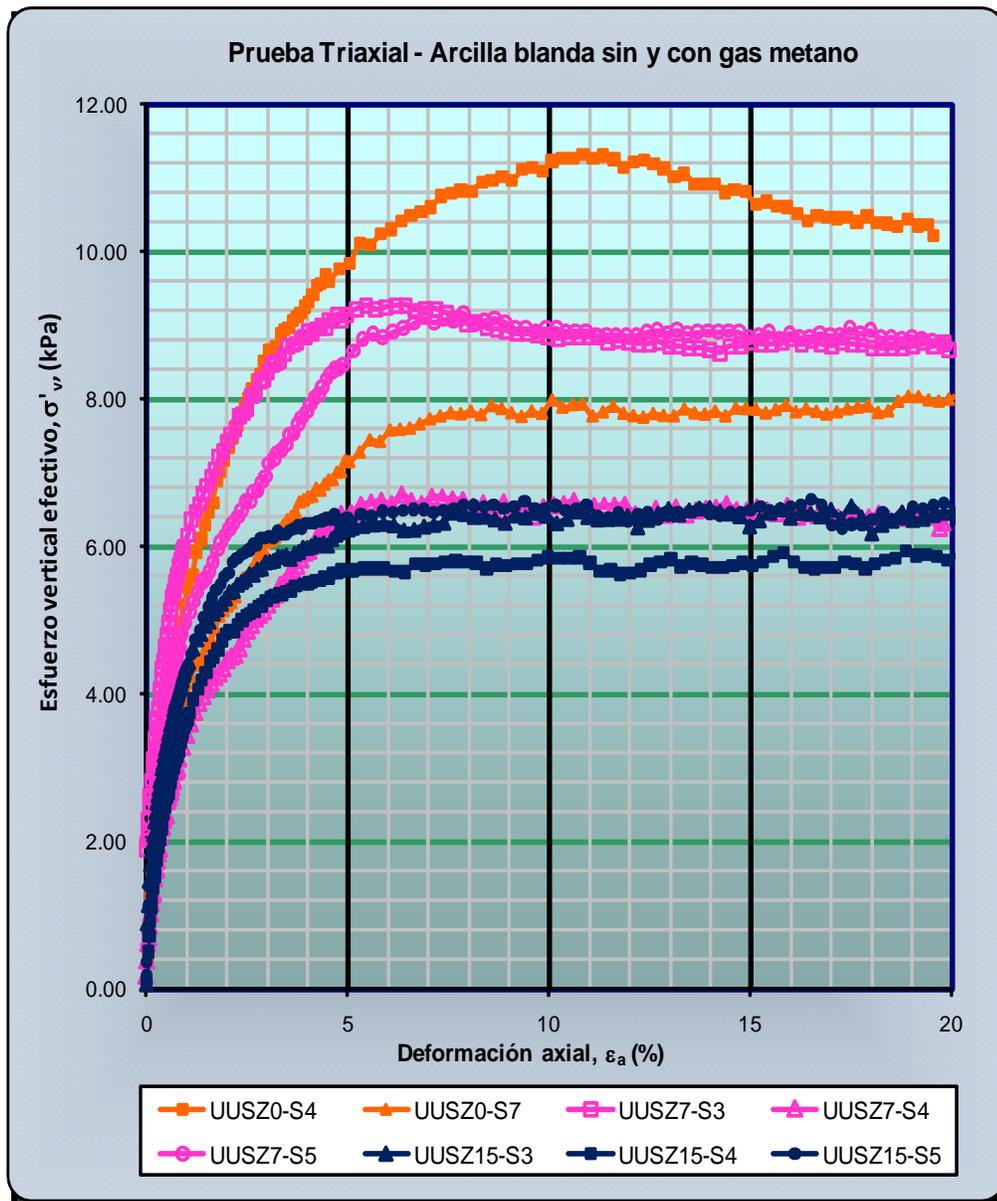


Figura C.3. Curvas de la prueba triaxial para la arcilla blanda sin y con gas.



En la Figura C.4 se presenta la presión de poro desarrollada durante las pruebas triaxiales, correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que el desarrollo de la presión de poro es muy consistente, es decir, no hay cambios abruptos en el desarrollo de la presión de poro, exceptuando la muestra UUSZ7-S4 que al final de la prueba sufre un incremento repentino en la presión de poro. Posiblemente la menor presión de poro desarrollada en la arcilla con gas al 15 por ciento es debido a que en la muestra se crean vacíos tan grandes, por lo que, la deformación del material ocurre demasiado rápido como para que el gas se agrupe y se cree una presión de poro mayor que en las muestras sin y con gas metano al 7 por ciento.

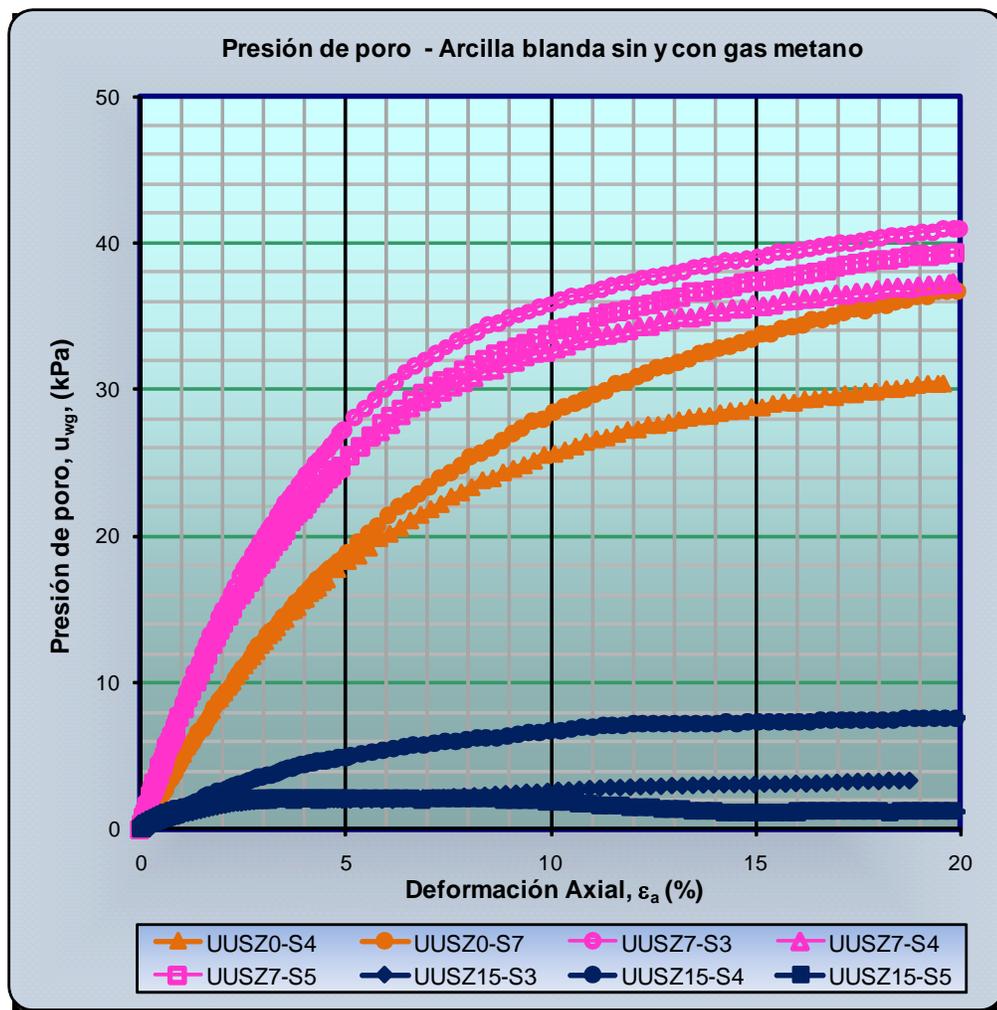


Figura C.4. Curvas de la prueba triaxial para la arcilla blanda sin y con gas.

En la Figura C.5 se presenta la oblicuidad desarrollada durante las pruebas triaxiales, correspondientes a la arcilla sin y con gas y se observa que la correspondiente a la arcilla sin y con gas al 7 por ciento es prácticamente la misma, indicando que el modo de falla no cambia. Sin



embargo, en las curvas de la arcilla con gas metano al 15 por ciento se presenta una concavidad al inicio de la curva y un tramo recto posterior a la concavidad, excepto la curva UUSZ15-S5 que presenta una gran concavidad.

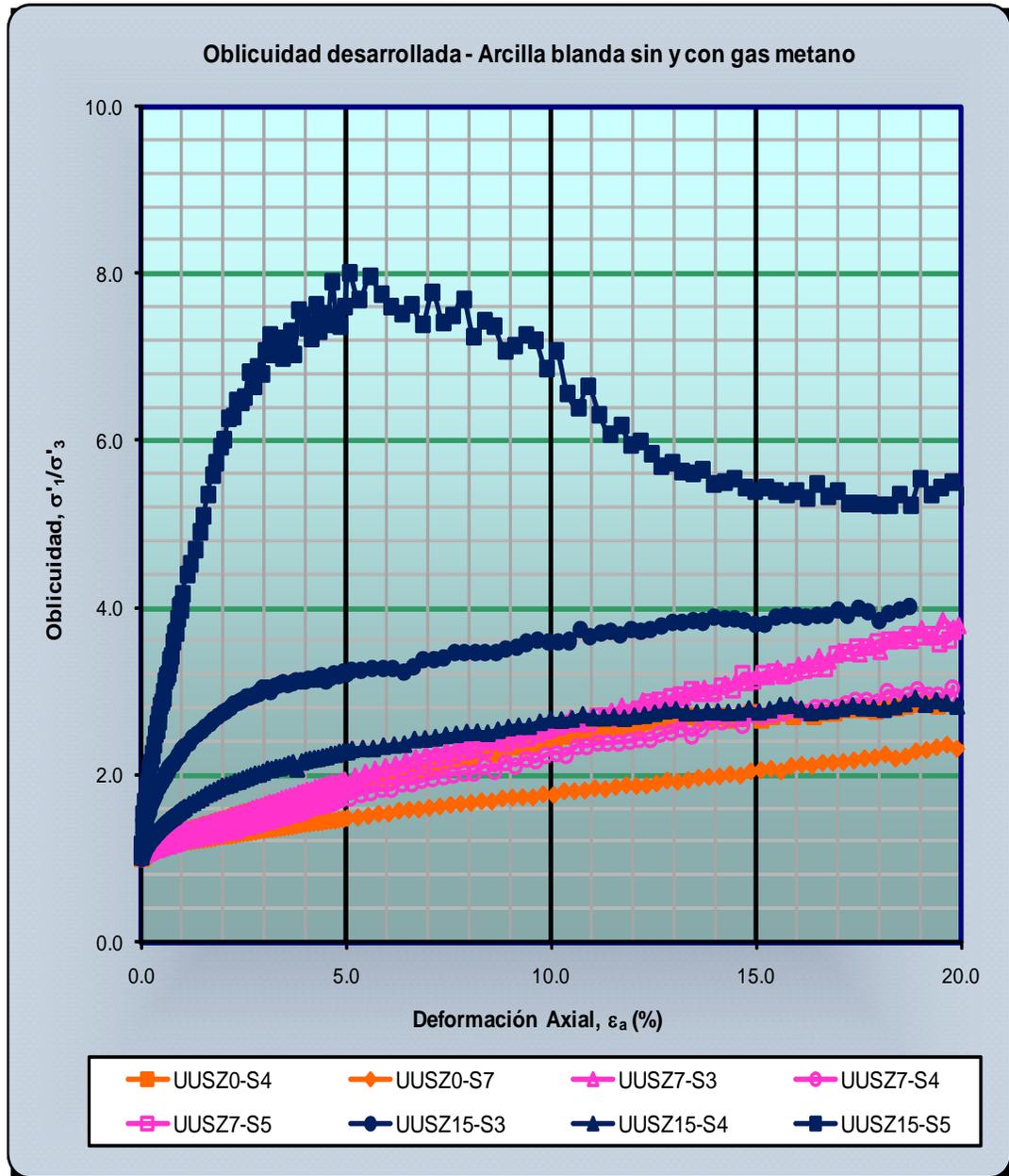


Figura C.5. Oblicuidad de las pruebas triaxiales de la arcilla blanda sin y con gas.



C.2.2. Resultados de la arcilla media sin y con gas metano

En la Tabla C.5 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas triaxiales y algunas de las propiedades índice correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano, las pruebas índice restantes se presentan en la Tabla C-6. En la Tabla C.5 se aprecia que la deformación a la falla, ϵ_a , es consistente para cada una de las muestras sin y con gas; excepto una muestra en la arcilla con gas metano al 7 por ciento. Promediando los resultados, para efectos de comparación se obtiene una diferencia equivalente al 41 y 3 por ciento de menor y mayor deformación, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, con respecto con respecto a la arcilla sin gas.

Tabla C.5. Resultados de la prueba triaxial en la arcilla media sin y con gas metano.

Resistencia al esfuerzo cortante y propiedades índice								
Arcilla media	Número de muestra	Su kPa	ϵ_a^* %	Gs	n_o	e_o	S_o %	ω %
sin gas metano (FZ0)	UUFZ0-2	37.16	14.360	2.737	0.599	1.429	101.9	53
	UUFZ0-3	36.34	14.284	2.736	0.592	1.449	100.4	53
	UUFZ0-4	29.29	14.578	2.732	0.599	1.493	102.8	56
con gas metano al 7 por ciento (FZ7)	UUFZ7-6	11.49	5.844	2.673	0.689	2.215	90.6	73
	UUFZ7-9	11.92	8.831	2.689	0.694	2.264	90.3	74
	UUFZ7-10	12.35	8.115	2.680	0.689	2.219	90.9	73
con gas metano al 15 por ciento (FZ15)	UUFZ15-3	27.77	13.917	---	0.626	1.675	92.9	57
	UUFZ15-4	26.36	15.562	---	0.621	1.641	93.4	56
	UUFZ15-5	26.81	15.136	2.694	0.623	1.652	92.5	56

Nota: El * representa el valor a la falla de la muestra

En cuanto al peso específico relativo de los sólidos se observa que los menores valores obtenidos corresponden a la arcilla con gas al 7 por ciento. En cuanto a la porosidad, los mayores valores corresponden a la arcilla con gas al 7 por ciento; la diferencia obtenida al promediar los valores equivale aproximadamente al 16 y 5 por ciento de mayor porosidad, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia obtenida en la arcilla con gas es del 11 por ciento de mayor porosidad para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En lo que respecta a la relación de vacíos, se observa que sigue la misma tendencia que la porosidad y al promediar los valores, para efectos de comparación, se obtiene una diferencia



aproximada 53 y 14 por ciento de mayor relación de vacíos, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, mientras que la diferencia obtenida por la arcilla con gas, la diferencia obtenida es del 35 por ciento de mayor relación de vacíos para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En el caso del grado de saturación se observa que los menores valores corresponden a la arcilla con gas al 7 por ciento. La diferencia obtenida equivale aproximadamente al 11 y 9 por ciento de menor grado de saturación, para la arcilla con gas 7 y 15 por ciento, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a la diferencia obtenida en la arcilla con gas es de 2 por ciento de menor grado de saturación para la arcilla con gas al 7 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento. Mas sin embargo, el mayor contenido de agua corresponde a la arcilla con gas al 7, mientras que los de la arcilla sin y gas al 15 por ciento son similares.

En la Tabla C.6 se observa que el peso volumétrico total es similar para la arcilla sin y con gas metano; promediando los valores para efectos de comparación, se obtiene una diferencia de aproximadamente el 14 y 6 por ciento de menor peso volumétrico total, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Mientras que la diferencia obtenida por la arcilla con gas al 7 por ciento es del 9 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

Tabla C-6. Resultados de la prueba triaxial en la arcilla media sin y con gas metano.

Propiedades índice						
Arcilla blanda	Número de muestra	Peso Volumétrico (kN/m ³)		Límites de Atterberg (%)		
		Total	Seco	LL	LP	IP
sin gas metano (FZ0)	UUZ0-2	16.90	11.03	81	26	55
	UUFZ0-3	16.75	10.94	78	23	55
	UUFZ0-4	16.76	10.73	80	26	54
con gas metano al 7 por ciento (FZ7)	UUFZ7-6	14.48	8.37	79	25	54
	UUFZ7-9	14.38	8.25	77	25	52
	UUFZ7-10	14.50	8.36	78	24	54
con gas metano al 15 por ciento (FZ15)	UUFZ15-3	15.76	10.07	71	26	45
	UUFZ15-4	15.88	10.19	70	26	44
	UUFZ15-5	15.79	10.15	74	28	46



En cuanto al peso volumétrico seco se observa que es mayor en la arcilla con gas al 15 por ciento que en la arcilla con gas al 7 por ciento y, prácticamente, es el mismo que el de la arcilla sin gas; promediando los valores se obtiene una diferencia del 24 y 7 por ciento de menor peso volumétrico seco, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. Sin embargo, la diferencia obtenida por la arcilla con gas al 7 por ciento es del 18 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

En cuanto al límite líquido se observa que los valores son muy consistentes para la arcilla sin y con gas, mientras que los correspondientes a la arcilla con gas al 15 por ciento, se reducen en ± 8 por ciento aproximadamente, con respecto a la arcilla sin gas; sin embargo, este comportamiento no se refleja en el límite plástico, ya que los resultados son similares para la arcilla sin y con gas.

En la Figura C.6 se presentan las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano.

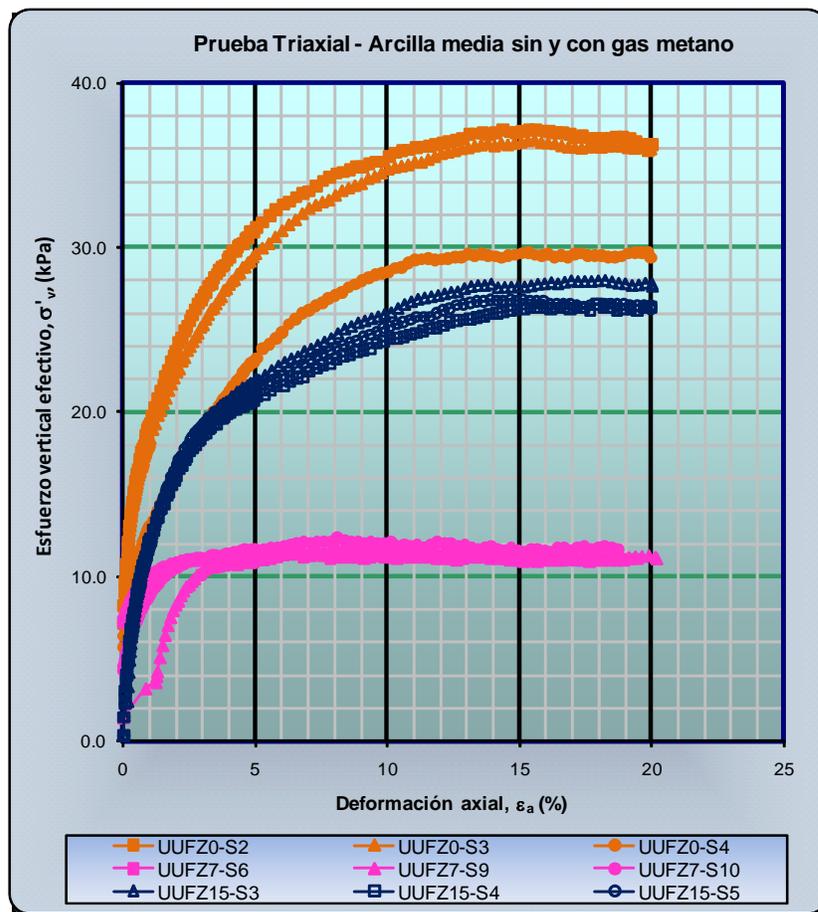


Figura C.6. Curvas de la prueba triaxial para la arcilla media sin y con gas.



En la Figura C.6 se observa que la configuración de las curvas es muy similar para la arcilla sin y con gas metano, indicando que el modo de falla general no cambia con la presencia de las burbujas de gas.

En la Figura C.7 se presenta la presión de poro desarrollada durante las pruebas triaxiales, correspondiente a la arcilla media sin y con gas metano y se observa que la presión de poro es muy consistente, es decir, no hay cambios abruptos durante su desarrollo. Un hecho interesante es que la presión de poro desarrollada en dos muestras de la arcilla con gas al 15 por ciento es mayor que la obtenida en dos muestras de arcilla con gas al 7 por ciento, además es muy cercana a la desarrollada por la arcilla sin gas. Posiblemente la mayor presión de poro desarrollada en la arcilla con gas al 15 por ciento es generada por el gas que está confinado por las láminas de arcilla, debido a sus fuertes ligas moleculares y a la mayor cantidad de gas en los vacíos de la arcilla.

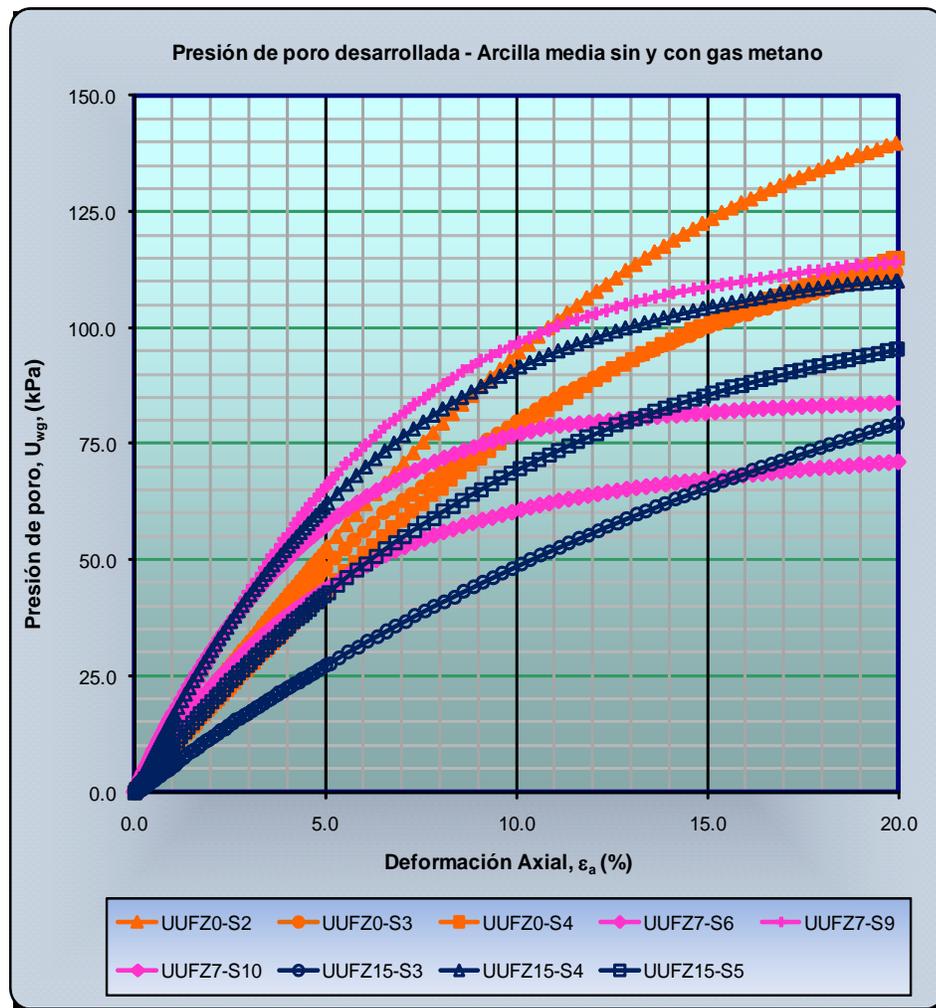


Figura C.7. Curvas de presión de poro en prueba triaxial para la arcilla media sin y con gas metano.



En la Figura C-8 se presenta la oblicuidad desarrollada durante las pruebas triaxiales, correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano y se observa que la oblicuidad obtenida para la arcilla sin y con gas al 15 por ciento es similar, excepto por la curva UUFZ15-S4. En lo que respecta a la arcilla con gas metano al 7 por ciento se observa que las curvas presentan mayores valores durante el desarrollo de la prueba, obteniéndose una mayor pendiente.

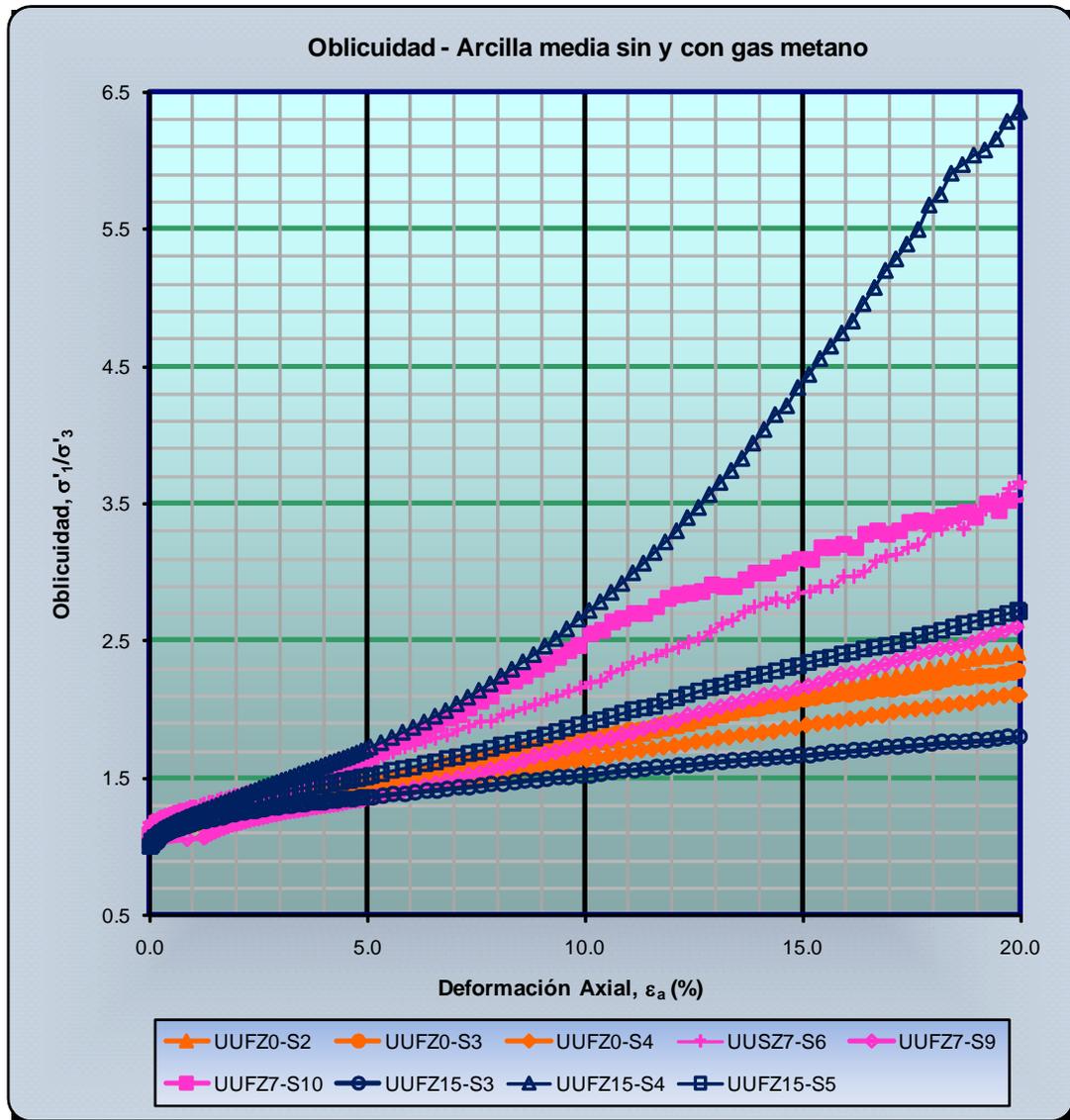


Figura C-8. Oblicuidad de las pruebas triaxiales de la arcilla media sin y con gas.



C.3. Procedimiento y resultados de las pruebas de corte simple directo

En este estudio se realizaron pruebas de corte simple directo (DSS, por sus siglas en inglés), para determinar las características esfuerzo-deformación y de resistencia a volumen constante de la arcilla blanda y media sin y con gas metano, con la finalidad de conocer las posibles variaciones generadas por la presencia del gas metano en la arcilla. Las pruebas de corte simple directo se realizaron tal como se describe en la norma D6528-00 de la ASTM. El procedimiento empleado para ambos tipos de arcilla consistió en:

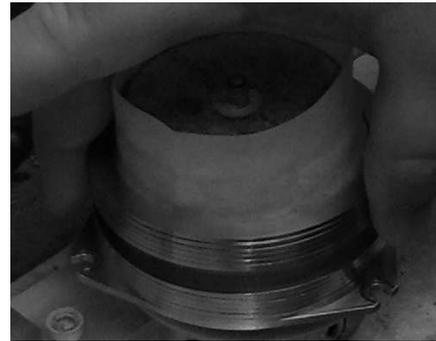
- a) La muestra de arcilla sin y con gas metano se cortó y cubrió con una membrana plástica y se confinó lateralmente con una serie de anillos de acero pulido, Figura C.9a a 9c. Las dimensiones de las muestras de arcilla fueron de aproximadamente 18 mm de altura y de 67 mm de un diámetro.
- b) A la muestra de arcilla sin y con gas metano se le colocó una placa de acero para situar el vástago que trasmite la carga axial, para posteriormente instalarla en el equipo de corte simple directo, Figura C.9d a 9f.
- c) La muestra de arcilla sin y con gas metano se consolidó unidimensionalmente a través de incrementos de carga axial (la carga total aplicada en cada incremento es el doble de la carga total aplicada en el incremento anterior) y cada incremento se mantuvo hasta que la presión de poro se disipó, tal como se interpreta de la velocidad de desplazamiento axial o hasta que se definió la consolidación primaria. En esta etapa del ensaye los especímenes se drenan a través de la superficie inferior.

La carga normal máxima se mantiene hasta completar un ciclo logarítmico de tiempo de compresión secundaria o un día más después que la presión de poro se ha disipado. En este estudio se estableció que la consolidación total llegara hasta obtenerse una deformación axial del 15 por ciento o hasta que la presión de consolidación vertical efectiva final, $\sigma'_{v,c}$, fuera por lo menos 1.5 veces la presión de preconsolidación (Capítulo IV.1).

- d) La muestra de arcilla sin y con gas se falló por desplazamiento de los anillos tangencialmente relativos a el otro, a una velocidad de desplazamiento constante (velocidad de deformación al corte, γ , de 5, 100 y 1 000 por ciento por hora), registrando las fuerzas de corte resultantes.



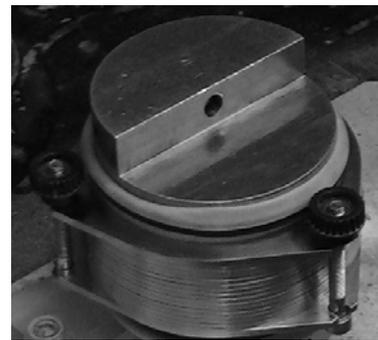
(a)



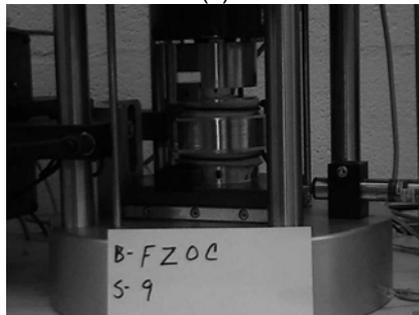
(b)



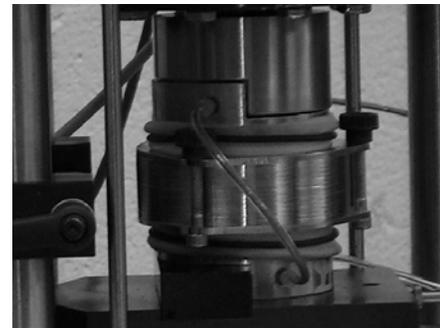
(c)



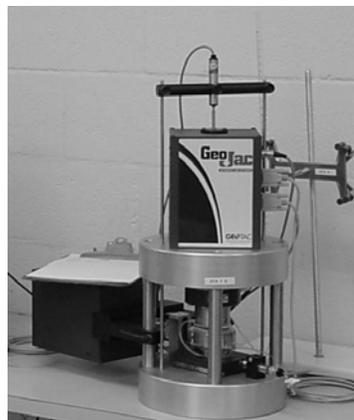
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura C.9. Prueba de corte simple directo



El esfuerzo al corte de un espécimen depende del tipo de suelo, esfuerzo normal de consolidación, tiempo de consolidación, velocidad de deformación y principalmente de la historia de esfuerzos del suelo. En este estudio, el esfuerzo cortante máximo registrado durante la prueba se usó para evaluar la resistencia al corte sin drenaje.

- e) El volumen del espécimen se mantiene constante (etapa sin drenaje) durante el corte para simular condiciones no drenadas y se genera cambiando la carga normal aplicada a la muestra manteniendo constante la altura del mismo. Puesto que la presión de poro es cero a través de la falla, el cambio en el esfuerzo normal es igual al cambio en el esfuerzo efectivo y se asume que es igual al cambio en la presión de poro que ocurriría en un espécimen sellado y confinado por un esfuerzo total constante.

C.3.1. Resultados de la arcilla blanda sin y con gas metano

C.3.1.1. Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora

En la Tabla C.7a se presentan los resultados a la falla obtenidos de las pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora, así como los resultados normalizados con la presión de consolidación, correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas metano.

Tabla C.7a. Características de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación			
Parámetro	Número de Muestra		
	DSS_SZ0-S9b	DSS_SZ7-S8b	DSS_SZ15-S2b
Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	28.63	13.69	26.43
Deformación al corte, γ , (%)	20.63	14.87	15.60
Presión de poro (u_{wg}), (kPa)	45.53	23.32	41.75
Consolidación			
Presión, $\sigma'_{v,c}$, (kPa)	98.20	49.70	98.30
Deformación axial $\varepsilon'_{v,c}$, (%)	15.46	9.37	16.29
Esfuerzo vertical σ'_v , (kPa)	52.67	26.38	56.55
Módulos			
Secante, G_s , (kPa)	140.10	91.79	169.3
Tangente, G_T , (kPa)	62.34	-4.55	5.03
Relación de esfuerzos, ϕ'_{DSS} , (%)	28.53	27.39	25.04



Tabla C.7b. Características normalizadas de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora.

Parámetro	Número de Muestra		
	DSS_SZ0-S9b	DSS_SZ7-S8b	DSS_SZ15-S2b
Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$	0.291	0.275	0.269
Esfuerzo vertical, $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.536	0.531	0.575
Decremento, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.464	0.469	0.425
Relación de esfuerzo, τ_h/σ'_v	0.543	0.518	0.467

En la Figura C.10 se presentan gráficamente los resultados del esfuerzo cortante y se observa que aparentemente existe una disminución en la arcilla con gas al 7 por ciento, mientras que el de la arcilla con gas al 15 por ciento es similar al de la arcilla sin gas; en cambio, en los datos normalizados, Figura C.11, se observa que el esfuerzo cortante normalizado de la arcilla sin gas es ligeramente menor que el de la arcilla con gas metano, si no se consideran los últimos ocho (8) puntos de la curva, es mayor cuando se considera la curva completa.

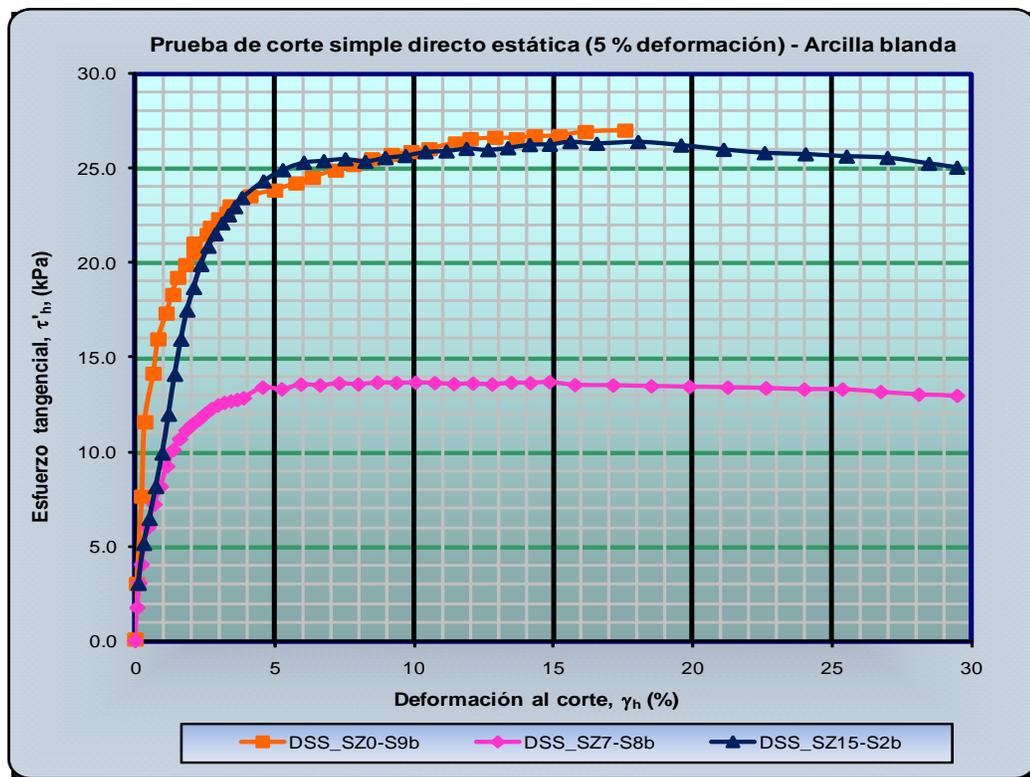


Figura C.10. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

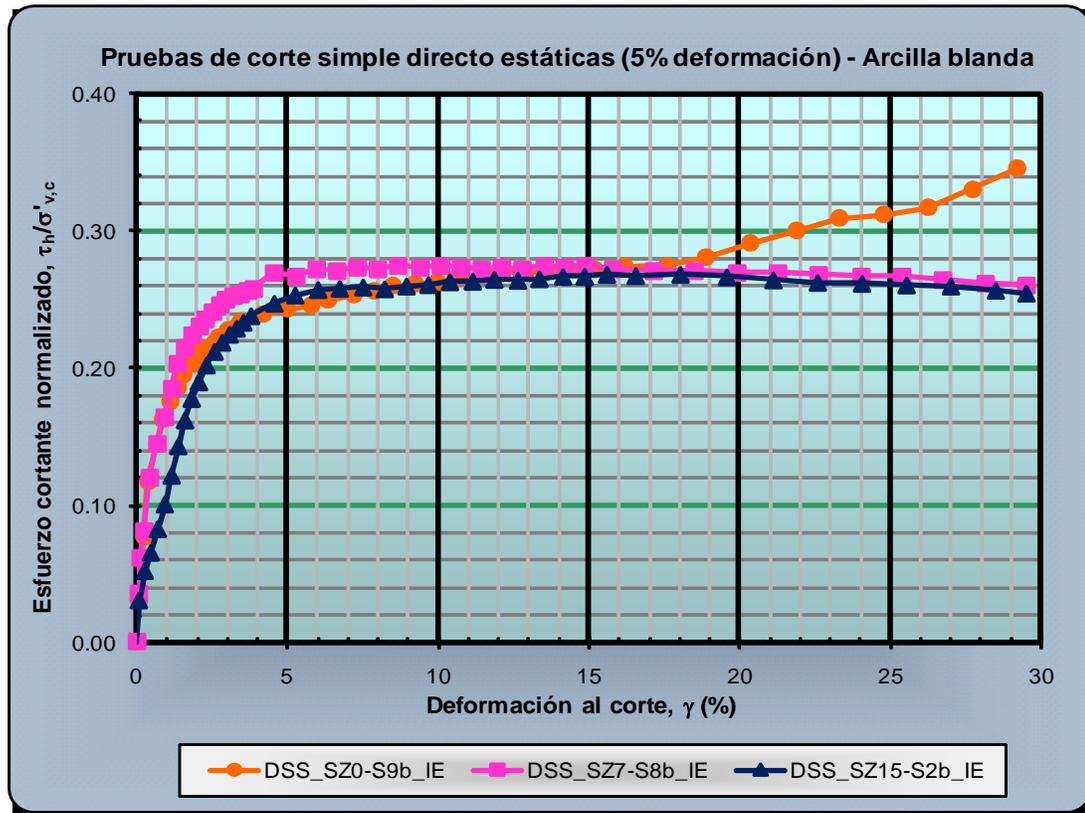


Figura C.11. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En la Tabla C.7b se observa que el mayor decremento normalizado a la falla corresponde a la arcilla con gas metano al 7 (aunque el decremento de la arcilla sin gas es, prácticamente, el mismo) y el menor corresponde a la arcilla con 15 por ciento. En las curvas presentadas en la Figura C.12 se observa que el inicio del ensaye es el mismo para la arcilla sin y con gas al 7 por ciento y es ligeramente menor para la arcilla con gas al 15 por ciento, pero durante el desarrollo de la prueba la curva de la arcilla con gas al 7 por ciento decrece sin que la configuración de la curva cambie; en cambio, durante el ensaye de la arcilla con gas al 15 por ciento y aproximadamente entre 11 al 14 por ciento de deformación al corte se presentan valores, prácticamente, constantes y se asocian a que la arcilla con mayor cantidad de gas opone resistencia ante el esfuerzo cortante actuante, generado por el acomodamiento de las burbujas de gas dentro de la estructura de la arcilla y, una vez que cede la resistencia, el decremento sigue la misma configuración de la arcilla con gas metano al 7 por ciento.

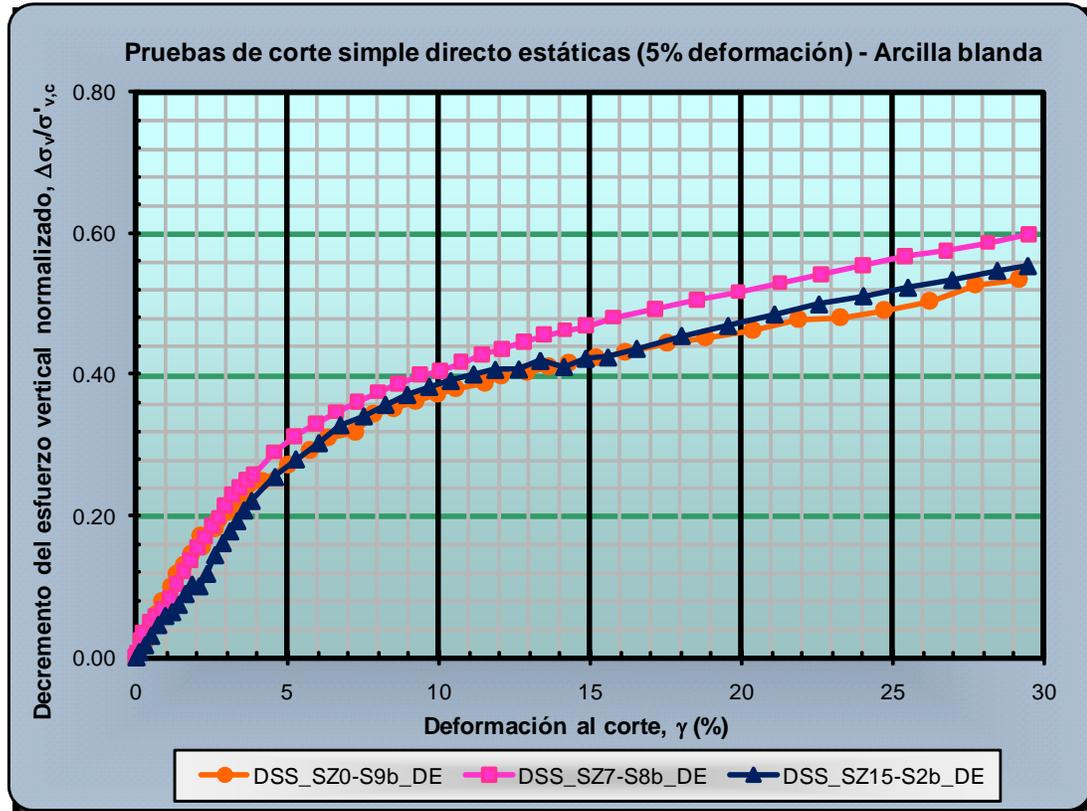


Figura C.12. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En la Figura C.13 se presentan gráficamente los resultados del esfuerzo cortante versus el esfuerzo vertical y aparentemente se observa que se genera una disminución de ambos esfuerzos en la arcilla con gas metano al 7 por ciento, en cambio, en los datos normalizados, Figura C.14, se observa que el esfuerzo cortante normalizado es ligeramente mayor en la arcilla con gas al 7 por ciento (sin considerar los últimos puntos en la curva de la arcilla sin gas); mientras que en la arcilla sin y con gas al 15 por ciento los esfuerzos cortantes normalizados son, prácticamente, iguales.

En la Figura C.14 también se observa que el inicio de ambas las pruebas de ambas muestras de arcilla con gas es ligeramente menor, que el de la arcilla sin gas, pero el de la arcilla con gas metano al 7 por ciento se incrementa ligeramente durante el desarrollo del ensaye, este comportamiento se atribuye a que la arcilla con gas aumenta su rigidez durante el desarrollo de la prueba, esta rigidez se genera porque el gas se sobrepresiona por el esfuerzo cortante inducido.

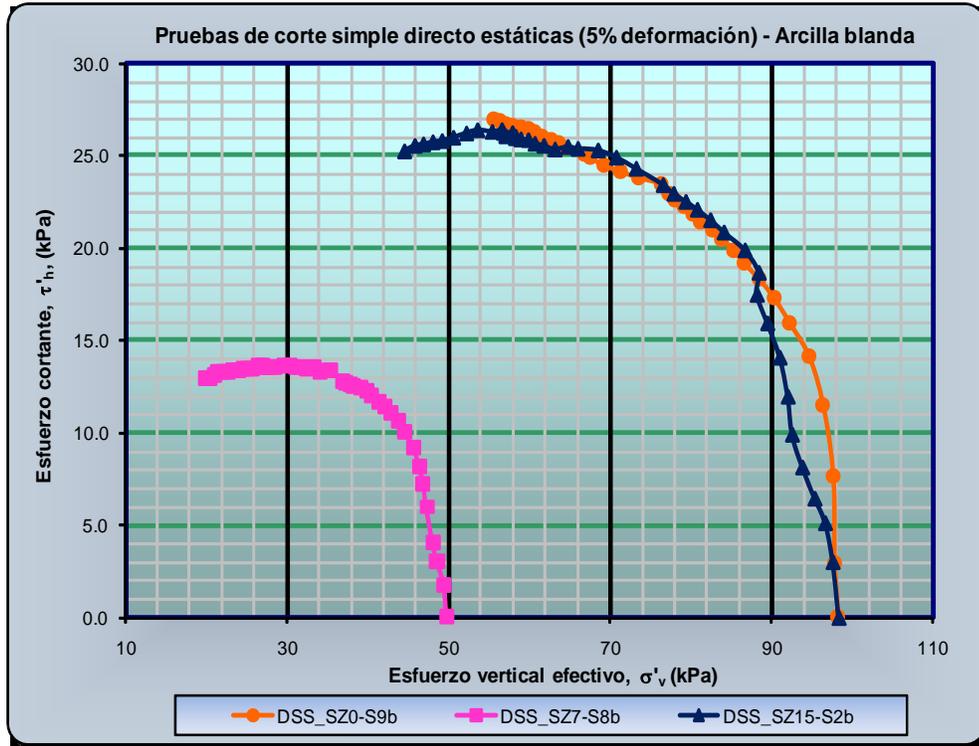


Figura C.13. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

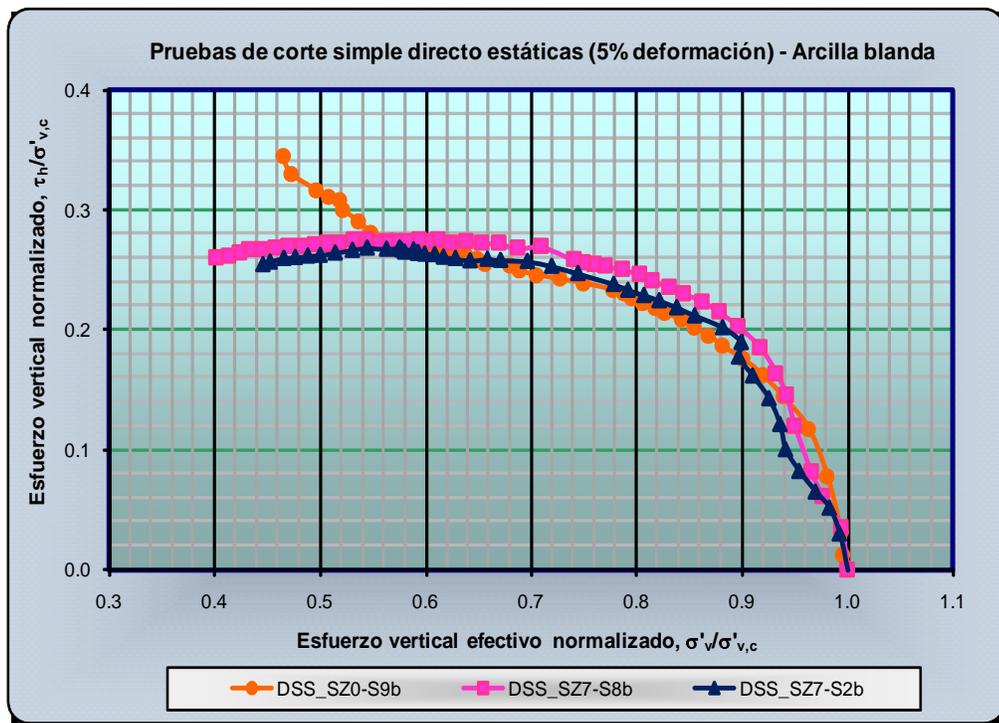


Figura C.14. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En los resultados presentados en la Tabla C.7a se observa que la mayor y menor presión de poro es generada por la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los resultados normalizados se observa (Figura C.15 y Tabla C.7b) que la mayor presión de poro normalizada durante el desarrollo de la prueba es la generada por la arcilla con gas al 7 por ciento, que la desarrollada en las otras dos muestras de arcilla; mientras que la presión de poro normalizada desarrollada por la arcilla con gas al 15 por ciento varía ligeramente con respecto a la de la arcilla sin gas, es decir, se incrementa y disminuye conforme se desarrolla la prueba, las disminuciones se asocian a la liberación de la presión durante la inducción de los esfuerzos cortantes, pero debido a que la estructura de esta arcilla es débil, no se incrementa significativamente la presión de poro normalizada.

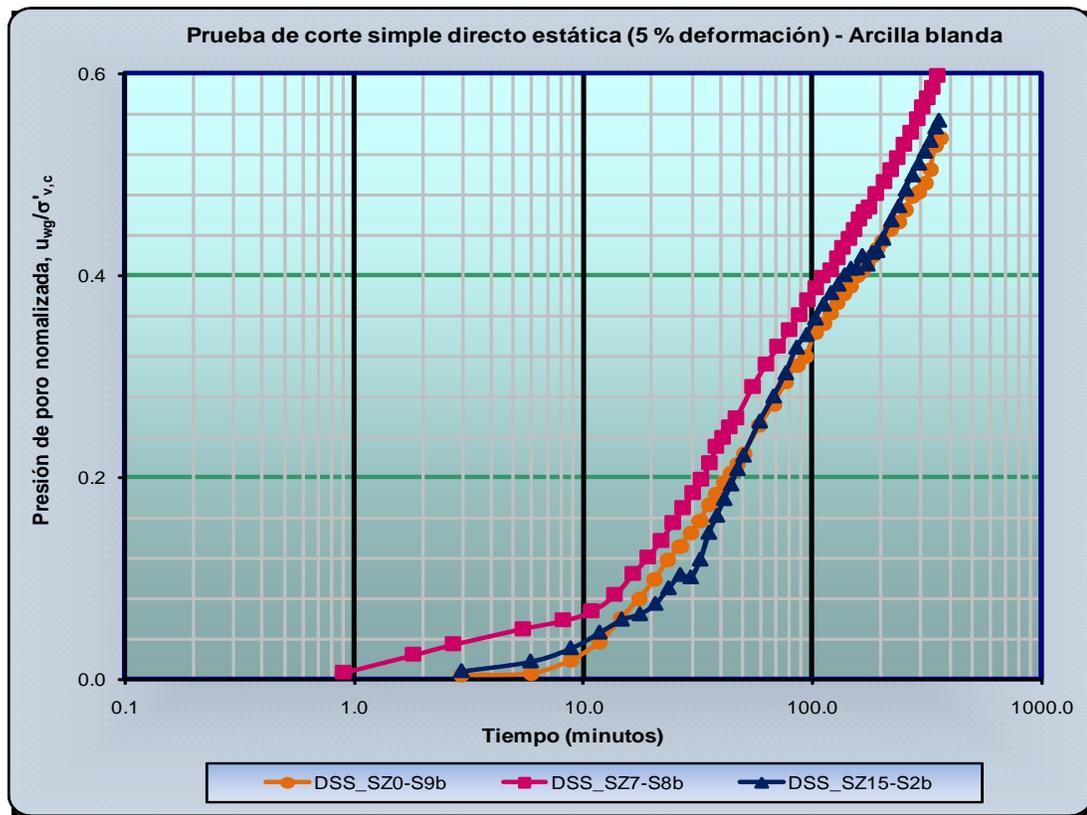


Figura C.15. Presión de poro normalizada de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En los resultados presentados en la Tabla C.7a se observa que el menor y mayor módulo secante corresponden a la arcilla con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los resultados normalizados del módulo secante (Figura C.16a y Tabla C.7b), se observa que este es, prácticamente, el mismo en la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, hasta aproximadamente el 2 por ciento de deformación al corte; posteriormente los de la arcilla con gas



al 7 por ciento son mayores hasta el 15 por ciento de deformación al corte, para finalizar siendo menores que los de la arcilla sin gas y prácticamente los mismos que los de la arcilla con gas al 15 por ciento, Figura 16b.

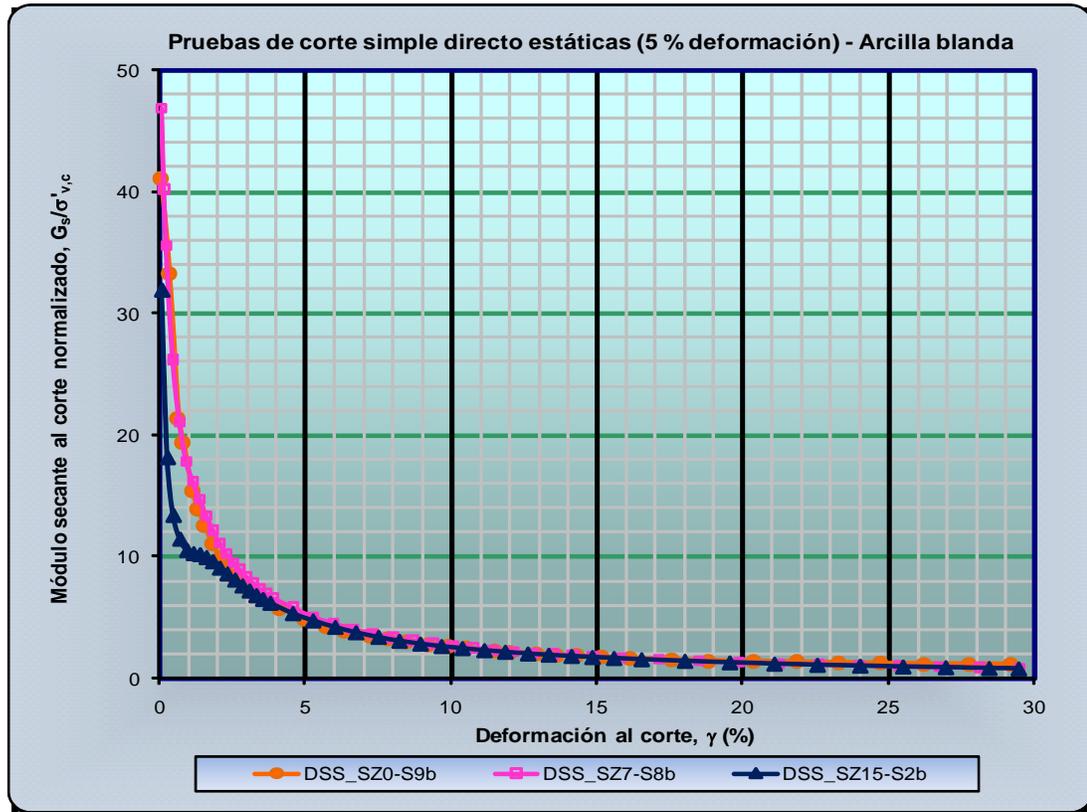


Figura C.16a. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En el caso de la arcilla con gas al 15 por ciento se observa que el módulo secante normalizado desarrolla menor deformación al corte al inicio del ensaye, pero es menor durante el intervalo de deformación al corte de 1 a 3 por ciento y es prácticamente el mismo que el de la arcilla sin gas por el resto del ensaye, mientras que con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento se observa que es menor durante el intervalo de 3 hasta 17 por ciento de deformación al corte, para posteriormente presentar los mismos valores. Otra singularidad que presenta la curva de la arcilla con gas al 15 por ciento es que cuando se deforma el uno por ciento, el módulo secante normalizado se mantiene, prácticamente, en el mismo valor (aproximadamente uno por ciento de deformación al corte), pero debido a los cambios en los esfuerzos en la estructura de la arcilla con gas, se normaliza su comportamiento, el cual se atribuye a la resistencia generada por el gas, es decir, que una vez que se sobrepasa la presión soportada por el gas el comportamiento se regula.

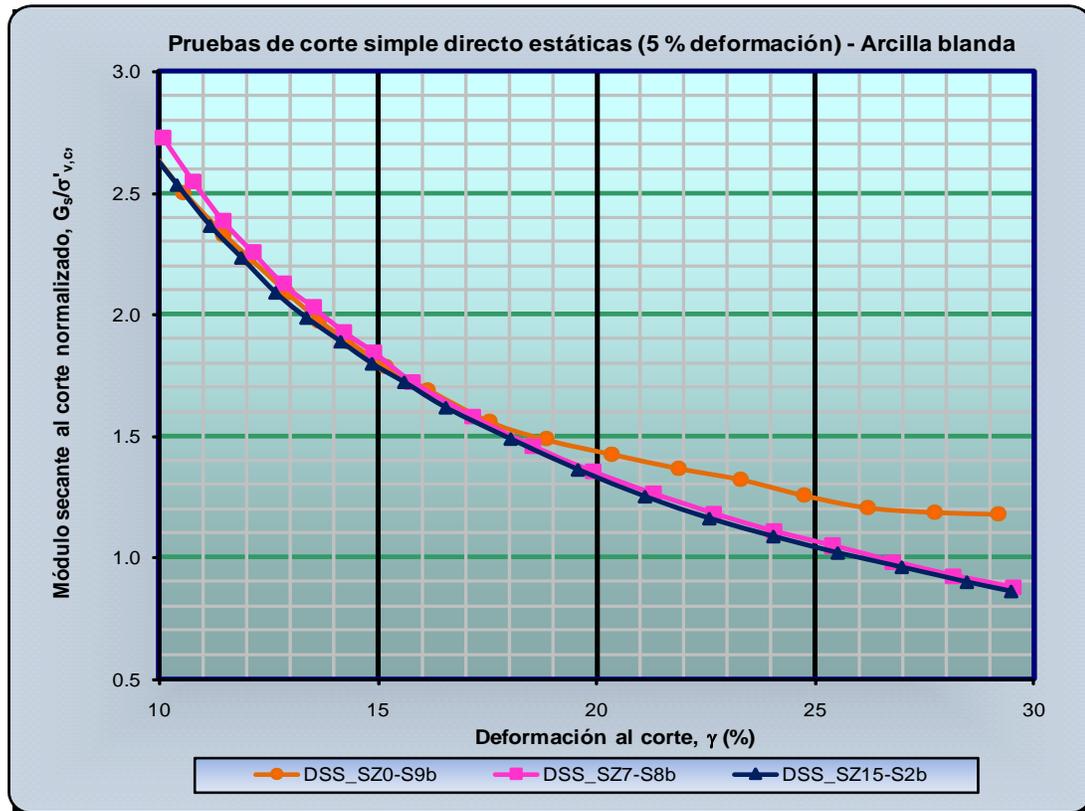


Figura C.16b. Detalle del módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas.

En los resultados presentados en la Tabla C.7a se observa que el mayor y menor módulo tangente corresponden a la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento, respectivamente, este comportamiento también se presenta en los resultados normalizados (Figura C.17a y Tabla C.7b), es decir, el módulo tangente normalizado, practicante, es mayor para la arcilla sin gas, después del dos por ciento de deformación al corte. En la Figura C.17a también se observa que los resultados de ambas muestras de arcilla con gas son similares, después del 6 por ciento de deformación al corte aproximadamente, porcentaje donde la arcilla con gas metano empieza a presentar variaciones, posteriormente las variaciones no son tan significativas. Mientras que en la Figura C.17b se observa que en la arcilla con gas al 15 por ciento se genera un incremento en el módulo tangente normalizado (inmediatamente después del inicio de la prueba), también se observa que se mantiene constante cuando se ha deformado al corte un 3 por ciento. En cuanto a la arcilla con gas al 7 por ciento se observa que se presentan dos secciones donde el módulo tangente normalizado es constante y una tercera donde este se incrementa ligeramente, este comportamiento se atribuye a que el gas sobrepresionado genera una resistencia, mientras los esfuerzos se equilibran internamente en la muestra de arcilla con gas metano, pero una vez que se sobrepasa, la arcilla con gas se desarrolla similarmente a la arcilla sin gas.

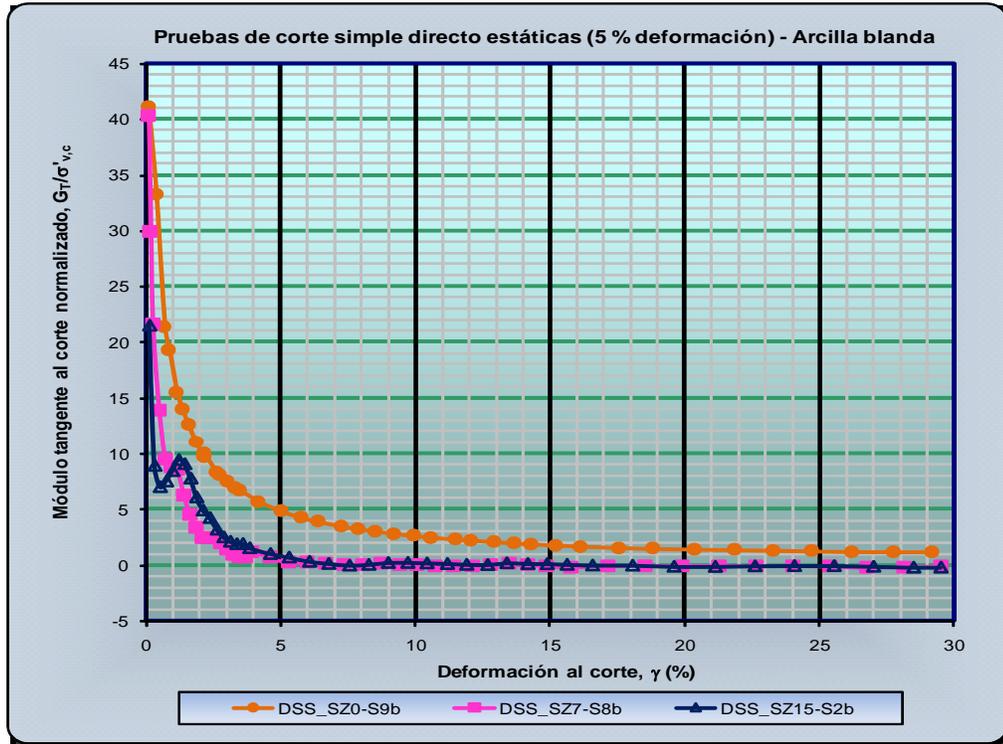


Figura C.17a. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

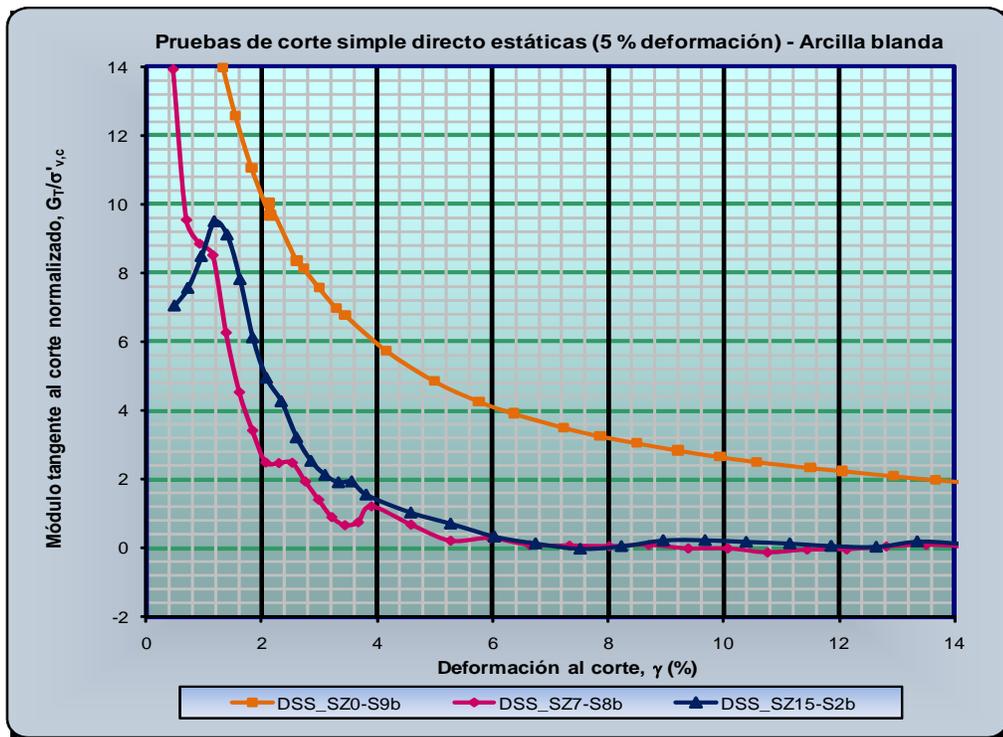


Figura C.17b. Detalle del módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas.

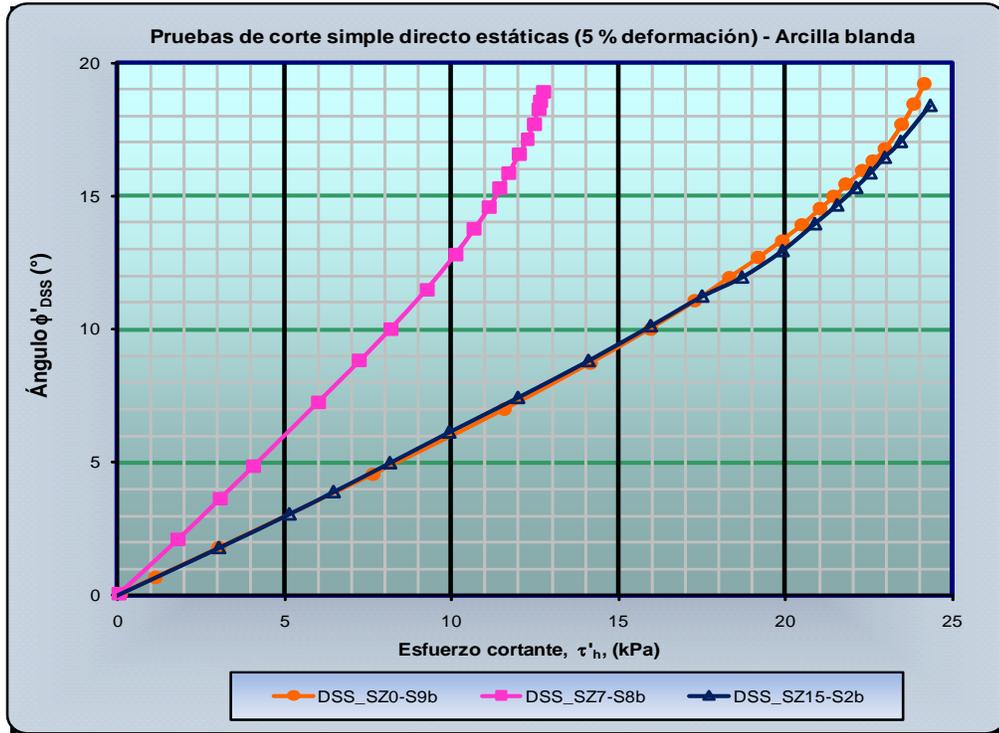


Figura C.18. Ángulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.

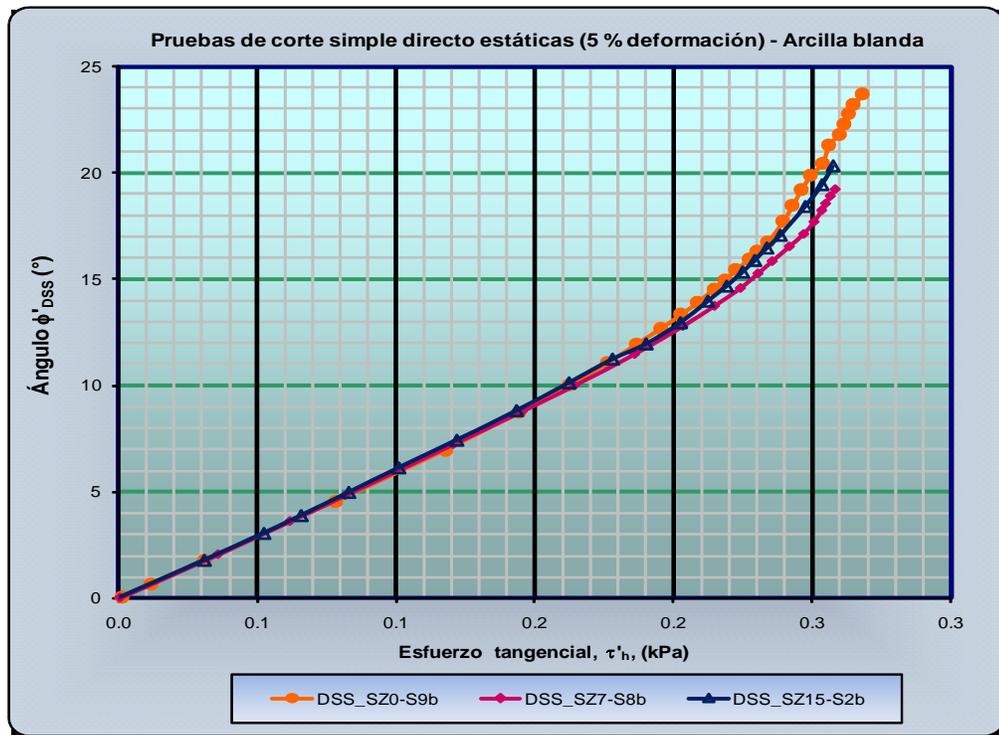


Figura C.19. Ángulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En los resultados presentados en la Tabla C.7a se observa que la mayor y menor relación de esfuerzos, ángulo ϕ'_{DSS} , corresponden a la arcilla sin (aunque es prácticamente el mismo con el de la arcilla con gas al 7 por ciento) y con gas al 15 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los resultados presentados en la Figura C.18 se observa, aparentemente, que la mayor pendiente corresponde a la arcilla con gas al 7 por ciento, mientras que la menor corresponde a la arcilla sin y con gas al 15 por ciento, en cambio, en la Figura C.19 se observa que la pendiente es la misma para los tres tipos de arcilla, indicando que el modo general de falla no cambia con el contenido de gas.

En la Tabla C.8 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas índice realizadas en las muestras de arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que el mayor y menor peso específico relativo de los sólidos corresponde a la arcilla sin y con gas al 15 por ciento, respectivamente, (los comentarios al respecto se presentan en el Capítulo IV, sección IV.5). En cuanto al grado de saturación se observa que es ligeramente mayor para la arcilla con gas al 15 por ciento que para la arcilla con gas al 7 por ciento.

Tabla C.8. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas metano (Pruebas estáticas de DSS)

Propiedades índice								
Número de muestra	G_s	S_o (%)	ω_o (%)	Peso Volumétrico (kN/m^3)		Límites de Atterberg (%)		
				Total	Seco	LL	LP	IP
DSS_SZ0-S9b	2.710	100.7	71	15.60	9.14	80	24	56
DSS_SZ7-S8b	2.682	92.2	76	14.39	8.18	81	23	58
DSS_SZ15-S2b	2.563	93.1	72	14.45	8.39	77	25	52

En cuanto al peso volumétrico total y seco el mayor y menor corresponde a la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, respectivamente (el de la arcilla con gas al 15 por ciento es prácticamente el mismo). La diferencia obtenida en el peso volumétrico total es de aproximadamente 8 y 7 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano. En cuanto al peso volumétrico seco se obtuvo una diferencia del 11 y 8 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 8 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas metano.

En cuanto a los límites de Atterberg se observa que los resultados son similares para todas las muestras de arcilla, indicando que se ensayó el mismo tipo de arcilla, aun con la variación del contenido de gas metano.



C.3.1.2. Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora

En la Tabla C-9 se presentan los resultados a la falla obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora, también se incluyen los resultados normalizados con la presión de consolidación, correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas.

Tabla C.9. Características de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación			
Parámetro	Número de Muestra		
	DSS_SZ0-S9bc	DSS_SZ7-S8c	DSS_SZ15-S2c
Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	33.37	17.38	25.95
Deformación al corte, γ , (%)	22.14	4.69	6.99
Presión de poro (u_{wg}), (kPa)	22.84	10.01	26.67
Consolidación			
$\sigma'_{v,c}$	98.15	49.84	96.77
$\varepsilon'_{v,c}$	14.96	9.22	16.46
Esfuerzo vertical σ'_v , (kPa)	75.32	39.84	70.14
Módulos			
Secante, G_s , (kPa)	143.55	376.05	376.48
Tangente, G_T , (kPa)	-2.92	10.53	16.09
Relación de esfuerzos, ϕ'_{DSS} , (%)	23.89	23.60	20.30
Resultados normalizados			
Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$ ($c_u/\sigma'_{v,c}$)	0.340	0.349	0.268
Esfuerzo vertical, $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.767	0.799	0.725
Decremento, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.233	0.201	0.275
Relación de esfuerzo, τ_h/σ'_v	0.433	0.440	0.370

En los resultados presentados en la Tabla C.9 se observa que, aparentemente, el esfuerzo cortante disminuye conforme disminuye el contenido de gas metano en la arcilla, con respecto a la arcilla sin gas, lo cual se observa claramente en la Figura C.20, en cambio, en los datos normalizados, Figura C.21, se observa que el esfuerzo cortante normalizado es ligeramente mayor en la arcilla con gas al 7 por ciento, que el de la arcilla sin gas; mientras que el de la arcilla con gas al 15 por ciento es menor que el de las otras dos muestras de arcilla.

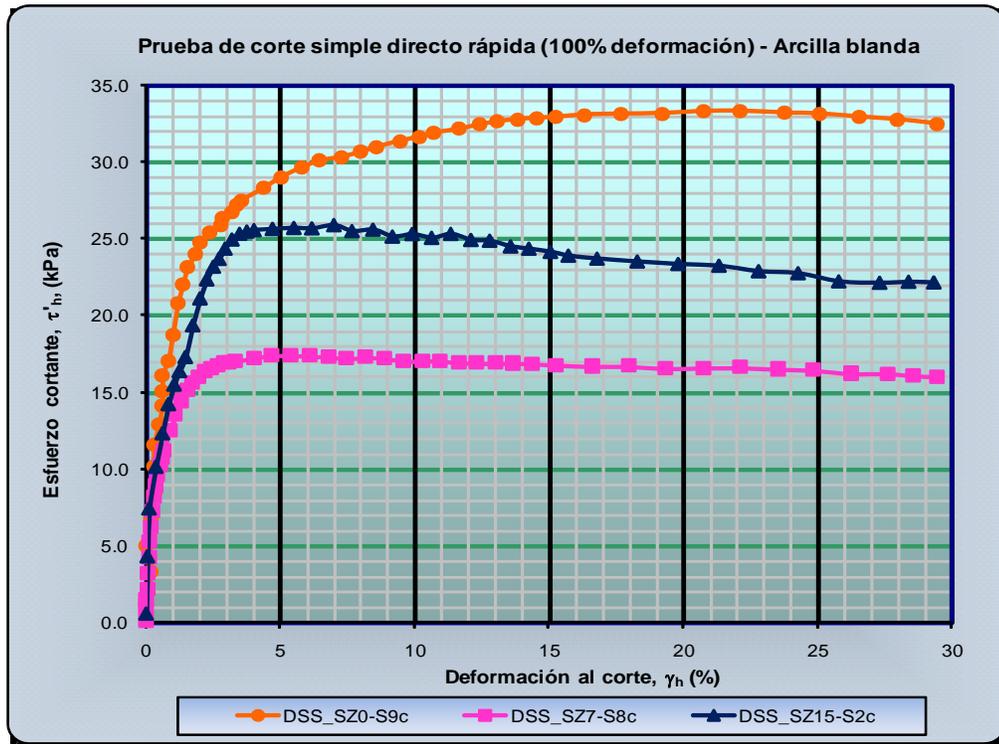


Figura C.20. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

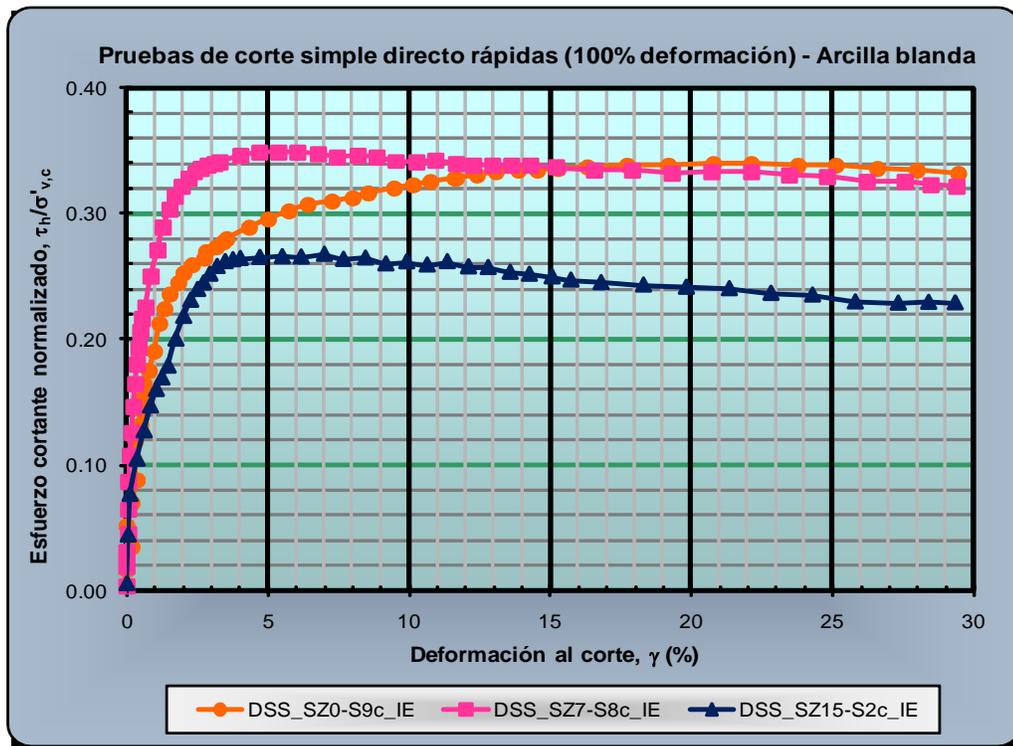


Figura C.21. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.



El comportamiento normalizado presentado por la arcilla con gas metano al 7 por ciento indica que el gas se ha sobrepresionado, por el confinamiento proporcionado por las láminas de arcilla, dentro de la estructura de la arcilla, de tal manera que «amortigua» el esfuerzo cortante inducido, cuando se deforma la arcilla con gas metano a una velocidad de 100 por ciento por hora. Este comportamiento normalizado no es tan notorio en la arcilla con gas metano al 15 por ciento, debido al menor esfuerzo cortante normalizado obtenido, esto se atribuye a que el confinamiento proporcionado por las láminas de arcilla no es lo suficientemente fuerte y por la mayor cantidad de gas, por lo tanto, la arcilla con gas al 15 por ciento, no contrarresta del todo el esfuerzo cortante inducido, pero si como para ser lo suficientemente alto, dado el contenido de gas en la arcilla.

En la Figura C.22a se presentan los resultados normalizados del decremento del esfuerzo vertical y se observa que es mayor en ambas muestras de arcilla con gas, así mismo, se observa que el mayor decremento corresponde a la arcilla con gas al 15 por ciento, pero es menor al inicio del ensaye que el de la arcilla con gas al 7 por ciento, hasta una deformación al corte de 3.4 por ciento, aproximadamente.

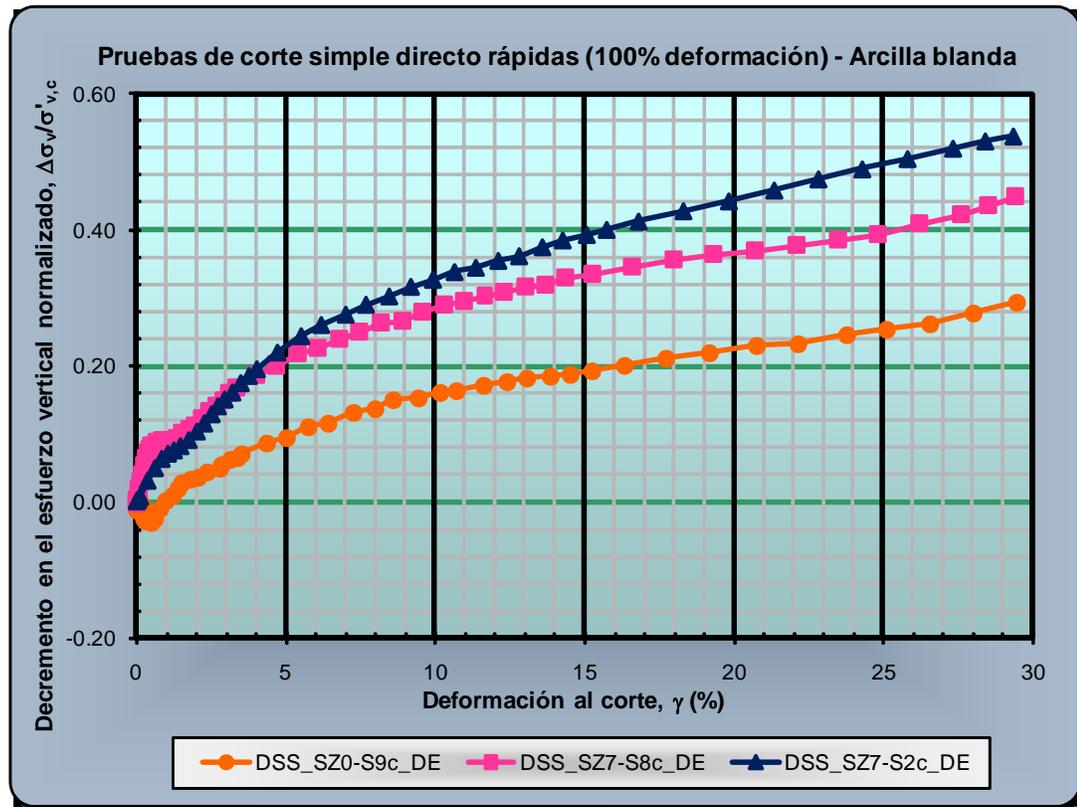


Figura C.22a. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En la parte inicial de las curvas de la arcilla con gas, Figura C.22b, se observa que presentan una porción cóncava durante el inicio de la prueba (más notoria en la arcilla con gas al 7 por ciento). El inicio de la concavidad indica un rápido decremento en los esfuerzos verticales y se estabiliza posteriormente (valores constantes en el decremento del esfuerzo normalizado de la arcilla con gas al 7 por ciento), incrementándose la deformación al corte, finalmente se presenta un decremento normalizado similar a las otras dos muestras de arcilla. Este comportamiento, posiblemente, está asociado a que el gas metano se sobrepresiona dentro de la estructura de la arcilla reduciendo los esfuerzos verticales más rápidamente. En el caso de la arcilla con gas al 15 por ciento, se observa que la transición es suave, casi imperceptible, posiblemente debido al mayor volumen que ocupa el gas, es decir, las burbujas de gas tienen más espacio para reacomodarse.

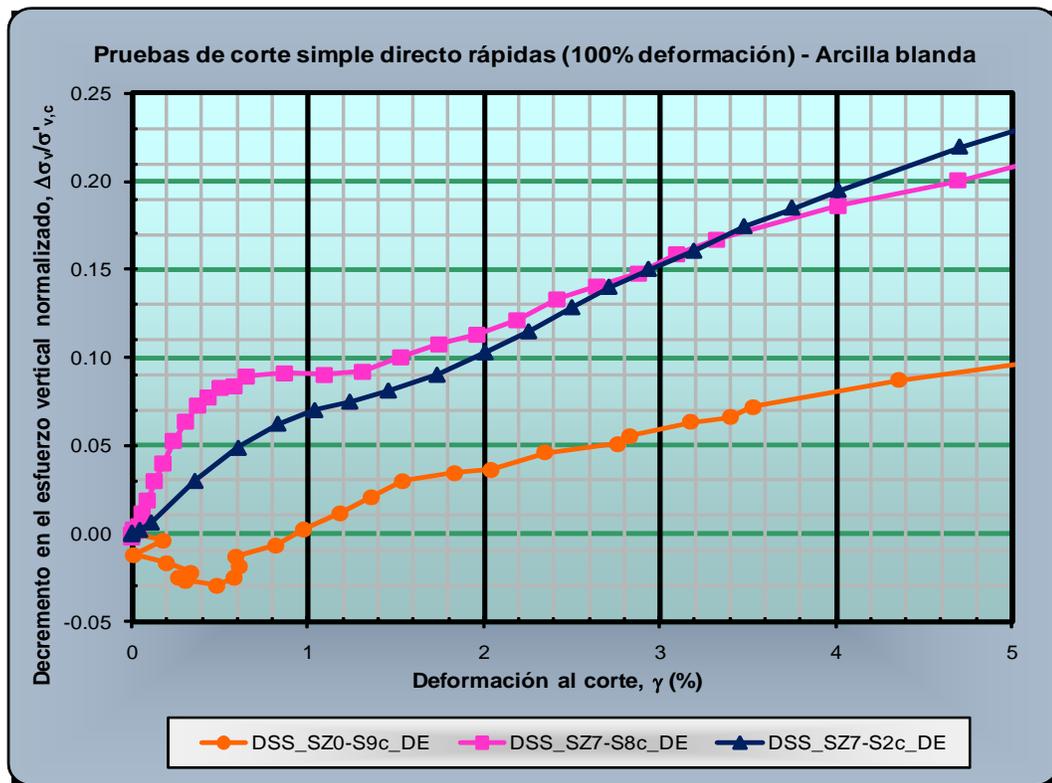


Figura C.22b. Detalle del decremento de esfuerzo vertical de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En la Figura C.23 se presentan gráficamente los resultados del esfuerzo cortante versus el esfuerzo vertical y se observa que, aparentemente, la mayor y menor reducción de ambos esfuerzos se genera en la arcilla con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente; mas sin embargo, en los datos normalizados, Figura C.24, se observa que el esfuerzo cortante normalizado es ligeramente mayor en la arcilla con gas al 7 por ciento que el de la arcilla sin gas.

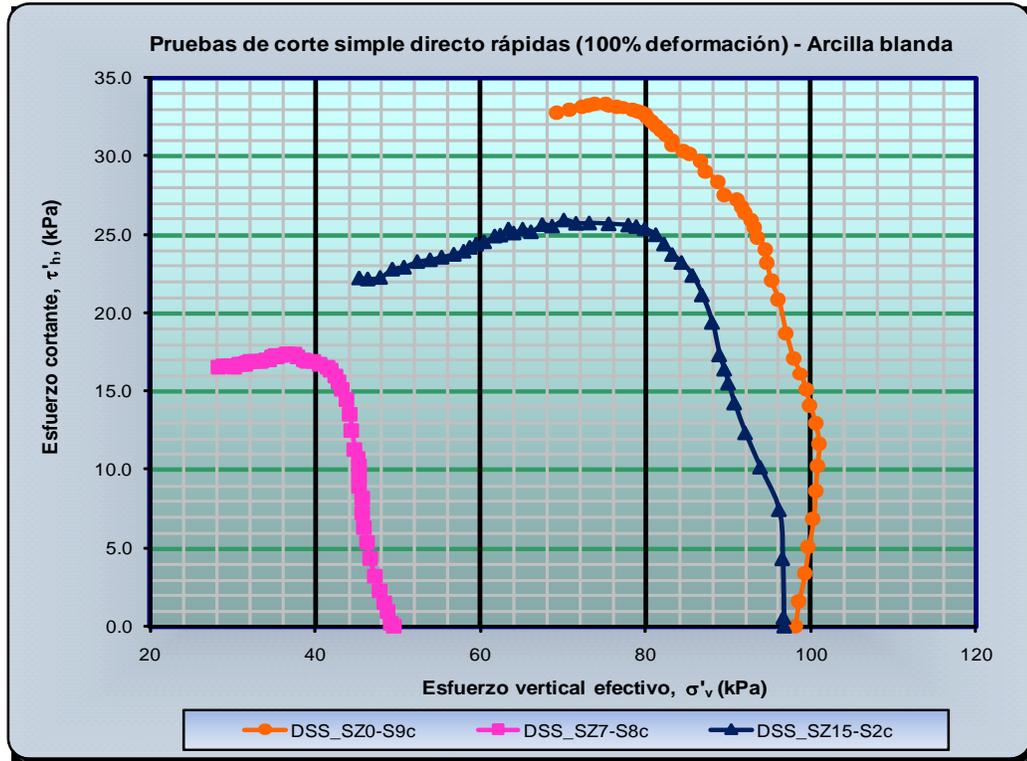


Figura C.23. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

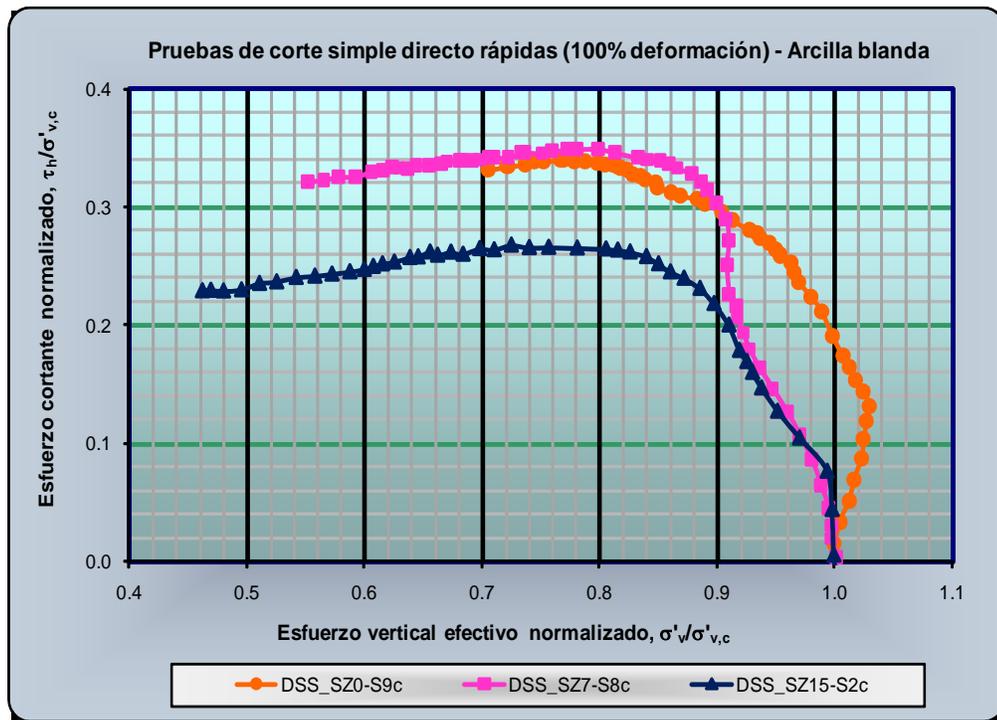


Figura C.24. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.



Una característica de las curvas normalizadas es que el inicio de la prueba en ambas arcillas con gas metano es similar, pero menor que el de la arcilla sin gas, también se observa que el esfuerzo cortante normalizado se incrementa durante el desarrollo de la prueba en la arcilla con gas al 7 por ciento, con poca variación en el esfuerzo vertical normalizado, este comportamiento se asocia a que la estructura de la arcilla con menor contenido de gas incrementa su rigidez, de tal manera que «amortigua» el esfuerzo cortante normalizado y por lo tanto se incrementa, mientras que en la arcilla con mayor cantidad de gas metano no se presenta este comportamiento debido a que se genera una estructura con menor rigidez que la arcilla con menor cantidad de gas.

En los resultados a la falla de la presión de poro presentados en la Tabla C.9 se observa que la mayor y menor es la generada para la arcilla con gas al 15 y 7 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los resultados normalizados de la presión de poro se observa, Figura C.25, que la presión de poro normalizada de la arcilla con gas al 15 por ciento es mayor a partir del segundo minuto del ensaye, mientras que, básicamente, es menor al inicio de la prueba; en esta parte del ensaye se genera una concavidad en la arcilla con gas metano al 7 por ciento; este comportamiento se asocia a que se desarrolla una zona de alta presión dentro de la estructura del suelo, debido a la presencia del gas, para posteriormente disiparse y desarrollarse linealmente.

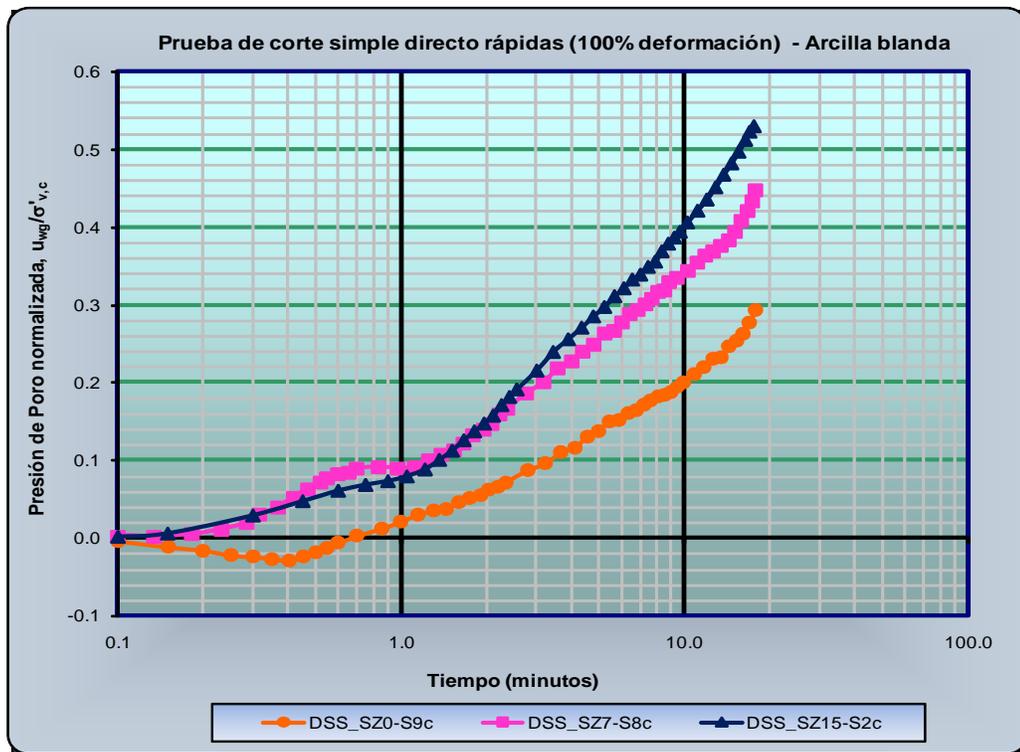


Figura C.25. Presión de poro normalizada de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En los resultados a la falla presentados en la Tabla C.9 se observa que el mayor y menor módulo secante corresponden a la arcilla sin y con gas metano, respectivamente; en cambio, en los resultados normalizados del módulo secante, Figura C.26a, se observa que después del 0.2 por ciento de deformación al corte el módulo secante normalizado es mayor en la arcilla con gas al 7 por ciento, mas sin embargo, después del 14 por ciento el incremento se reduce y se une a la arcilla sin gas desde el 25 por ciento de deformación al corte, Figura C.26b. Mientras que el módulo secante normalizado de la arcilla con gas al 15 por ciento disminuye desde aproximadamente el 5 por ciento de deformación al corte; el comportamiento presentado es debido a que la arcilla con mayor contenido de gas metano genera menor rigidez que la arcilla con menor contenido de gas.

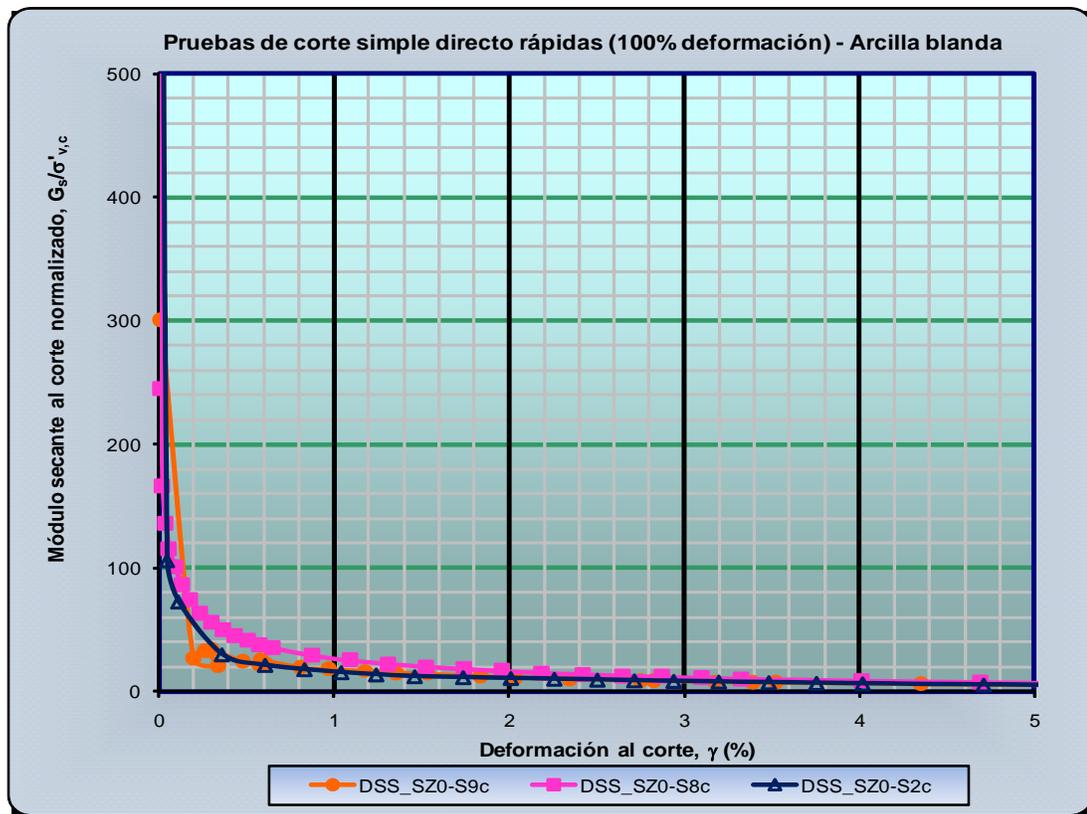


Figura C.26a. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En los resultados a la falla presentados en la Tabla C.9 se observa que el mayor y menor valor del módulo tangente corresponden a la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente; en cambio, en los resultados normalizados del módulo tangente, Figura C.27 (se omiten los altos valores iniciales para detallar el desarrollo de la curva), se observa que ambas muestras de arcilla con gas metano presentan un trazo ligeramente errático.

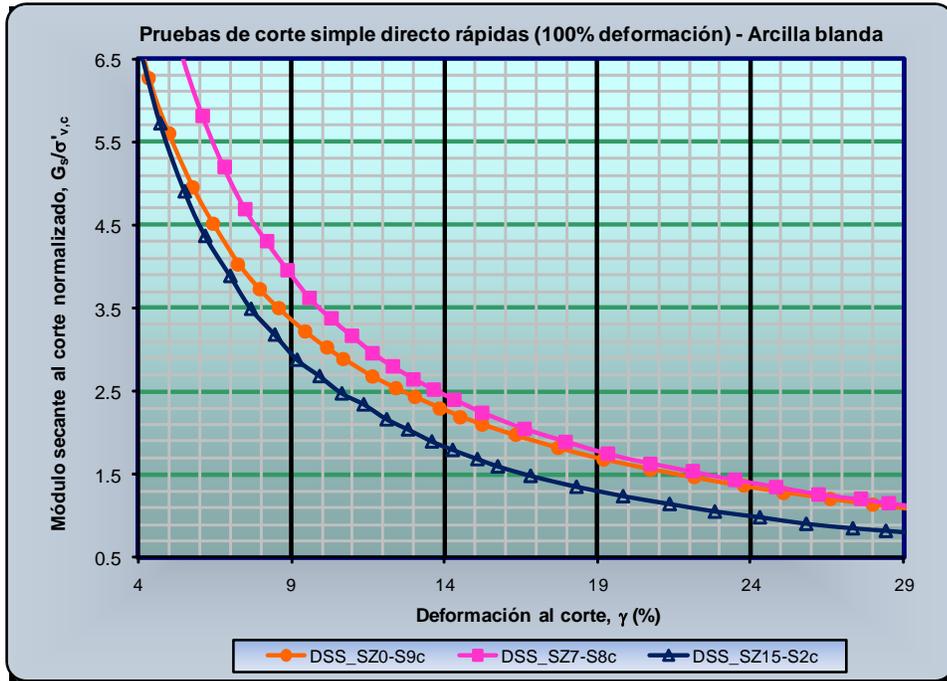


Figura C.26b. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

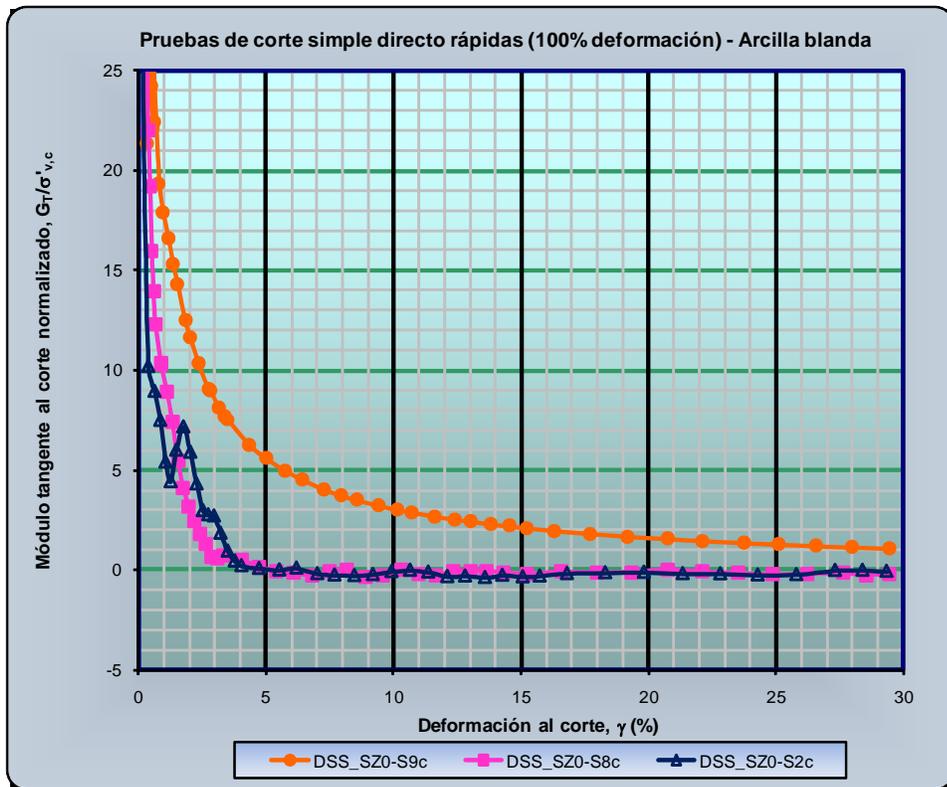


Figura C.27. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En la Figura C.27 se observa que el inicio de las curvas del módulo tangente normalizado de la arcilla con gas al 7 por ciento presenta mayor deformación al corte que el de la arcilla con gas al 15 por ciento, hasta aproximadamente el 2 por ciento de deformación al corte. También se observa que el módulo tangente normalizado de la arcilla con gas al 15 por ciento se incrementa ligeramente, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento, para que después del 4 por ciento de deformación al corte presente un comportamiento errático, que no se presenta en la arcilla sin gas. El comportamiento de la arcilla con mayor contenido de gas se asocia a que la estructura de la arcilla con gas opone cierta resistencia ante el esfuerzo cortante actuante, por lo que el valor del módulo tangente se incrementa para posteriormente desarrollarse como la arcilla sin gas.

En los resultados presentados en la Tabla C.9 se observa que la mayor y menor relación de esfuerzos a la falla, ángulo ϕ'_{DSS} , corresponden a la arcilla sin (aunque es prácticamente el mismo con el de la arcilla con gas al 7 por ciento) y con gas al 15 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los resultados presentados en la Figura C.28 se observa que, aparentemente, la mayor y menor pendiente corresponden para la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, pero en los resultados normalizados, Figura C.29, se observa que ambas muestras de arcilla con gas generan la misma pendiente, que es ligeramente mayor que la de la arcilla sin gas.

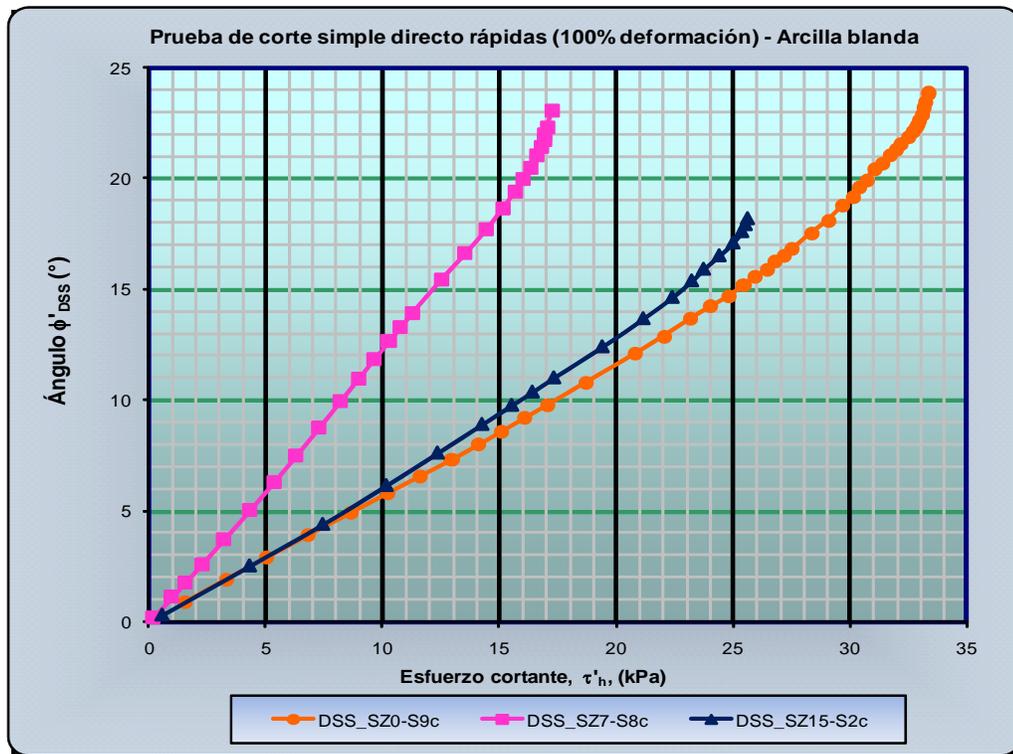


Figura C.28. Ángulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.

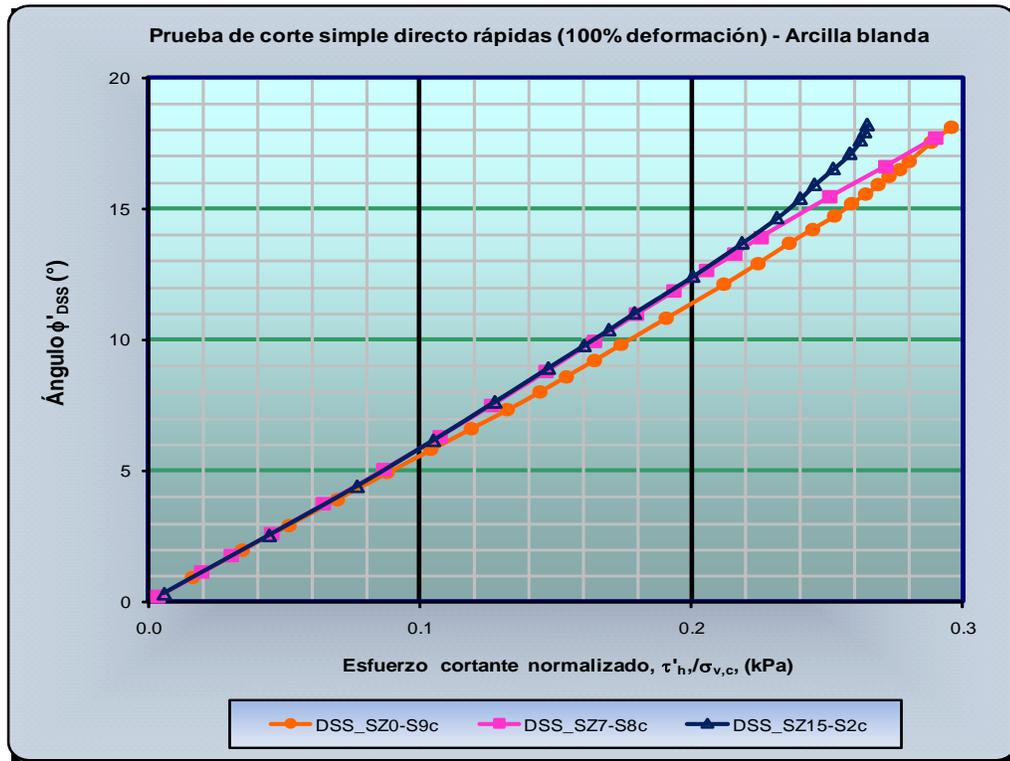


Figura C.29. Angulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En la Tabla C.10 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas índice realizadas en las muestras de arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que el grado de saturación es ligeramente mayor en la arcilla con gas metano al 15 por ciento que el de la arcilla con gas al 7 por ciento. En lo que respecta al peso volumétrico total y seco se observa que el de la arcilla con gas es, prácticamente, el mismo, pero menor que el de la arcilla sin gas. La diferencia obtenida por la arcilla sin gas es de ± 8 y ± 9 por ciento para el peso volumétrico total y seco, respectivamente.

Tabla C.10. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas metano (Pruebas rápidas DSS a 100 por ciento de deformación por hora)

Propiedades índice							
Número de muestra	S_o (%)	ω_o (%)	Peso Volumétrico (kN/m^3)		Límites de Atterberg (%)		
			Total	Seco	LL	LP	IP
DSS_SZ0-S9c	100.4	70	15.63	9.21	---	---	---
DSS_SZ7-S8c	91.1	75	14.34	8.22	84	24	60
DSS_SZ15-S2c	92.8	71	14.48	8.47	---	---	---



C.3.1.3. Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora

En la Tabla C-11 se presentan los resultados a la falla obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora, correspondientes a la arcilla blanda sin y con gas metano, también se incluyen los resultados normalizados resultantes.

Tabla C.11. Características de la arcilla blanda sin y con gas metano. Pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación				
Parámetro	Número de Muestra			
	DSS_SZ0-S9d	DSS_SZ7-S8i	DSS_SZ7-S8d	DSS_SZ15-S2d
Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	32.27	31.70	16.57	29.93
Deformación al corte, γ , (%)	19.79	5.64	4.41	8.08
Presión de poro (u_{wg}), (kPa)	18.91	14.94	10.68	16.14
Consolidación				
$\sigma'_{v,c}$	98.49	98.59	49.75	96.81
$\varepsilon'_{v,c}$	15.25	15.65	8.31	15.30
Esfuerzo vertical σ'_v , (kPa)	79.58	83.65	39.07	80.68
Módulos				
Secante, G_s , (kPa)	163.46	559.96	378.11	473.78
Tangente, G_T , (kPa)	0.05	-8.47	7.57	23.17
Relación de esfuerzos, ϕ'_{DSS} , (%)	22.08	20.77	22.97	20.34
Resultados normalizados				
Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$, ($c_u/\sigma'_{v,c}$)	0.328	0.322	0.333	0.309
Esfuerzo vertical, $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.808	0.848	0.785	0.834
Decremento, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.192	0.152	0.215	0.173
Relación de esfuerzo, τ_h/σ'_v	0.406	0.379	0.424	0.374

En la Tabla C-11 se observa que, aparentemente, el esfuerzo cortante se reduce muy poco conforme aumenta el contenido de gas en la arcilla, cuando tienen similar presión de consolidación, $\sigma'_{v,c}$, este comportamiento se observa claramente en la Figura C.30 y la misma tendencia se observa en los datos normalizados, Figura C.31, excepto que el esfuerzo cortante normalizado de la arcilla con gas al 7 por ciento (con menor presión de consolidación) es ligeramente mayor que el de la arcilla sin gas.

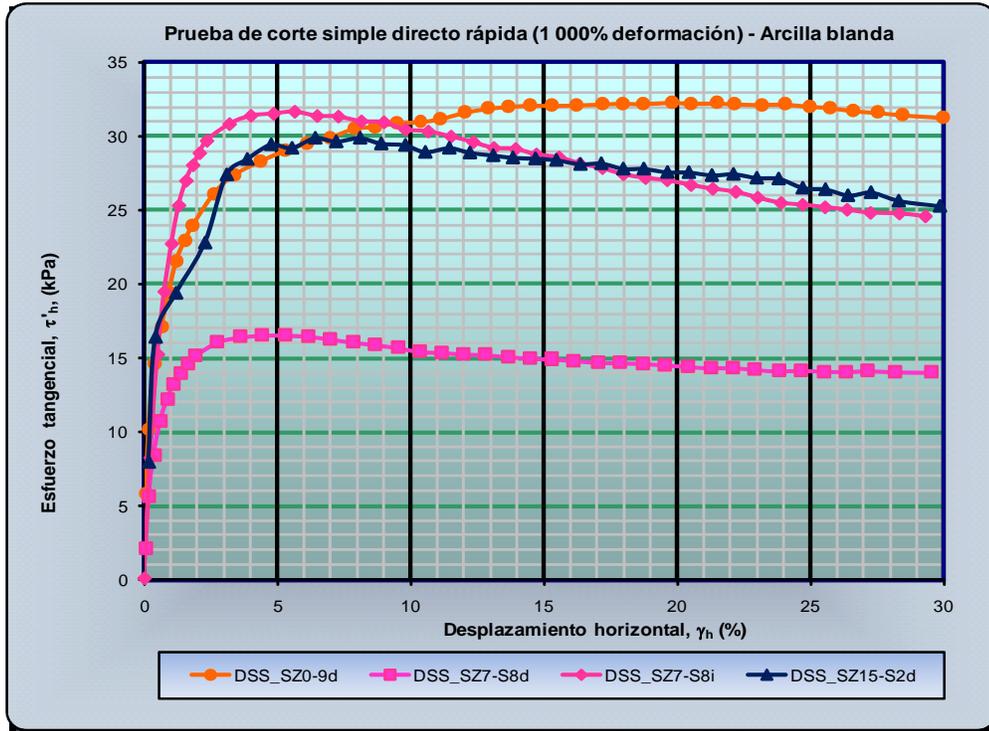


Figura C.30. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

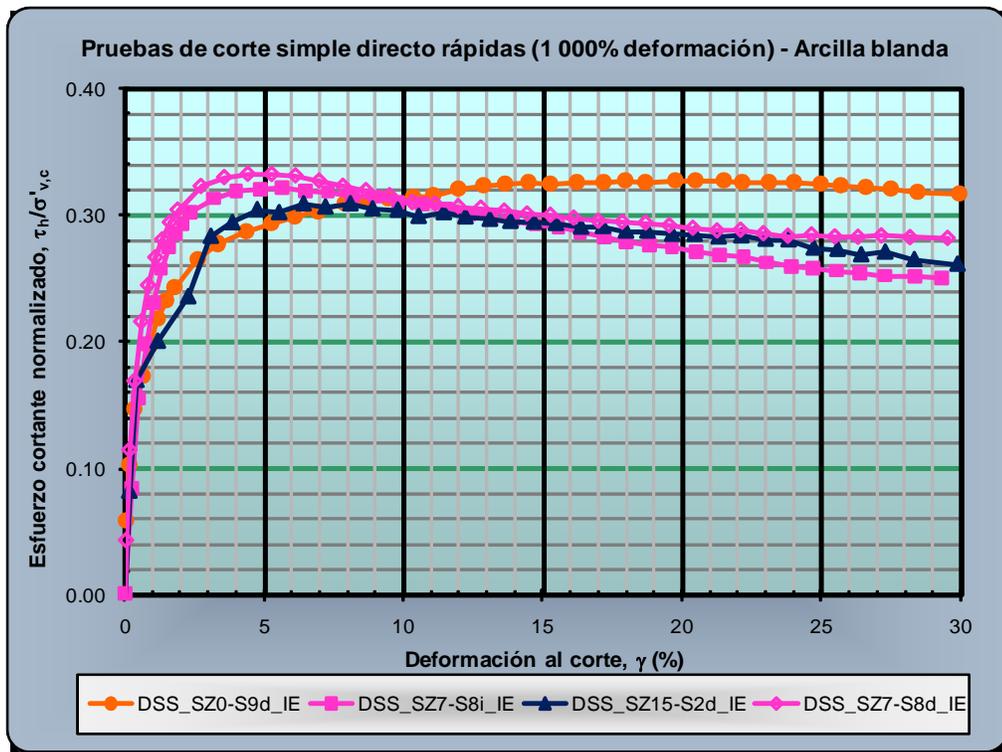


Figura C.31. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.



El comportamiento presentado es debido a que el gas sobrepresionado actúa, como un «amortiguador», en contra de las fuerzas de corte inducidas, mientras que en la arcilla con mayor contenido de gas no se obtiene el mismo esfuerzo cortante normalizado debido a que por la mayor cantidad de gas, las láminas de arcilla no logran agrupar al gas por mucho tiempo y generar un esfuerzo cortante mayor, pero si lo suficientemente alto como para influir en el comportamiento de la arcilla cuando se deforma a 1 000 por ciento por hora.

En la Figura C.32 se presentan los resultados normalizados del decremento del esfuerzo vertical y se observa que es mayor para ambas arcilla con gas, excepto que es menor en la arcilla con gas al 15 por ciento después de aproximadamente el 21 por ciento de deformación al corte.

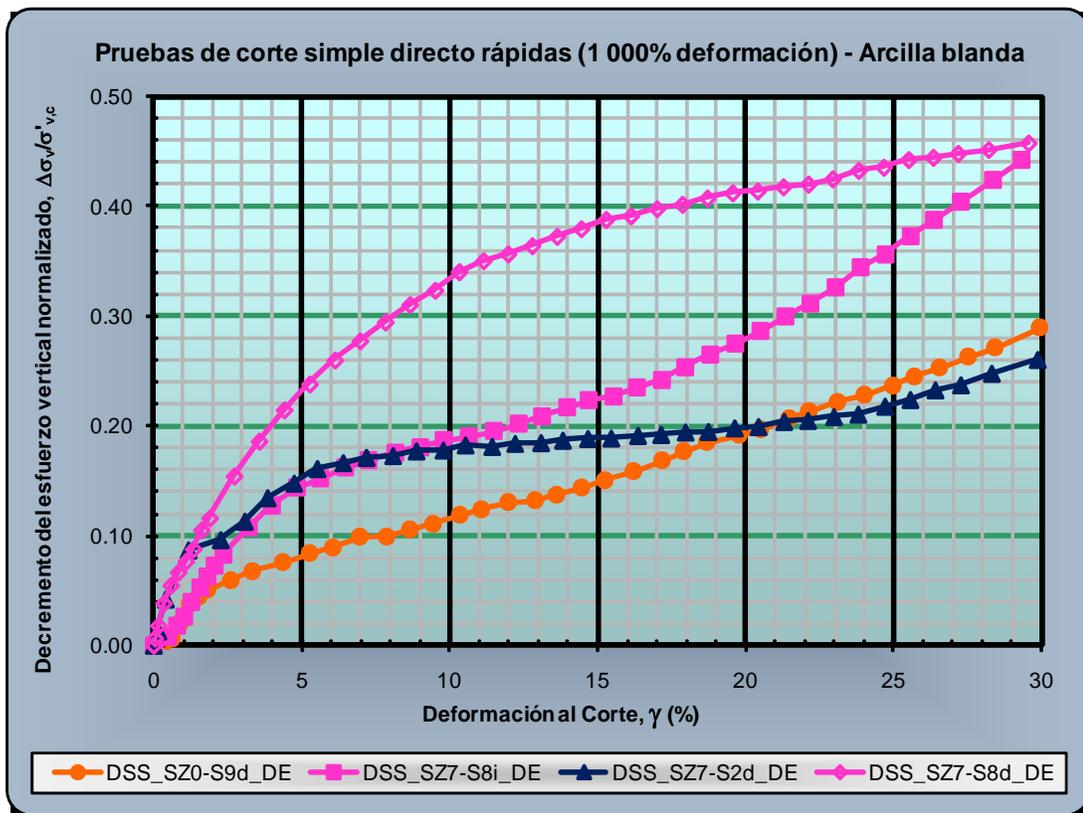


Figura C.32. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En las curvas presentadas, Figura C.32, se observa que al inicio del ensaye el decremento de esfuerzo es mayor en la arcilla con gas al 15 por ciento que en las otras dos muestras de arcilla con la misma presión de consolidación, hasta aproximadamente el 6 por ciento de deformación al corte; también se observa que ambas curvas de la arcilla con gas presentan una porción cóncava hasta aproximadamente el 10 por ciento de la deformación al corte, pero la arcilla con gas al 15 por



ciento se mantiene sin incrementarse el decremento normalizado hasta aproximadamente el 22 por ciento de deformación al corte, mientras que la arcilla con gas al 7 por ciento crece gradualmente. El comportamiento de la arcilla con gas al 15 por ciento se asocia a que el gas contrarresta los esfuerzos cortantes inducidos y por lo tanto el decremento del esfuerzo vertical es menor, aunque no necesariamente genera esfuerzos cortantes normalizados mayores.

En la Figura C.33 se presentan los resultados del esfuerzo cortante versus el esfuerzo vertical y, aparentemente, se observa que existe una disminución de ambos esfuerzos en la arcilla con gas, siendo mayores las reducciones en la arcilla con gas al 7 por ciento (muestra DSS_SZ7-S8d), cuando presenta diferentes presiones de consolidación, pero los resultados son similares cuando la arcilla con gas al 7 por ciento tiene similares presiones de consolidación (DSS_SZ7-S8i).

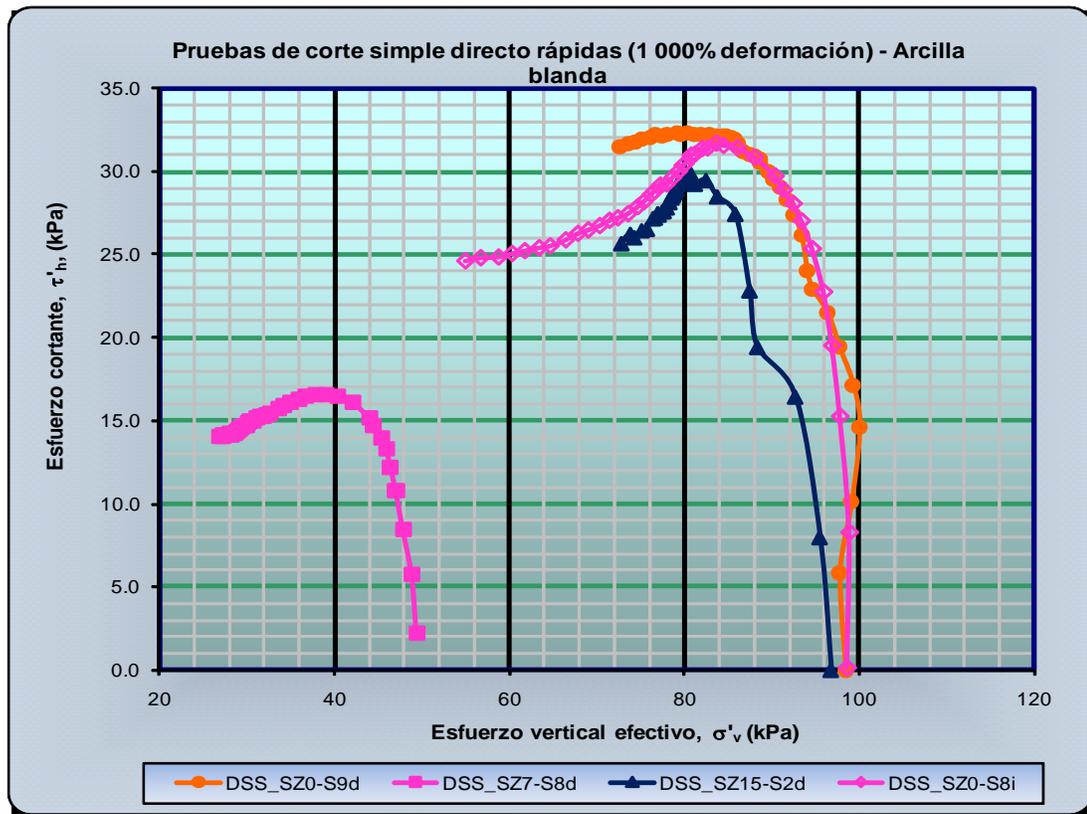


Figura C.33. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En la Figura C.34 se observa que el esfuerzo cortante normalizado es ligeramente mayor en la arcilla con gas al 7 por ciento (aunque, prácticamente, es el mismo que el de la arcilla sin gas). También se observa en las curvas normalizadas que el inicio del ensaye es similar en ambas muestras de arcilla con gas metano, pero ligeramente menores que el de la arcilla sin gas, se



atribuye este comportamiento a que la estructura de la arcilla con gas es similar en rigidez, la cual se incrementa gradualmente hasta igualar la de la arcilla sin gas, en el caso de la arcilla con menor contenido de gas y genera una rigidez ligeramente menor cuando la arcilla contiene la mayor cantidad de gas metano.

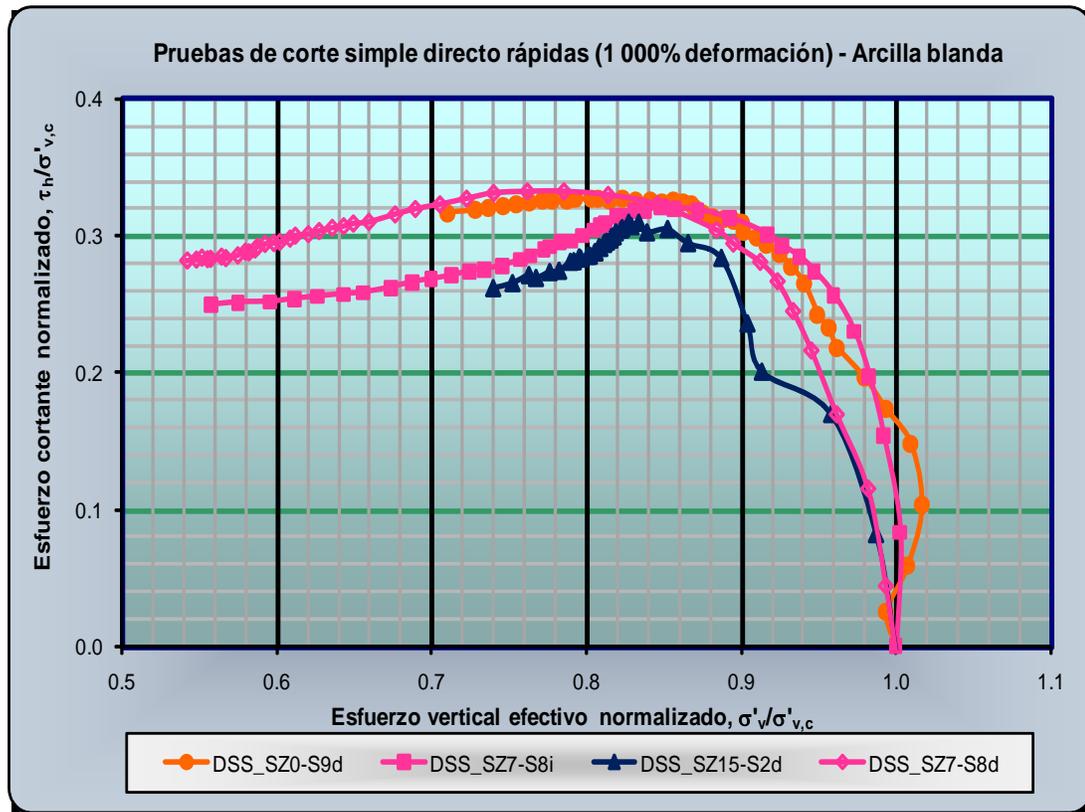


Figura C.34. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En los resultados a la falla presentados en la Tabla C.11 se observa que la mayor y menor presión de poro es la generada por la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los resultados normalizados de la presión de poro se observa, Figura C.35, que la presión de poro normalizada es mayor en la arcilla con gas que para la arcilla sin gas metano, excepto al final del ensaye donde la arcilla con gas al 15 por ciento es ligeramente menor.

En la curva de la arcilla con gas al 15 por ciento se presentan dos concavidades durante el desarrollo del ensaye, mientras que en la curva de la arcilla con gas al 7 por ciento se presenta una (cuando la arcilla se consolida a los mismos esfuerzos), se atribuye este comportamiento a la generación de zonas de alta presión dentro de la estructura de la arcilla, debido a la presencia del gas metano, pero una vez que se disipa la presión de poro el desarrollo del ensaye es lineal,

cuando la arcilla contiene la menor cantidad de gas y solo al final del ensaye cuando la arcilla contiene la mayor cantidad de gas metano.

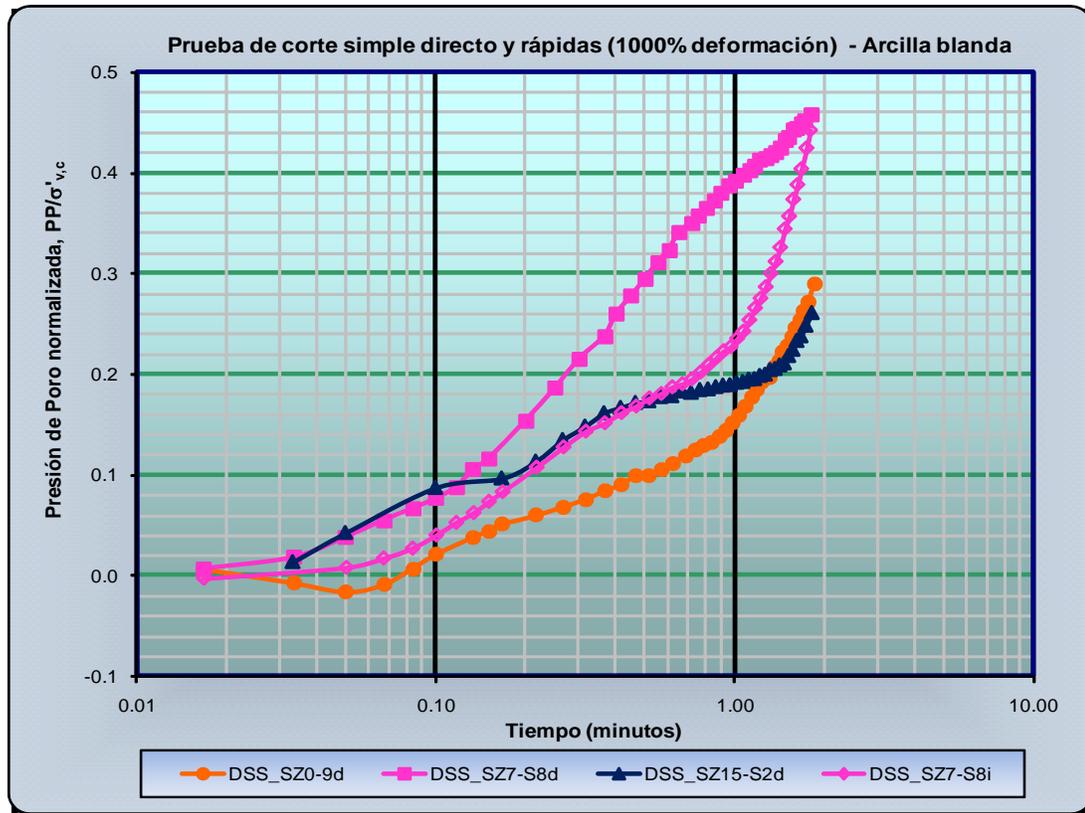


Figura C.35. Presión de poro normalizada de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En los resultados a la falla presentados en la Tabla C.11 se observa que el menor y mayor módulo secante corresponden a la arcilla sin y con gas (ambas muestras), respectivamente; en cambio, en los resultados iniciales normalizados del módulo secante, Figura C.36a, se observa que prácticamente, los valores de la arcilla con gas metano son mayores que los de la arcilla sin gas (posterior al 2 por ciento de deformación al corte); pero los correspondientes a la arcilla con gas metano al 15 por ciento son ligeramente menores que los de la arcilla con gas al 7 por ciento. En la Figura C.36b se presenta la continuación de la curva y se observa que el módulo secante normalizado de la arcilla con gas se mantiene ligeramente mayor hasta aproximadamente un 7 por ciento de deformación al corte, para posteriormente reducir su diferencia y ser menor que el de la arcilla sin gas hasta el final del ensaye.

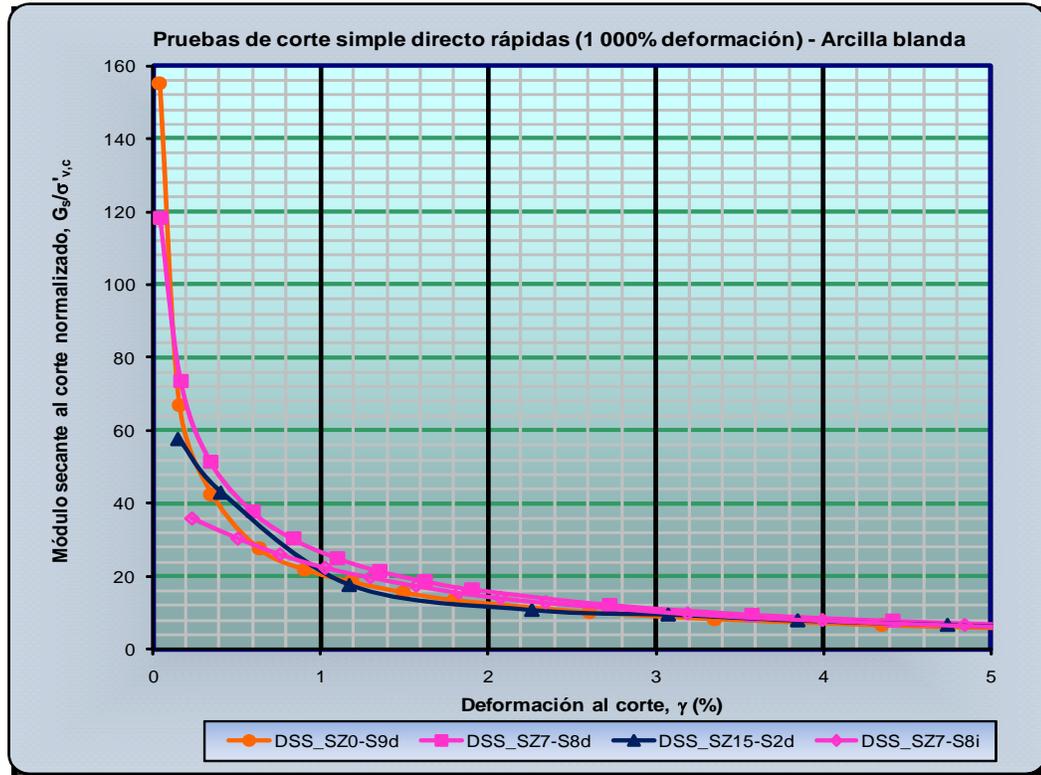


Figura C.36a. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

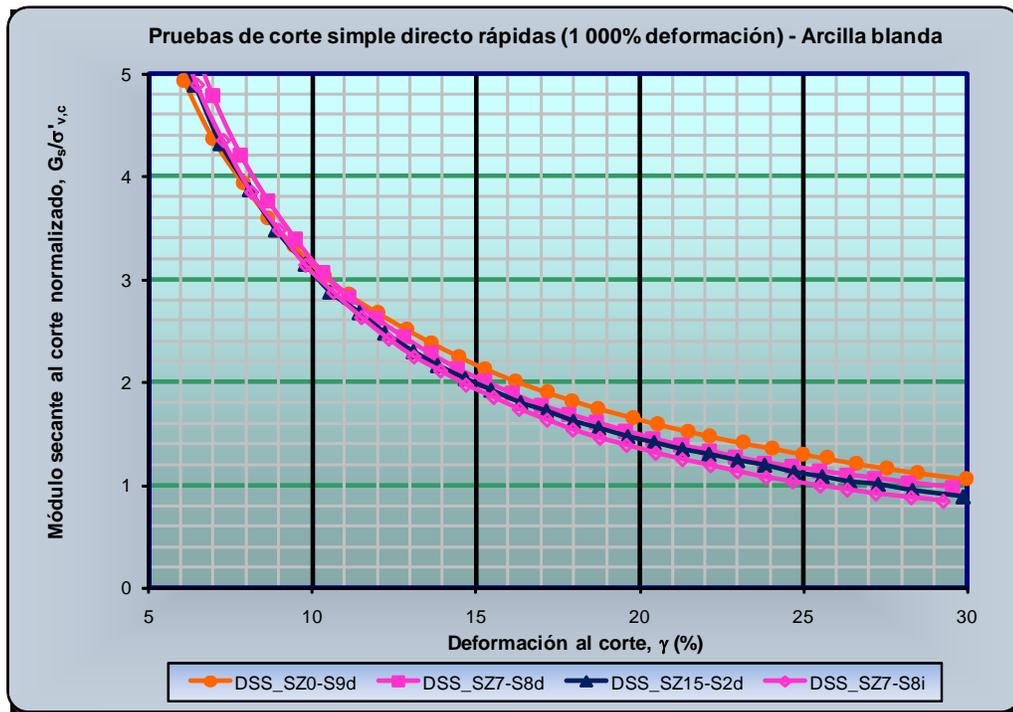


Figura C.36b. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En los resultados a la falla presentados en la Tabla C.11 se observa que el menor y mayor módulo tangente corresponden a la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, cuando se comparan las muestras de arcilla con gas consolidadas con los mismos niveles de esfuerzo; en cambio, en los resultados presentados en la Figura C.37a se observa que el mayor módulo tangente normalizado corresponde a la arcilla con gas hasta una deformación al corte de 2.5 por ciento, en el caso de la arcilla con menor cantidad de gas y hasta el 4 por ciento en el caso de la arcilla con mayor cantidad de gas, Figura C.37b. En la Figura C.37b también se observa que los valores del módulo tangente de la arcilla con gas se acercan a la arcilla sin gas después del 14 por ciento de deformación al corte. Este comportamiento se atribuye a que la estructura de la arcilla con gas opone cierta resistencia ante el esfuerzo cortante, por lo que el valor del módulo tangente se incrementa y disminuye en varias ocasiones.

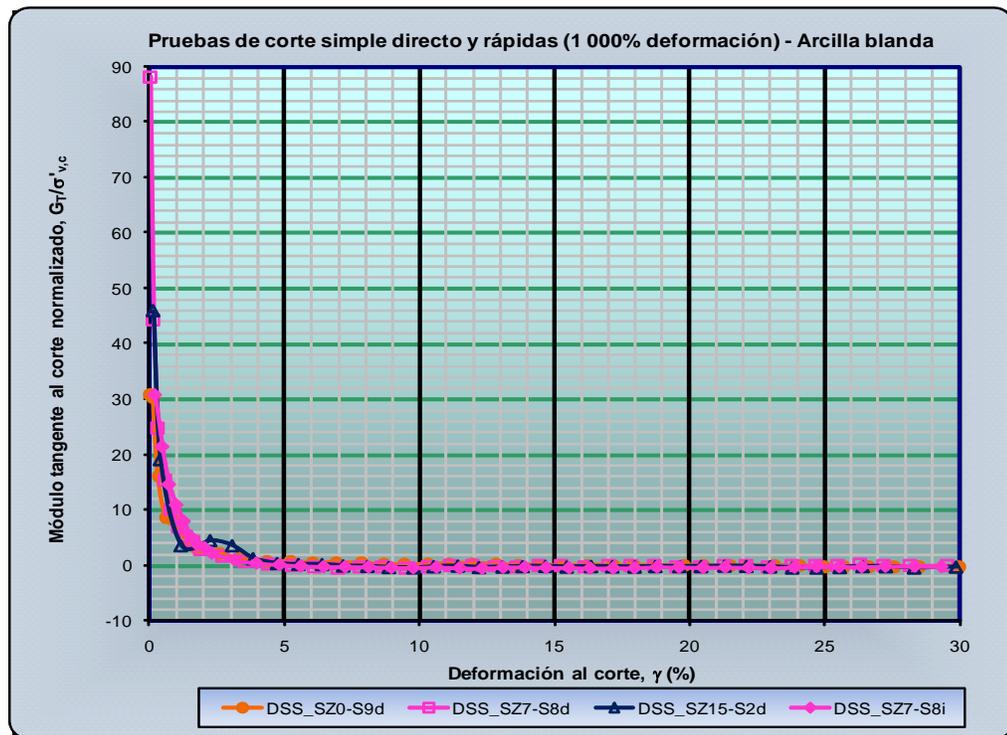


Figura C.37a. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En los resultados presentados en la Tabla C.11 se observa que la mayor y menor relación de esfuerzos a la falla, ángulo ϕ'_{DSS} , corresponden a la arcilla sin (aunque es prácticamente el mismo con el de la arcilla con gas al 7 por ciento) y con gas al 15 por ciento, respectivamente, cuando se compara la arcilla consolidada a los mismos niveles de esfuerzo, mas sin embargo, en los resultados normalizados, Figura C.38, se observa que ambas muestras de arcilla con gas generan la misma pendiente y es ligeramente mayor que la de la arcilla sin gas.

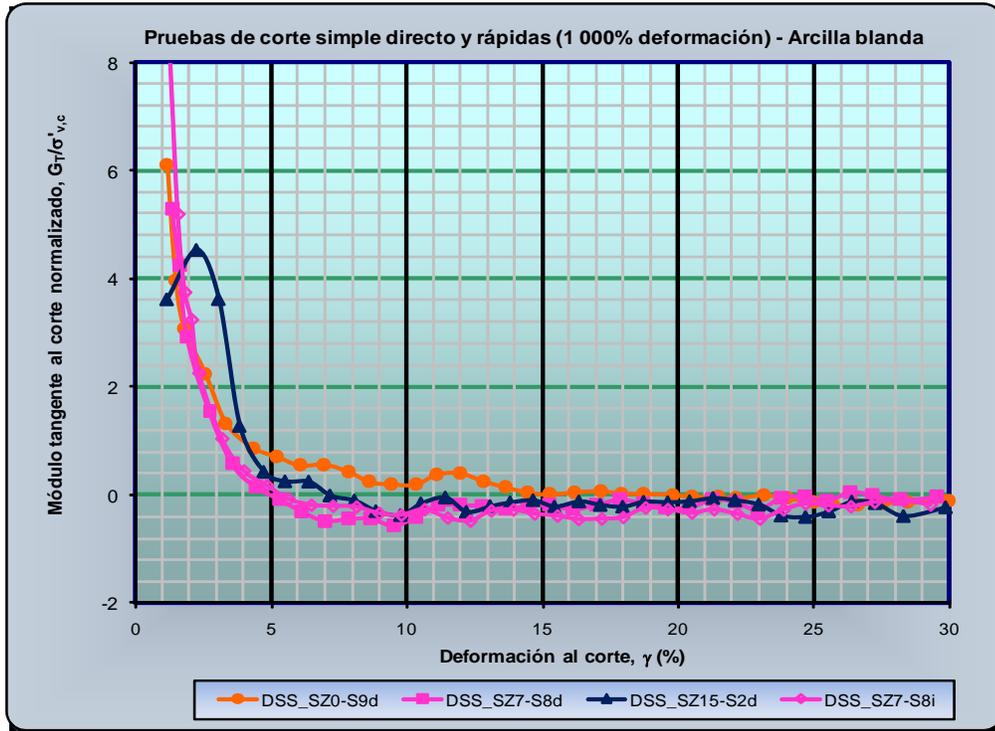


Figura C.37b. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

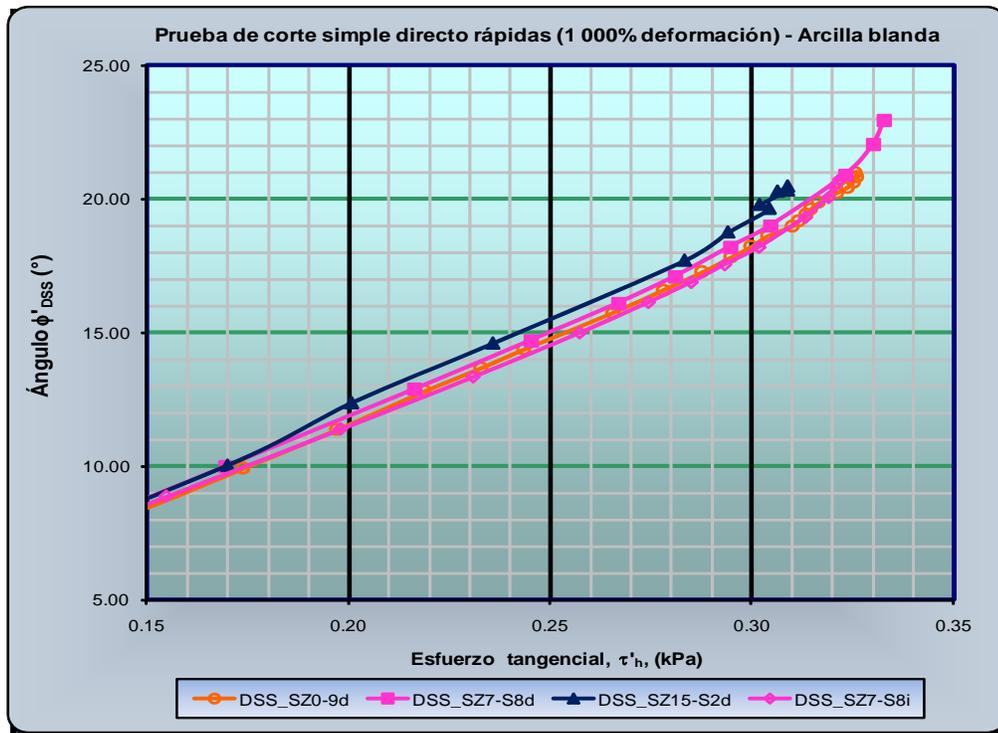


Figura C.38. Ángulo ϕ de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En la Tabla C.12 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas índice realizadas en las muestras de arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que el grado de saturación es ligeramente mayor para la arcilla con gas al 7 por ciento, cuando tiene la misma presión de consolidación que las otras muestras de arcilla. En cuanto al peso volumétrico total y se seco se observa que el correspondiente al de la arcilla con gas es, prácticamente, el mismo y ligeramente menor que el de la arcilla sin gas. La diferencia obtenida equivale aproximadamente a ± 7 y ± 9 por ciento para el peso volumétrico total y seco, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas. En cuanto a los límites de Atterberg se observa que son muy similares.

Tabla C.12. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas (Pruebas rápidas DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora)

Propiedades índice								
Número de muestra	Gs	S _o (%)	ω _o (%)	Peso Volumétrico (kN/m ³)		Límites de Atterberg (%)		
				Total	Seco	LL	LP	IP
DSS_SZ0-S9d	---	100.7	71	15.60	9.14	---	---	---
DSS_SZ7-S8i	2.682	94.5	76	14.66	8.34	81	24	57
DSS_SZ7-S8d	---	92.3	76	14.42	8.20	86	25	61
DSS_SZ15-S2d	---	92.5	73	14.37	8.33	---	---	---

C.3.2. Resultados de la arcilla media sin y con gas metano

C.3.2.1. Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora

En la Tabla C.13 se presentan los resultados a la falla obtenidos de las pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora, también se incluyen los resultados normalizados con la presión de consolidación, correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano.

En la Figura C.39 se presentan gráficamente los resultados del esfuerzo cortante y, aparentemente, se observa que la arcilla con gas metano presenta los mayores esfuerzos cortantes, en cambio, en los datos presentados en la Figura C.40 se observa que el esfuerzo cortante normalizado es menor en ambas muestras de arcilla con gas metano y, prácticamente, el mismo entre ellas. Este comportamiento normalizado se atribuye a que debido al confinamiento proporcionando por las láminas de arcilla el gas interactúa con la arcilla para resistir o «amortiguar»



el esfuerzo cortante inducido, al incrementar la rigidez de la estructura, como es el caso de la arcilla con mayor cantidad de gas metano.

Tabla C.13. Características de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 5 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación			
Parámetro	Número de Muestra		
	DSS_FZ0-S9b	DSS_FZ7-S3b	DSS_FZ15-S2b
Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	58.08	50.27	102.08
Deformación al corte, γ , (%)	15.26	15.65	14.13
Presión de poro (u_{wg}), (kPa)	68.33	81.97	161.16
Consolidación			
Presión, $\sigma'_{v,c}$, (kPa)	192.81	190.90	383.47
Deformación axial $\varepsilon'_{v,c}$, (%)	10.07	25.01	18.41
Esfuerzo vertical σ'_v , (kPa)	124.49	108.88	222.36
Módulos			
Secante, G_s , (kPa)	382.42	319.41	720.60
Tangente, G_T , (kPa)	-2.59	-4.60	24.13
Relación de esfuerzos, ϕ'_{DSS} , (%)	25.00	24.78	24.66
Resultados normalizados			
Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$ ($c_u/\sigma'_{v,c}$)	0.301	0.263	0.266
Esfuerzo vertical, $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.646	0.570	0.580
Decremento, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.354	0.430	0.420
Relación de esfuerzo, τ_h/σ'_v	0.466	0.462	0.459

En la Figura C.41 se presentan gráficamente los resultados normalizados del decremento del esfuerzo vertical y se observa que es mayor para la arcilla con gas metano (y el mismo entre ellas) que el de la arcilla sin gas. En la Figura C.41 se observa que el inicio de las curvas de la arcilla sin y con gas al 7 por ciento es el mismo hasta aproximadamente el dos (2) por ciento de deformación al corte; mientras que el inicio de la curva de la arcilla con gas al 15 por ciento es menor que la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, hasta aproximadamente 2.5 y 3.5 de deformación al corte, respectivamente, así mismo, se observa que el decremento normalizado disminuye ligeramente en la arcilla con gas al 15 por ciento desde el 18 por ciento de deformación al corte.

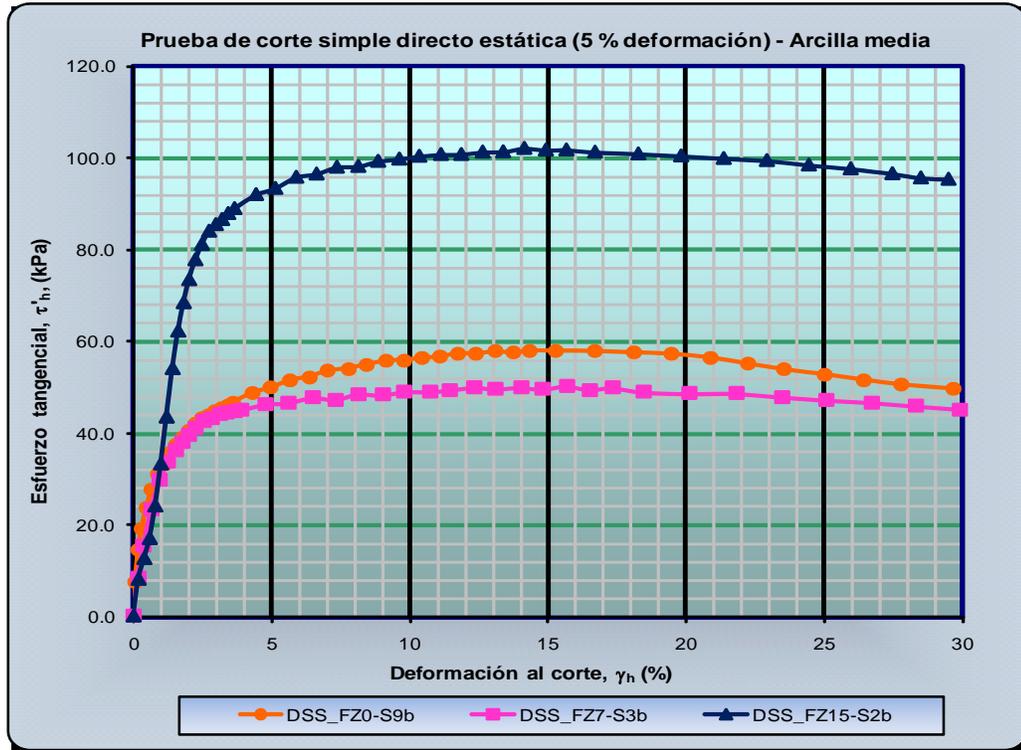


Figura C.39. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.

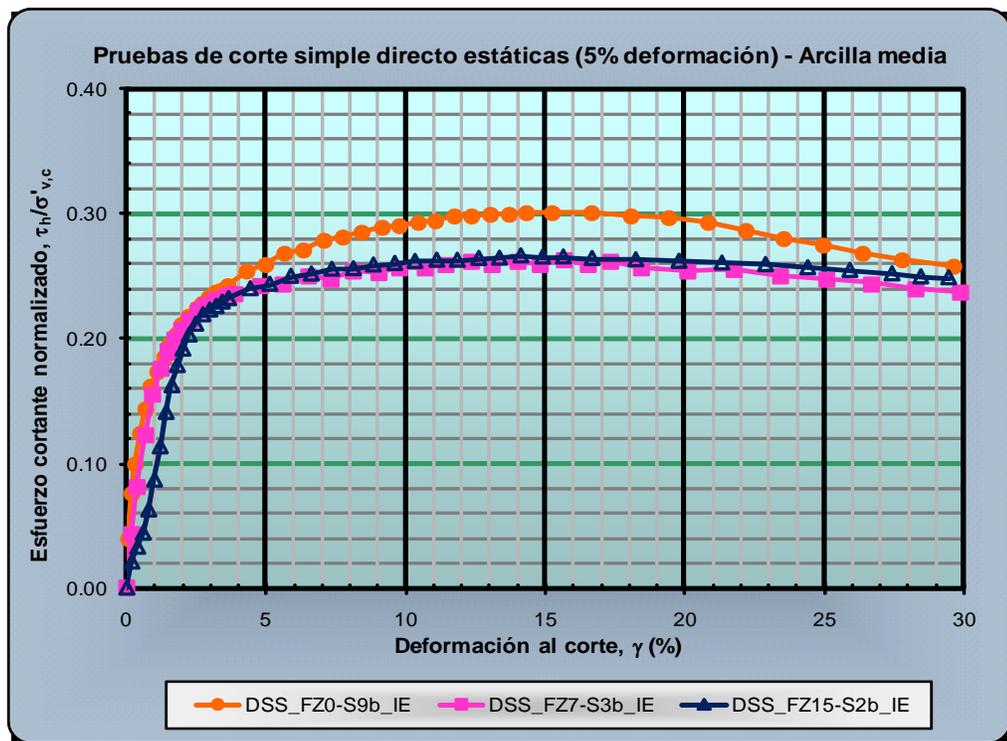


Figura C.40. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

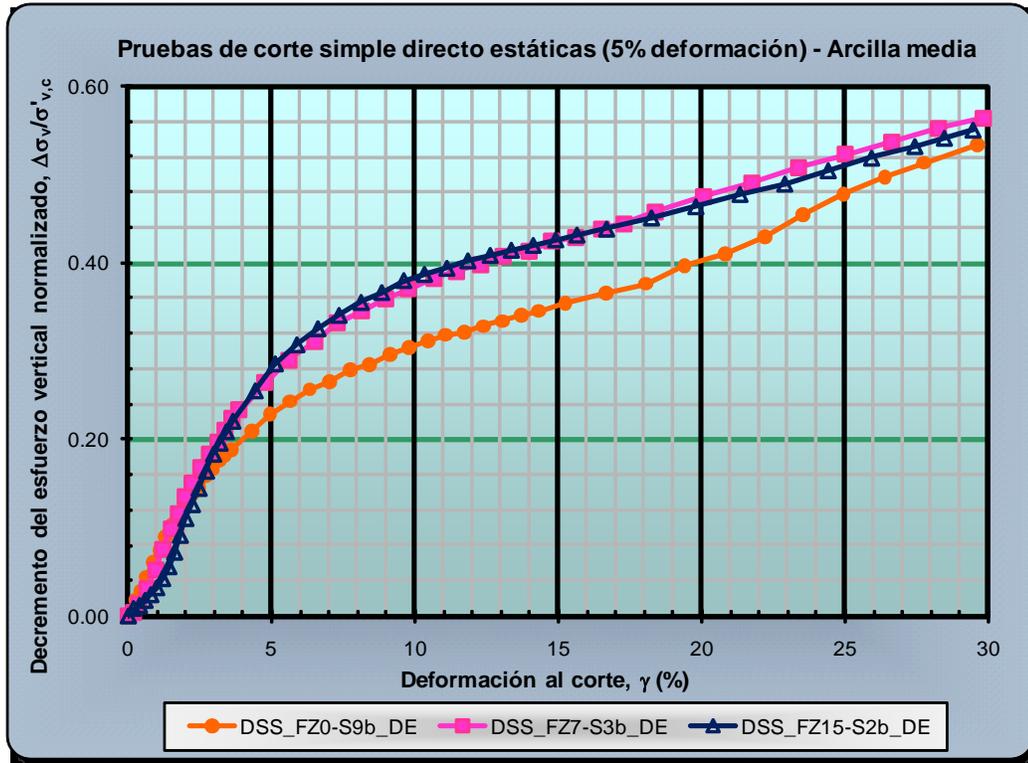


Figura C.41. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla media sin y con gas metano.

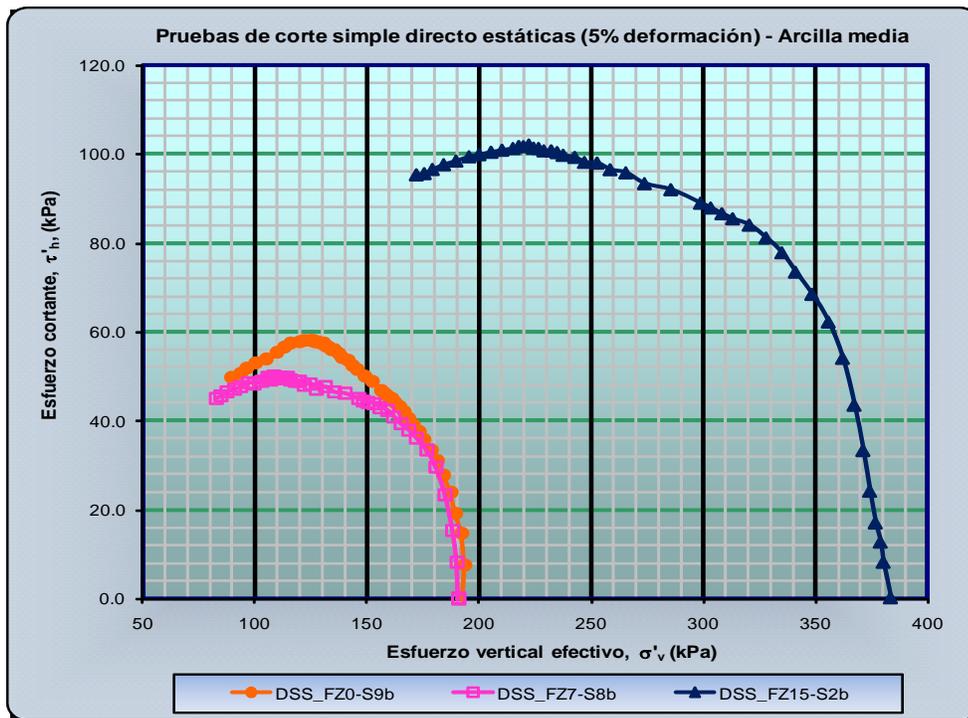


Figura C.42. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.



En la Figura C.42 se presentan gráficamente los resultados del esfuerzo cortante versus el esfuerzo vertical y se observa que, aparentemente, existe un incremento de ambos esfuerzos en la arcilla con gas al 15 por ciento, mientras que en la arcilla con gas al 7 por ciento se presenta un ligero decremento en el esfuerzo cortante, mas sin embargo, en los datos presentados en la Figura C.43 se observa que el esfuerzo cortante normalizado es, prácticamente, el mismo para la arcilla con gas metano, pero menor que el de la arcilla sin gas, también se observa que el inicio de la curva de la arcilla con gas metano al 7 por ciento es igual que el de la arcilla sin gas, mientras que el de la arcilla con gas al 15 por ciento es ligeramente menor.

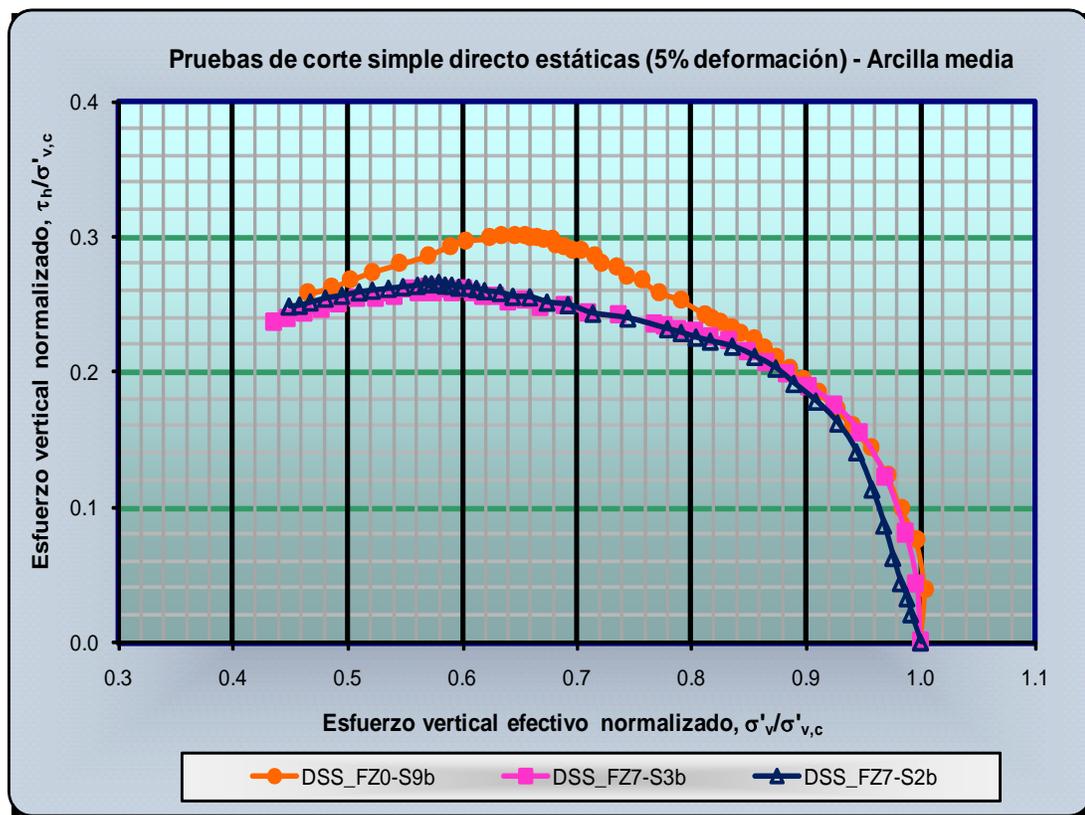


Figura C.43. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

En los datos presentados en la Tabla C.13 se observa que la menor y mayor presión de poro corresponden a la arcilla sin y con gas metano al 15 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los datos normalizados presentados en la Figura C.44 se observa que la presión de poro normalizada es mayor en la arcilla con gas metano al 7 y 15 por ciento, a partir de aproximadamente 30 y 45 minutos, respectivamente. También se observa en la Figura C.44 que el inicio de la presión de poro es mayor durante los primeros 15 minutos del ensaye en la arcilla con gas al 15 por ciento que en la arcilla con gas al 7 por ciento, posteriormente es ligeramente menor

que la arcilla con gas al 7 por ciento y la diferencia empieza a disminuir desde 50 a 200 minutos aproximadamente, para terminar incrementándose la diferencia entre ambas arcilla con gas, acercándose el final de la presión de poro normalizada de la arcilla con gas al 15 por ciento a los valores máximos de la arcilla sin gas. Analizando a detalle la curva de la arcilla con gas, se observa que se forma una concavidad, en el intervalo de los 40 a 200 minutos, aproximadamente.

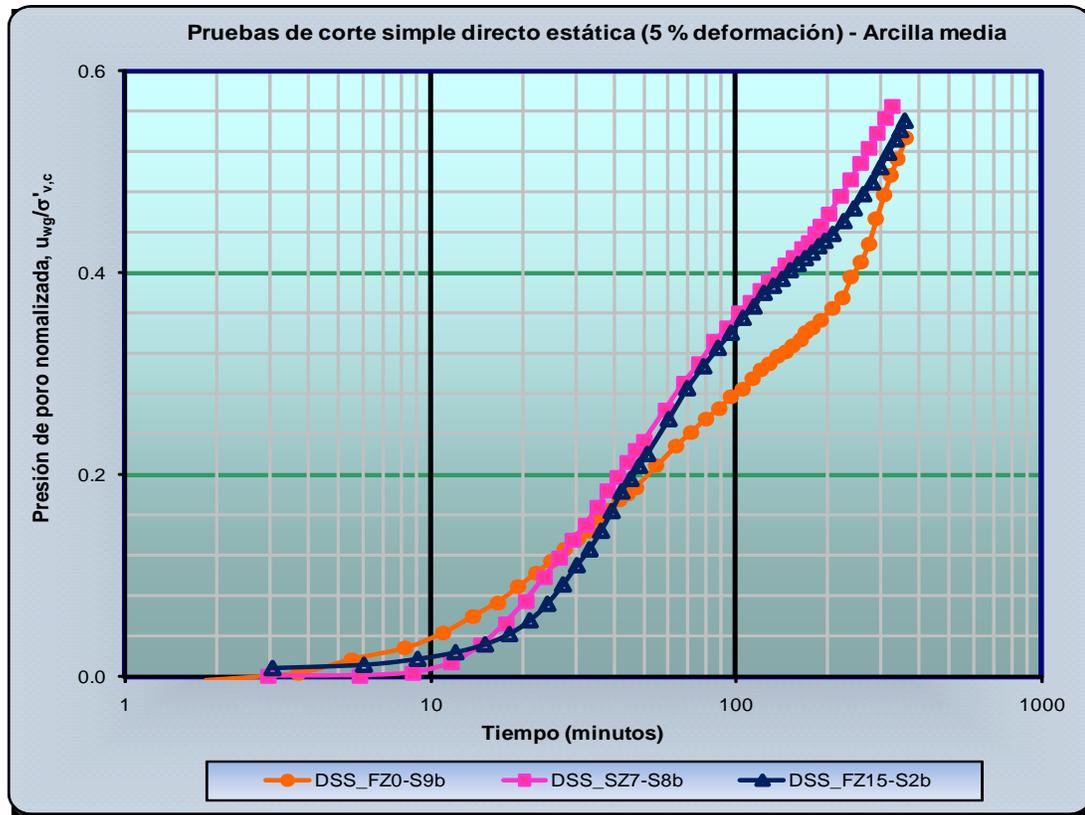


Figura C.44. Presión de poro normalizada de la arcilla media sin y con gas metano.

En los datos presentados en la Tabla C.13 se observa que el menor y mayor módulo secante corresponde a la arcilla con gas metano al 7 y 15 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los datos normalizados presentados en la Figura C.45 se observa que el módulo secante normalizado de la arcilla con gas metano es menor que el de la arcilla sin gas. En el caso de la arcilla con gas al 15 por ciento se observa que el módulo secante normalizado es menor hasta aproximadamente 3.5 por ciento de deformación al corte, que es desde donde presenta los mismos valores que la arcilla con gas al 7 por ciento. En la Figura C.45 también se observa que durante el inicio de la prueba en la arcilla con gas al 15 por ciento se forma una concavidad (0.5 y 4.5 por ciento de deformación al corte), incrementándose el módulo secante durante el 1.5 por ciento de deformación al corte.

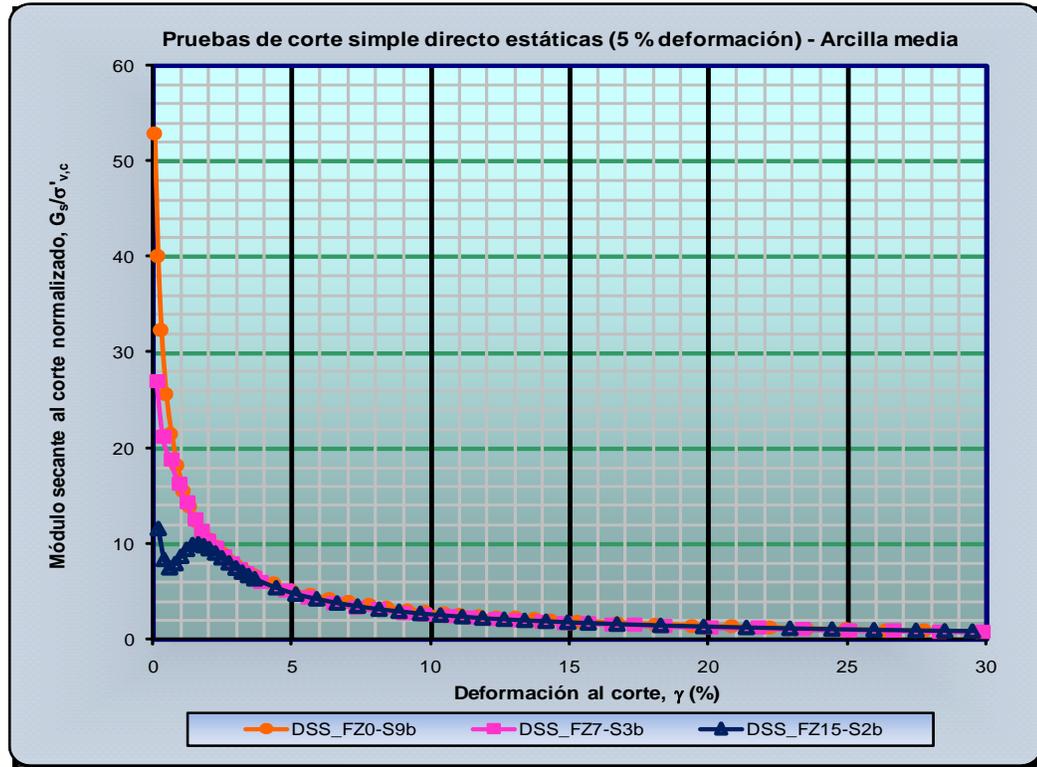


Figura C.45. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

En los datos presentados en la Tabla C.13 se observa que el menor y mayor módulo tangente corresponde a la arcilla sin y con gas metano al 15 por ciento, respectivamente, mas sin embargo, en los datos normalizados presentados en la Figura C.45 se observa que el módulo tangente normalizado de la arcilla con gas metano es menor aproximadamente desde 3 hasta 17 por ciento de deformación al corte, para terminar el ensaye siendo ligeramente mayor que la arcilla sin gas. En la Figura C.45 también se observa que al inicio de la prueba, en la arcilla con gas al 15 por ciento existe un incremento en el módulo tangente normalizado, por aproximadamente 1.5 por ciento de deformación al corte, este comportamiento se atribuye a que la estructura de la arcilla con gas opone cierta resistencia, debido al mayor contenido de gas.

En los resultados presentados en la Tabla C.13 se observa que la mayor y menor relación de esfuerzos a la falla, ángulo ϕ'_{DSS} , corresponden a la arcilla sin y con gas metano (ya que el ángulo ϕ'_{DSS} es, prácticamente en ambas arcilla con gas), respectivamente, además se observa en la Figura C.47 que la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento presentan la misma pendiente, que es mayor que la de la arcilla sin gas, mas sin embargo, en la Figura C.48 se observa que (grafico de la relación de esfuerzos versus el esfuerzo cortante normalizado) los resultados generan la misma pendiente en la arcilla sin y con gas metano.

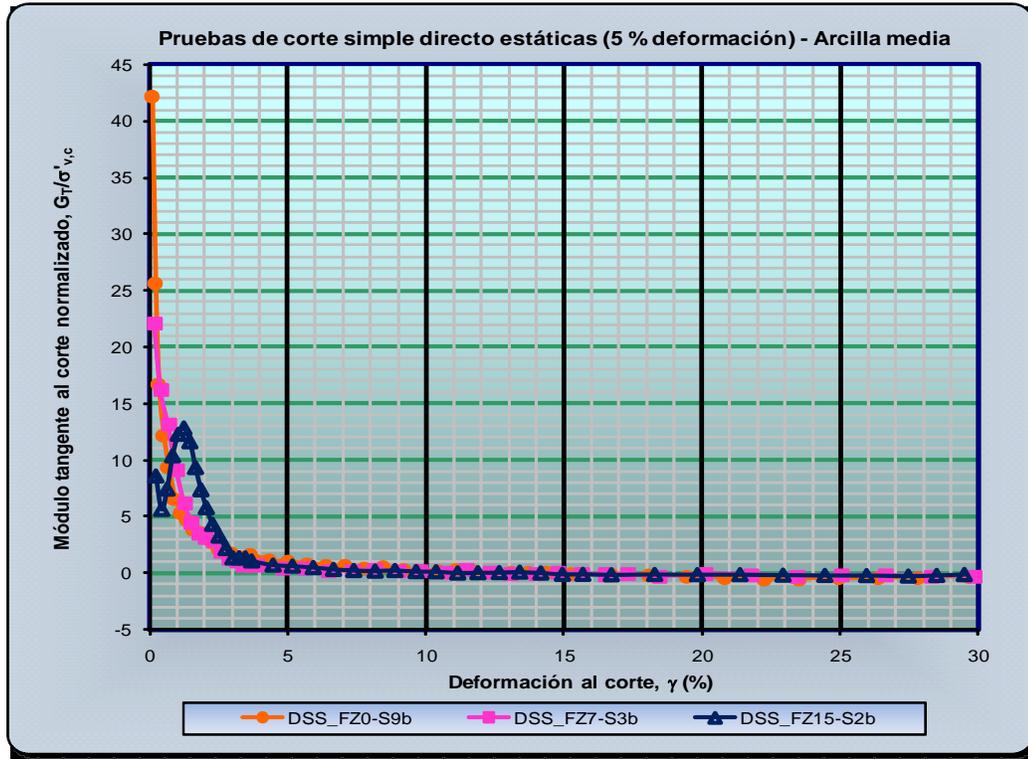


Figura C.46. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

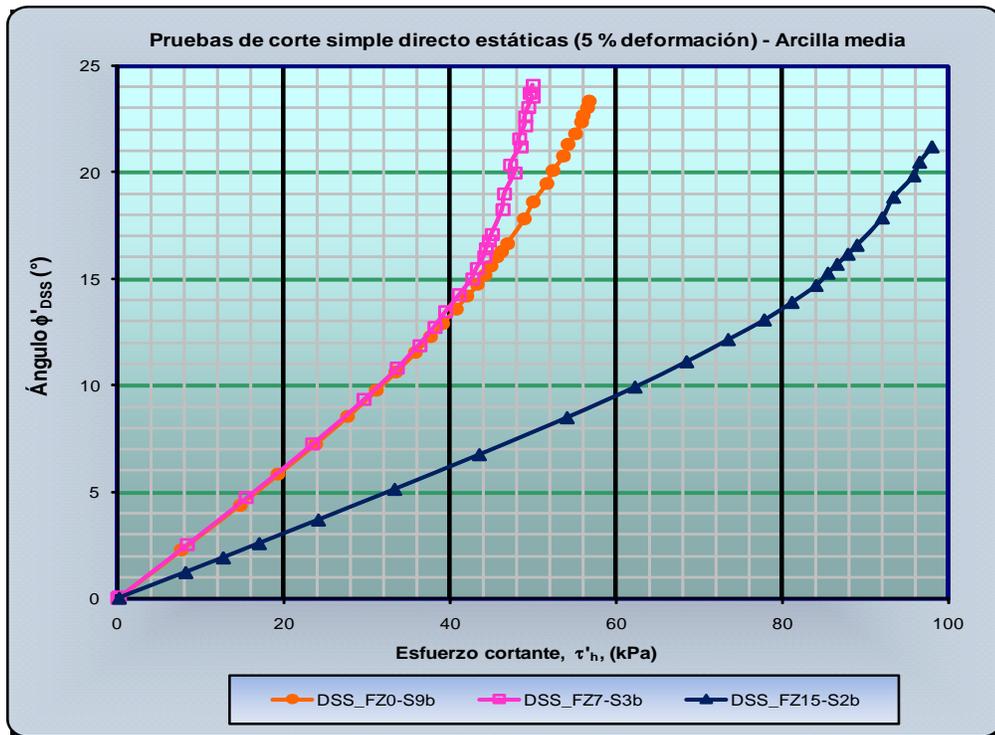


Figura C.47. Ángulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano.

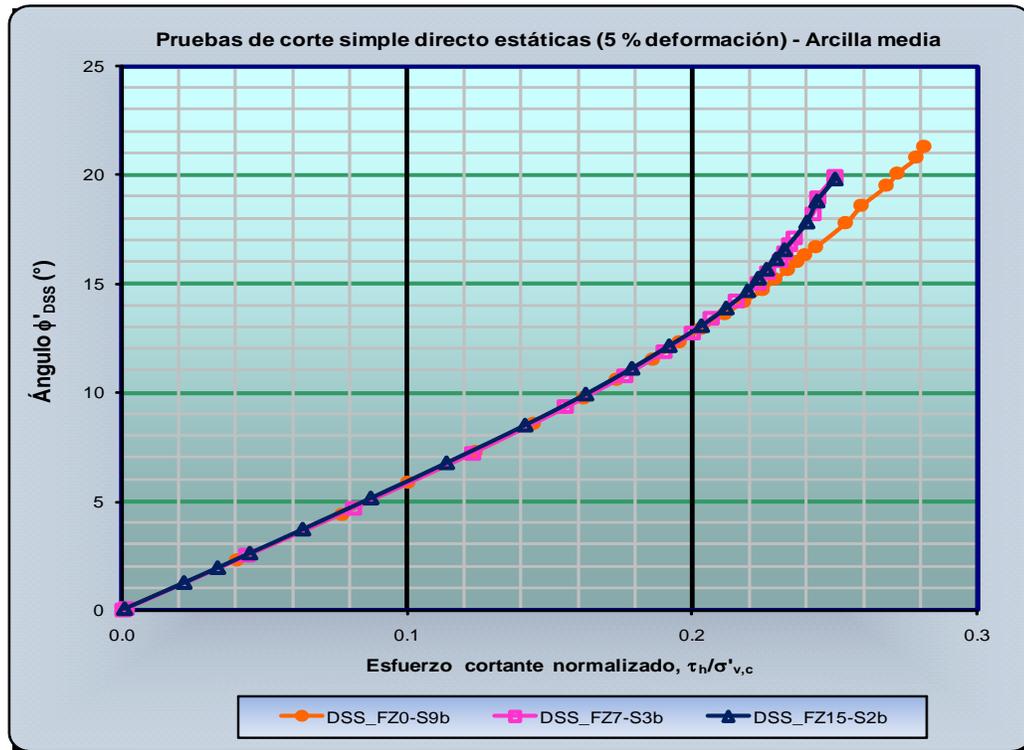


Figura C.48. Ángulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano.

En la Tabla C.14 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas índice realizadas en las muestras de arcilla blanda sin y con gas metano.

Tabla C.14. Resultados de las pruebas índice de la arcilla blanda sin y con gas metano (Pruebas estáticas de DSS a 5 por ciento de deformación por hora).

Propiedades índice								
Número de muestra	G_s	S_o (%)	ω_o (%)	Peso volumétrico (kN/m^3)		Límites de Atterberg (%)		
				Total	Seco	LL	LP	IP
DSS_FZ0-S9b	2.758	98.2	54	16.51	10.71	79	25	54
DSS_FZ7-S3b	2.641	93.7	76	14.47	8.20	84	25	59
DSS_FZ15-S2b	2.614	95.5	56	15.76	10.10	80	25	55

En la Tabla C.14 se observa que el mayor y menor peso específico relativo de los sólidos corresponde a la arcilla sin y con gas metano al 15 por ciento, respectivamente, mientras que el grado de saturación es ligeramente mayor para la arcilla con gas al 15 por ciento que para la arcilla con gas al 7 por ciento.



En lo que respecta al peso volumétrico total y seco se observa que el mayor y menor corresponde a la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, respectivamente. La diferencia obtenida en el peso volumétrico total es del 12 y 5 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, mientras que la diferencia obtenida por la arcilla con gas al 7 por ciento es del 8 por ciento, con respecto a la arcilla con mayor cantidad de gas. En cuanto al peso volumétrico seco se obtuvo una diferencia del 24 y 6 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, mientras que la diferencia obtenida por la arcilla con gas al 7 por ciento es del 19 por ciento, con respecto a la arcilla con mayor cantidad de gas.

En cuanto a los límites de Atterberg se observa que los resultados son prácticamente los mismos para la arcilla sin y con gas metano al 7 y 15 por ciento, indicando que se ensayó, básicamente, el mismo tipo de arcilla.

C.3.2.2. Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora

En la Tabla C.15a se presentan los resultados a la falla obtenidos de las pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora y en la Tabla C.15b se presentan los resultados normalizados con la presión de consolidación, correspondientes a la arcilla media sin y con gas.

Tabla C.15a. Características de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación			
Parámetro	Número de Muestra		
	DSS_FZ0-S9bc	DSS_FZ7-S3c	DSS_FZ15-S2c
Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	39.17	52.14	109.50
Deformación al corte, γ , (%)	17.67	12.50	13.30
Presión de poro (u_{wg}), (kPa)	33.42	61.19	131.00
Consolidación			
$\sigma'_{v,c}$	194.01	195.02	391.09
$\varepsilon'_{v,c}$	6.62	25.56	18.33
Esfuerzo vertical σ'_v , (kPa)	160.59	133.83	260.09
Módulos			
Secante, G_s , (kPa)	222.79	420.01	826.22
Tangente, G_T , (kPa)	11.83	-7.57	-1.05
Relación de esfuerzos, ϕ'_{DSS} , (%)	13.7	21.29	22.84



Tabla C.15b. Características normalizadas de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 100 por ciento de deformación por hora.

Características normalizadas esfuerzo-deformación			
Parámetro	Número de Muestra		
	DSS_FZ0-S9bc	DSS_FZ7-S3c	DSS_FZ15-S2c
Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$ ($c_u/\sigma'_{v,c}$)	0.202	0.267	0.280
Esfuerzo vertical, $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.828	0.686	0.665
Decremento, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.172	0.314	0.335
Relación de esfuerzo, τ_h/σ'_v	0.240	0.390	0.420

En los resultados a la falla presentados en la Tabla C.15a y en los datos presentados en la Figura C.49 se observa que el menor y mayor esfuerzo cortante corresponden a la arcilla sin y con gas metano al 7 por ciento, respectivamente, la misma tendencia se muestra en los datos normalizados, presentados en la Figura C.50.

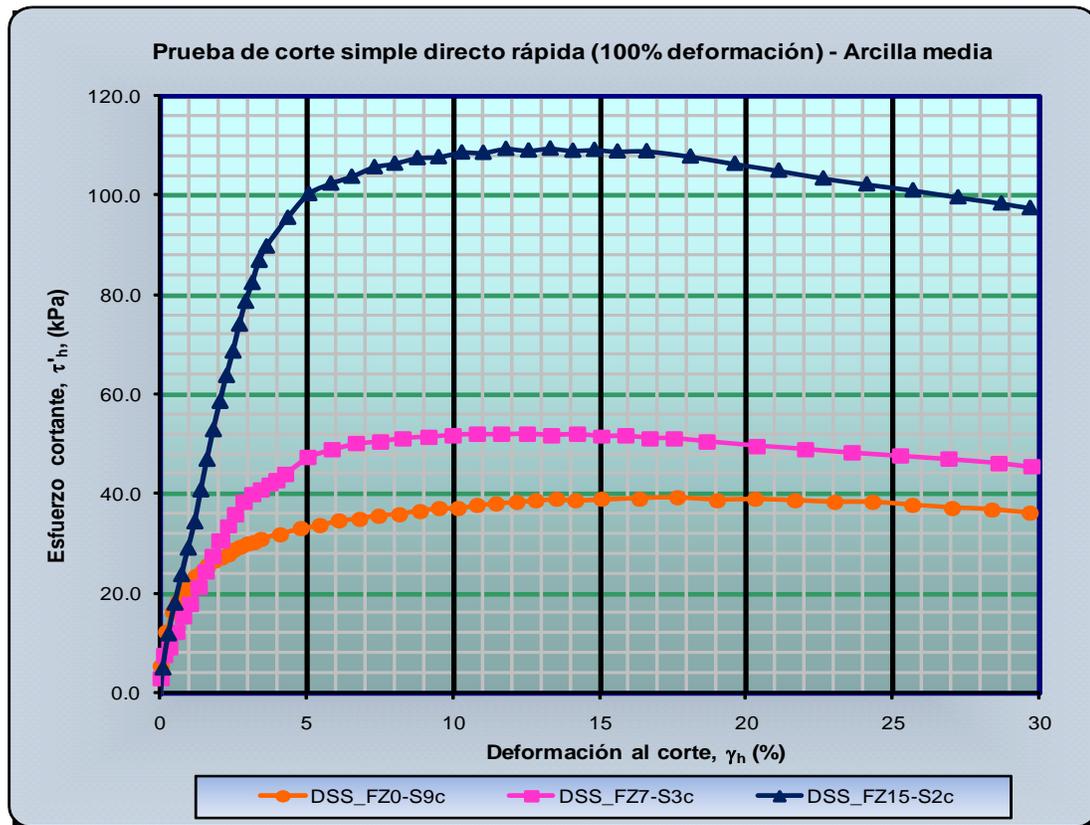


Figura C.49. Esfuerzo cortante de la arcilla media sin y con gas metano.

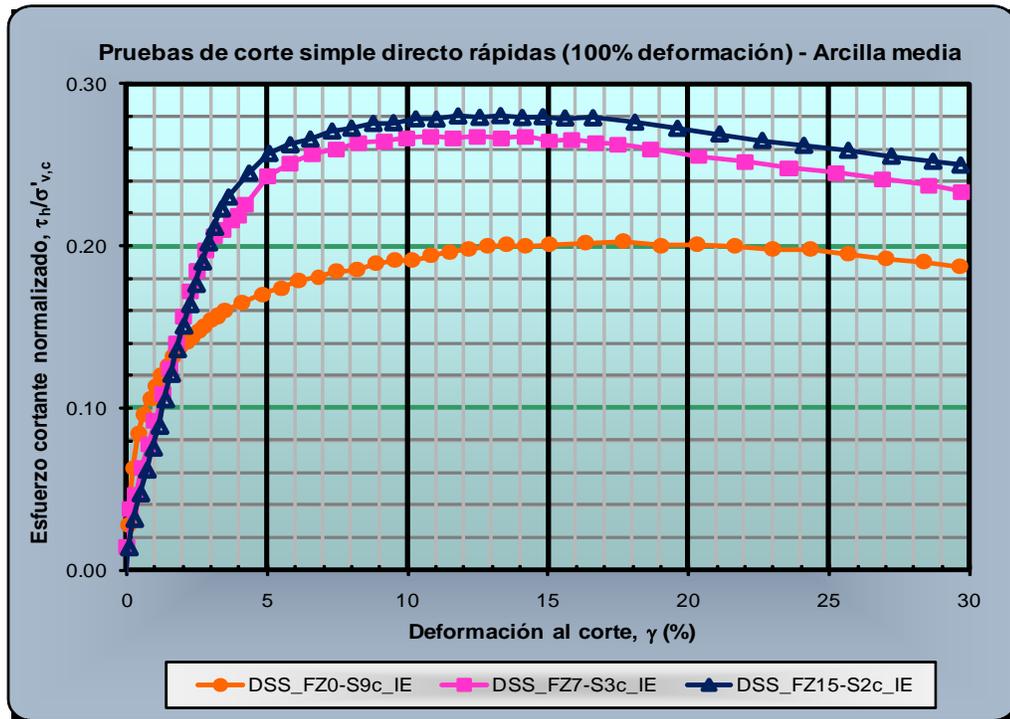


Figura C.50. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

En la Figura C.51 se presentan gráficamente los resultados normalizados del decremento del esfuerzo vertical y se observa que es mayor para ambas arcilla con gas que el de la arcilla sin gas, pero ambas curvas son menores hasta el dos (2) y cuatro (4) por ciento de deformación al corte, para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, presentándose los menores valores en la arcilla con gas al 15 por ciento hasta el 7 por ciento de deformación al corte, donde es ligeramente mayor, pero después del 14 por ciento de deformación al corte se reducen nuevamente los valores ligeramente, con respecto a la arcilla con gas al 7 por ciento. En la curva de la arcilla con gas se presenta una porción convexa que se asocia a una liberación de presiones (aproximadamente 6 a 15 por ciento de deformación al corte) mientras se presenta un reacomodo del gas dentro de la estructura de la arcilla, resultando en valores constantes del decremento normalizado, mientras la muestra se deforma al corte por aproximadamente tres (3) por ciento.

En la Figura C.52 se presentan gráficamente los resultados del esfuerzo cortante versus el esfuerzo vertical y se observa que, aparentemente, existe una disminución de ambos esfuerzos en la arcilla con gas metano al 7 por ciento, mientras que los valores se incrementan en la arcilla con gas al 15 por ciento, en cambio, en los datos normalizados presentado en la Figura C.53 se observa que el esfuerzo cortante normalizado es mayor en la arcilla con gas metano (ligeramente menor el de la arcilla con gas al 7 por ciento) que el de la arcilla sin gas.

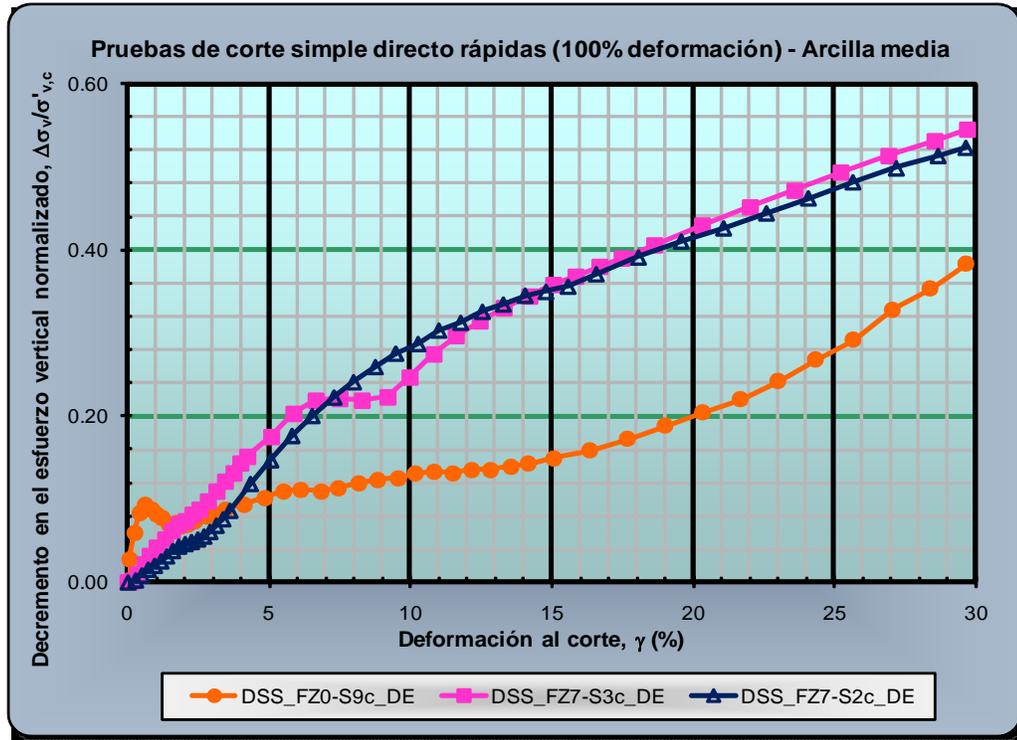


Figura C.51. Decremento de esfuerzo vertical de la arcilla media sin y con gas metano.

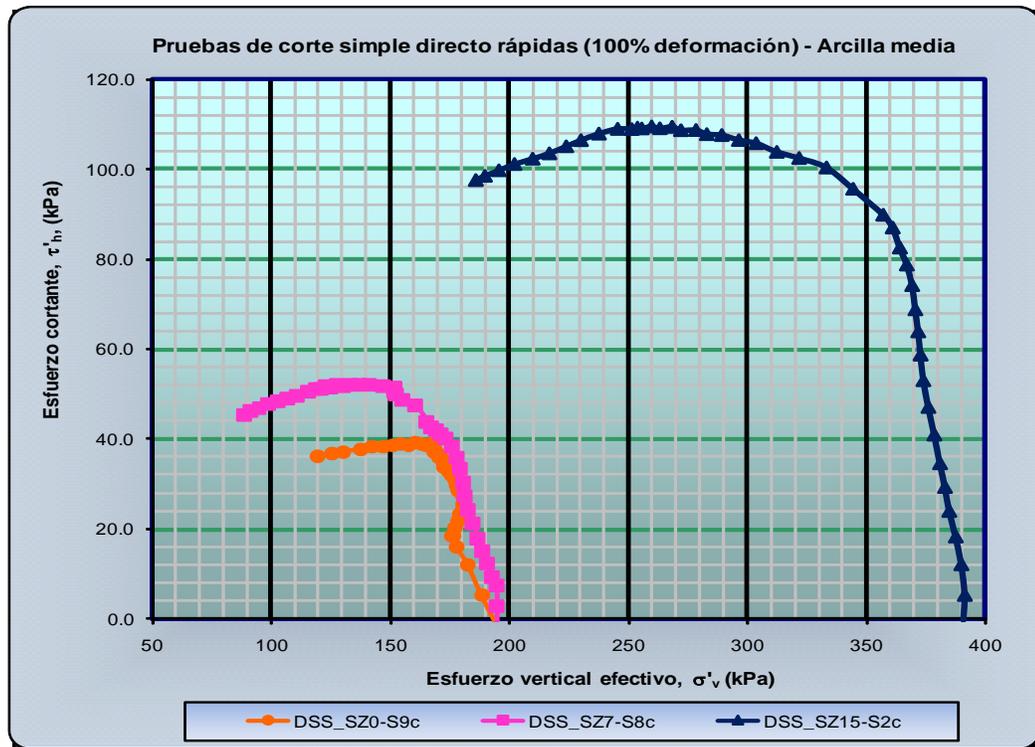


Figura C.52. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

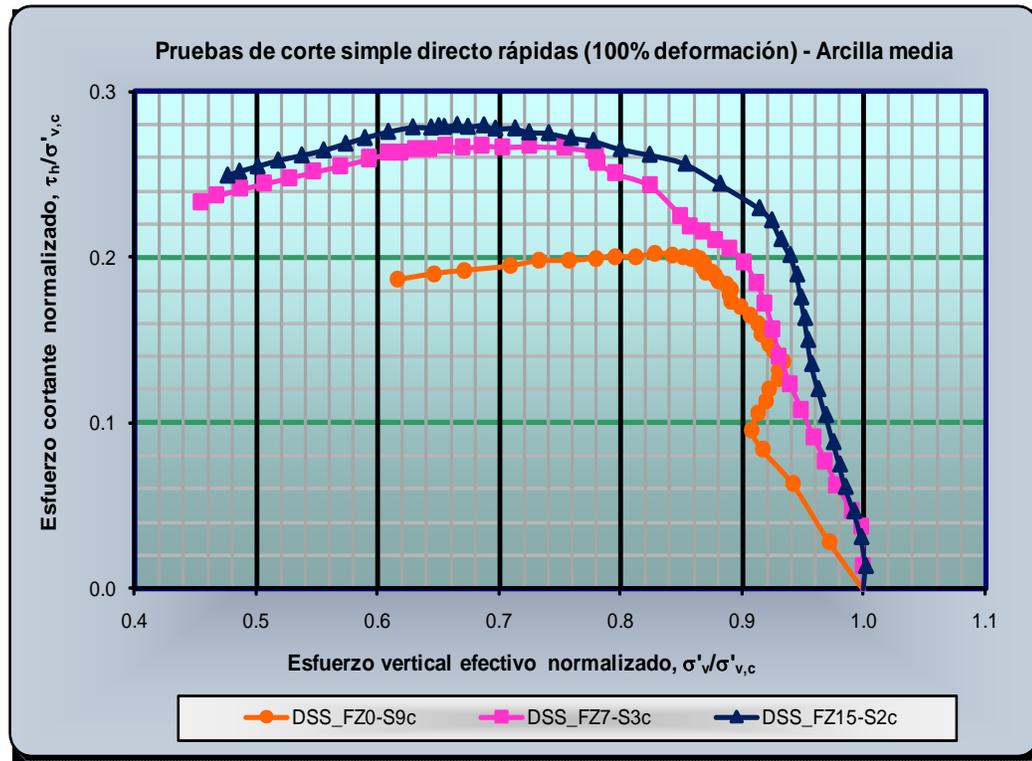


Figura C.53. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.

En los resultados a la falla presentados en la Tabla C.15a se observa que la menor y mayor presión de poro corresponden a la arcilla sin y con gas al 15 por ciento, mas sin embargo, en los datos presentados en la Figura C.54 se observa que la presión de poro es mayor en la arcilla con gas (después de 1.5 y 2.5 minutos para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente) que la de la arcilla sin gas metano. En la Figura C.54 se observa que la arcilla con gas al 15 por ciento es menor, prácticamente, durante todo el ensaye, pero debido a una liberación de presiones en la arcilla con gas al 7 por ciento, se vuelve mayor durante dos minutos aproximadamente. En la Figura C.54 también se observa que hasta aproximadamente 10 minutos la presión de poro en la arcilla sin gas no crece significativamente, mientras que la correspondiente a la arcilla con gas metano crece rápidamente, esto indica que las láminas de arcilla confinan al gas metano y, por lo tanto, se genera un crecimiento casi inmediato en la presión de poro.

En la Tabla C.15a se observa que el menor y mayor módulo secante al corte obtenido a la falla corresponden a la arcilla sin y con gas metano al 15 por ciento, respectivamente, mientras que en la Figura C.55 se observa que el módulo secante al corte normalizado es mayor en la arcilla con gas después del dos (2) por ciento de deformación al corte y hasta el final del ensaye, la diferencia entre la arcilla sin y con gas metano se reduce después del 15 por ciento de deformación al corte.

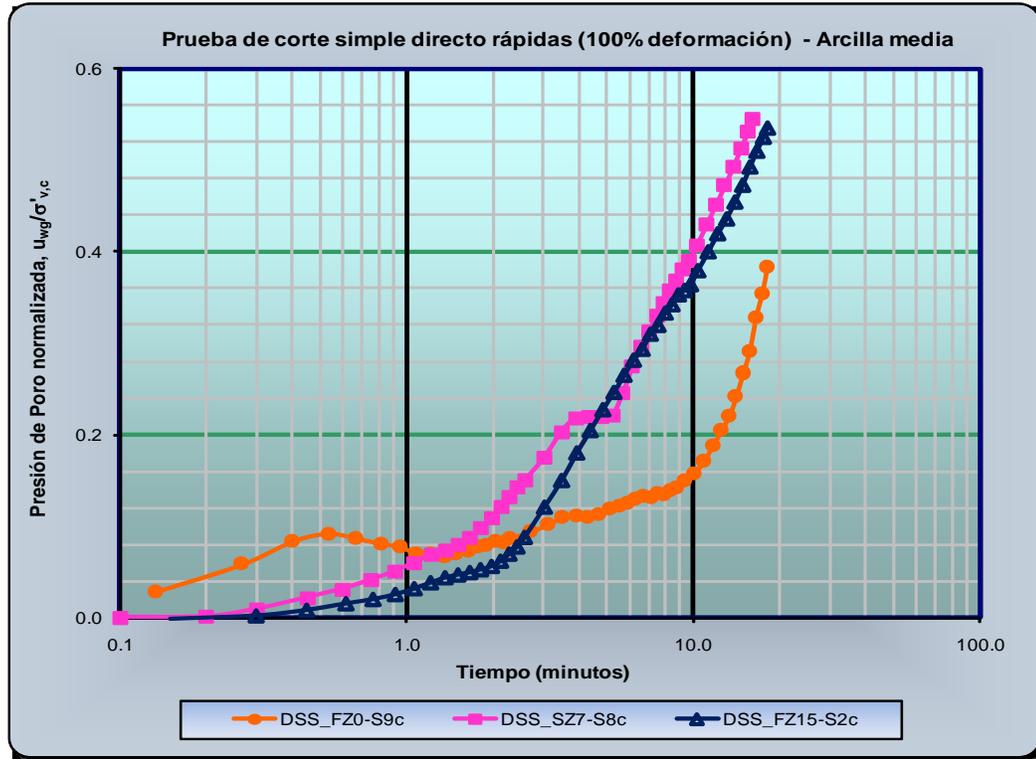


Figura C.54. Presión de poro normalizada de la arcilla media sin y con gas metano.

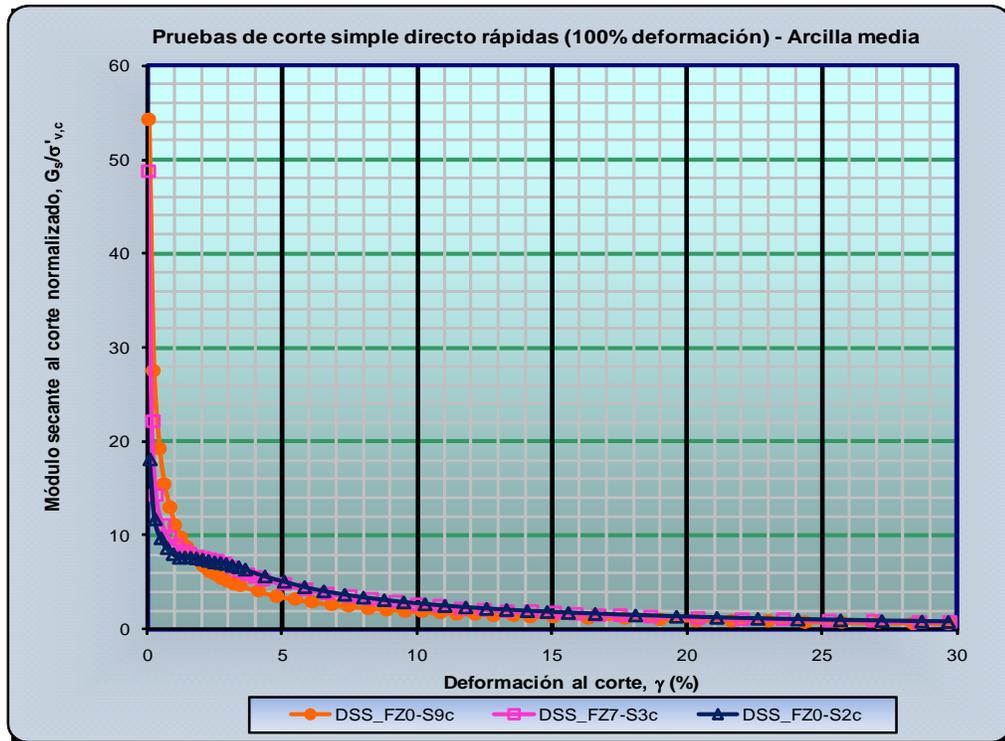


Figura C.55 Módulo secante al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

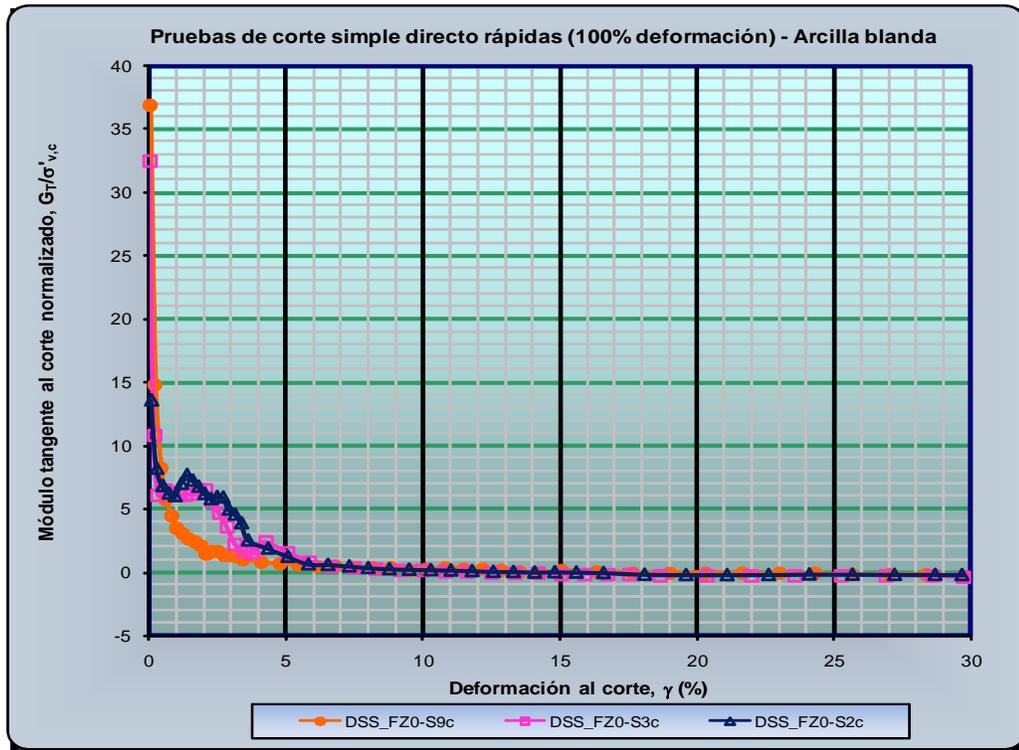


Figura C.56a. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

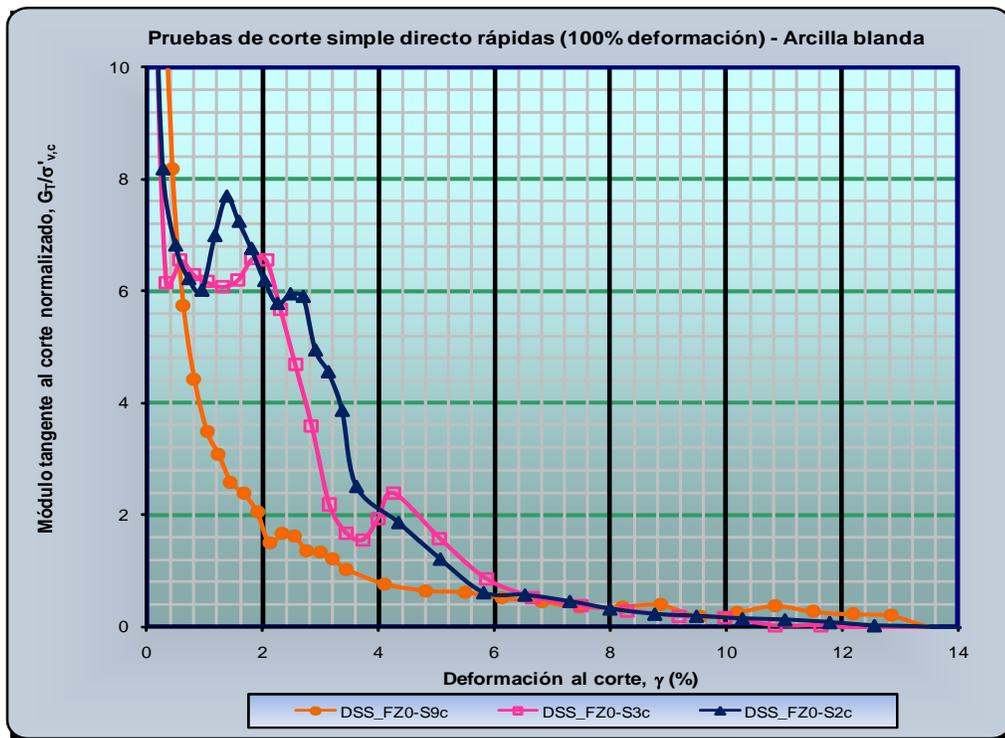


Figura C.56b. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.



En la Tabla C.15 se observa que el mayor y menor módulo tangente obtenido a la falla corresponde a la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, mientras que en la Figura C.56a se observa que los datos normalizados son mayores en la arcilla con gas metano desde 0.5 hasta 5 por ciento de deformación al corte, siendo menores antes y después de ese intervalo. Durante el ese intervalo de deformación al corte se observa que en la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento se presentan tres y dos incrementos en el módulo tangente normalizado, respectivamente, que forman concavidades en las curvas, Figura 56b, siendo la mayor concavidad la que se presenta en la arcilla con gas al 15 por ciento. Este comportamiento se asocia a que la estructura de la arcilla con gas opone cierta resistencia, generando un incremento en el módulo tangente normalizado durante el desarrollo de las concavidades.

En la Tabla C.15 se observa que la menor y mayor relación de esfuerzos, ángulo ϕ'_{DSS} , a la falla corresponden a la arcilla sin y con gas al 15 por ciento, pero generando diferente pendiente en las curvas presentadas en la Figura C.57, mientras que en el gráfico con los datos del esfuerzo cortante normalizado presentados en la Figura C.58 se observa que tanto la arcilla sin gas como ambas muestras de arcilla con gas metano generan, prácticamente, la misma pendiente,

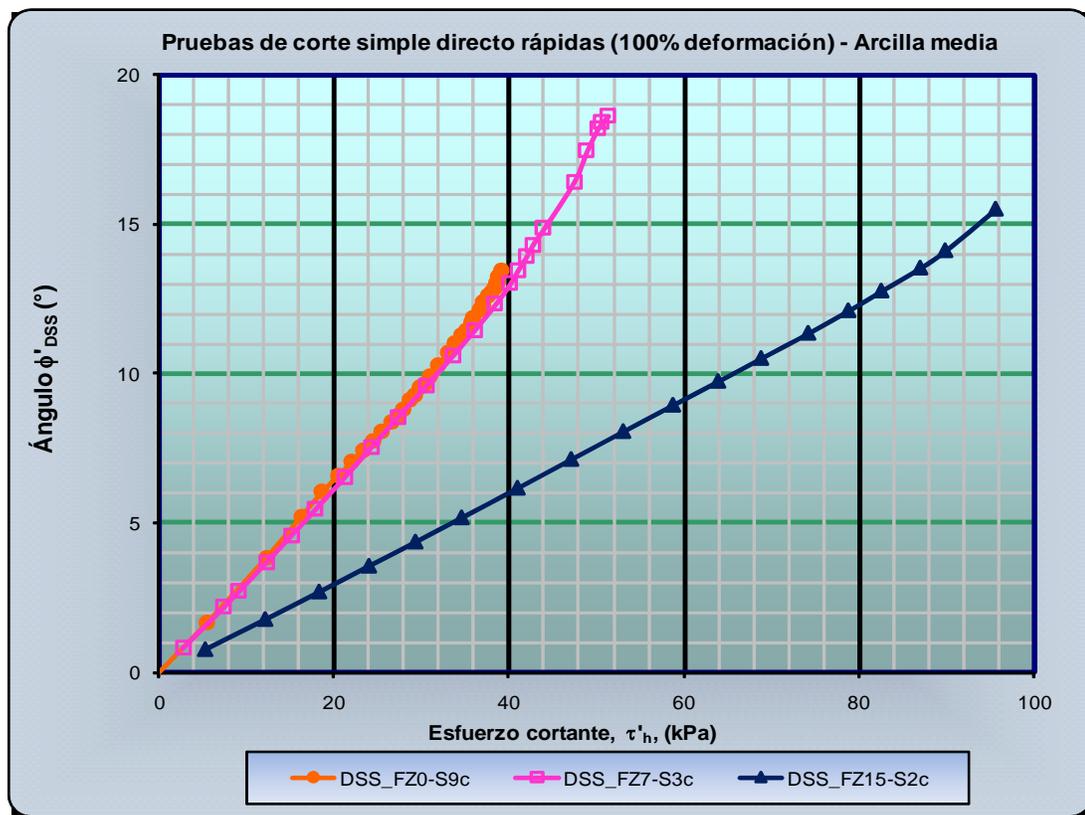


Figura C.57. Ángulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano.

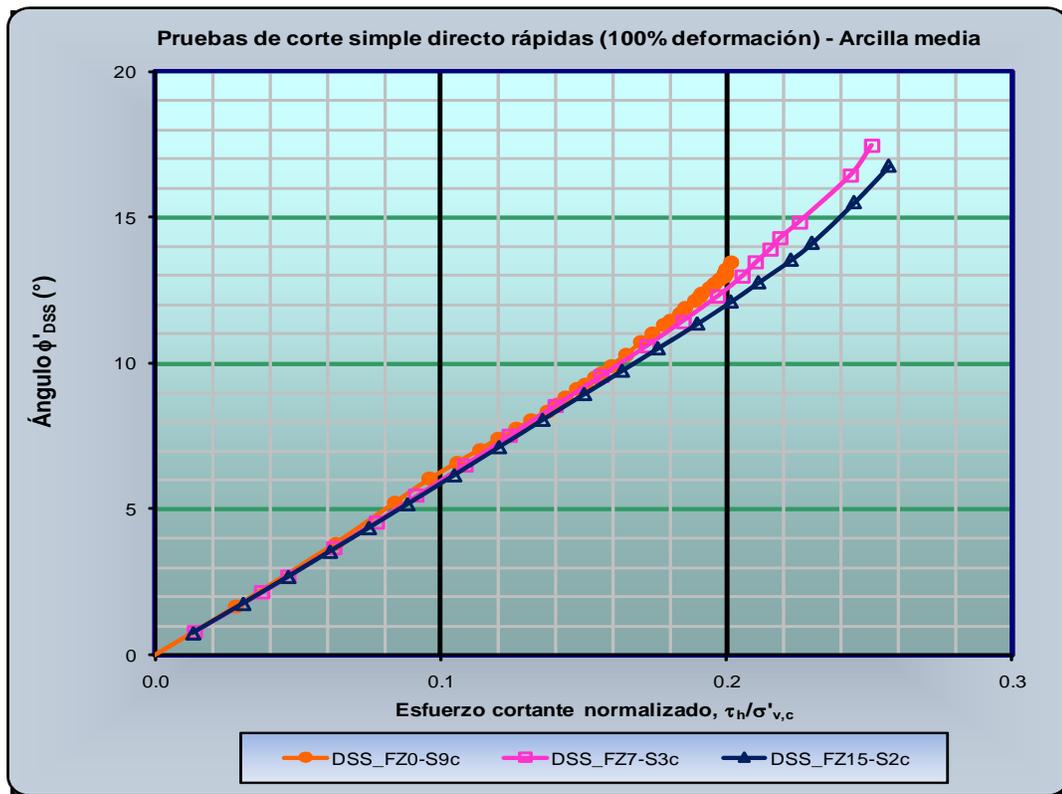


Figura C.58. Ángulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano.

En la Tabla C.16 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas índice realizadas en las muestras de arcilla media sin y con gas metano.

Tabla C.16. Resultados de las pruebas índice de la arcilla media sin y con gas metano (Pruebas rápidas de DSS a 100 por ciento de deformación por hora).

Propiedades índice								
Número de muestra	Gs	S _o (%)	ω _o (%)	Peso Volumétrico (kN/m ³)		Límites de Atterberg (%)		
				Total	Seco	LL	LP	IP
DSS_SZ0-S9c	---	99.5	57	16.45	10.51	79	23	56
DSS_SZ7-S3c	2.641	92.0	78	14.23	8.01	84	24	60
DSS_SZ15-S2c	---	94.6	55	15.72	10.13	77	24	53

En la Tabla C.16 se observa que el grado de saturación es ligeramente mayor para la arcilla con gas al 15 por ciento que para la arcilla con gas al 7 por ciento. En cuanto al peso volumétrico total y seco se observa que el mayor y menor corresponden a la arcilla sin y con gas al



7 por ciento. La diferencia obtenida en el peso volumétrico total equivale aproximadamente al 13 y 4 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, mientras que la diferencia obtenida por la arcilla con gas al 7 por ciento es del 10 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento. En cuanto a la diferencia obtenida en el peso volumétrico seco equivale aproximadamente al 24 y 4 por ciento para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, mientras que la diferencia obtenida por la arcilla con gas al 7 por ciento es de 21 por ciento aproximadamente, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.

C.3.2.3. Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora

En la Tabla C-17 se presentan los resultados a la falla correspondientes a la arcilla media sin y con gas metano, obtenidos de las pruebas rápidas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora, también se incluyen los resultados normalizados de consolidación.

Tabla C.17. Resultados de la prueba de DSS de la arcilla media sin y con gas metano. Pruebas estáticas de corte simple directo a 1 000 por ciento de deformación por hora.

Características esfuerzo-deformación			
Parámetro	Número de Muestra		
	DSS_FZ0-S9d	DSS_FZ7-S3d	DSS_FZ15-S2e
Esfuerzo cortante, τ_h , (kPa)	68.37	54.78	113.52
Deformación al corte, γ , (%)	15.90	9.89	8.96
Presión de poro (u_{wg}), (kPa)	21.40	40.22	76.23
Consolidación			
$\sigma'_{v,c}$	193.24	194.92	382.75
$\varepsilon'_{v,c}$	10.65	25.89	18.60
Esfuerzo vertical σ'_v , (kPa)	171.79	154.70	306.53
Módulos			
Secante, G_S , (kPa)	429.87	552.25	1 266.05
Tangente, G_T , (kPa)	3.93	14.51	40.55
Relación de esfuerzos, ϕ'_{DSS} , (%)	21.70	19.50	20.32
Resultados normalizados			
Esfuerzo cortante, $\tau_h/\sigma'_{v,c}$, ($c_u/\sigma'_{v,c}$)	0.354	0.281	0.297
Esfuerzo vertical, $\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.889	0.794	0.801
Decremento, $\Delta\sigma'_v/\sigma'_{v,c}$	0.111	0.206	0.199
Relación de esfuerzo, τ_h/σ'_v	0.398	0.354	0.370

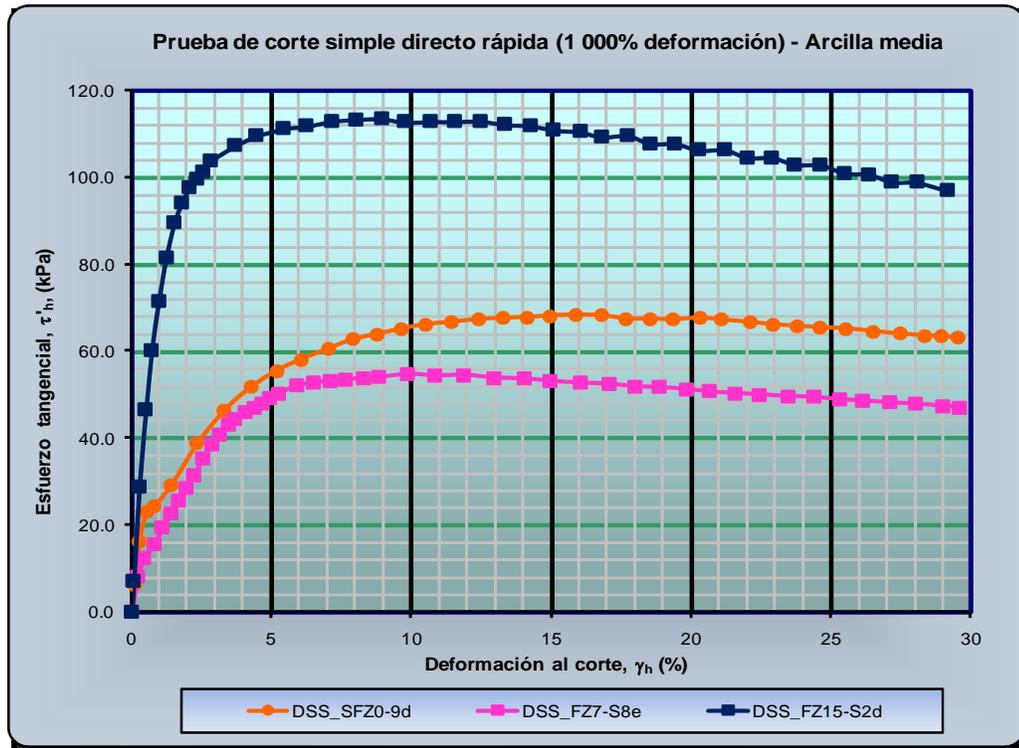


Figura C.59. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

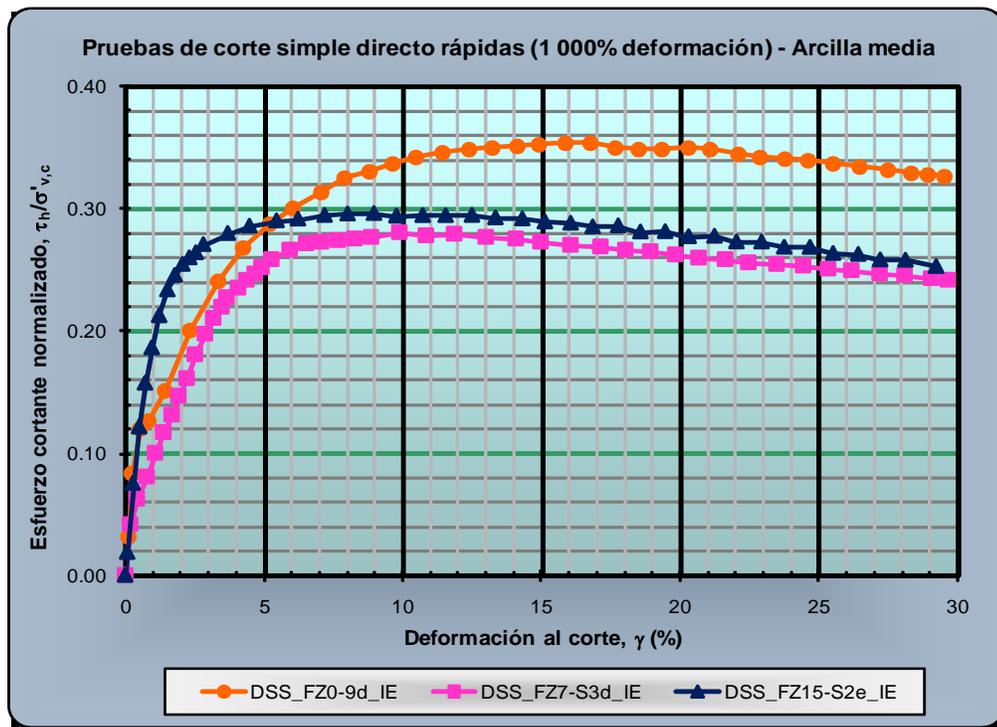


Figura C.60. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.



En la Tabla C.17 y Figura C.59 se observa que el esfuerzo cortante es menor y mayor en la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento respectivamente, mas sin embargo, en la Figura Figura C.60 se observa que el esfuerzo cortante normalizado disminuye en ambas muestras de arcilla con gas, presentándose la mayor disminución en la arcilla con gas al 7 por ciento, este comportamiento indica que el gas se ha sobrepresionado y actúa en contra de las fuerzas de corte inducidas a la arcilla, similar a un «amortiguador», incrementándose la rigidez de la estructura a mayor contenido de gas.

En la Figura C.61 se observa que el decremento del esfuerzo vertical normalizado es mayor e igual en ambas arcilla con gas que en la arcilla sin gas, hasta aproximadamente el 21 por ciento de deformación al corte, donde se incrementa el decremento del esfuerzo vertical en la arcilla con gas al 15 por ciento. En la curva de la arcilla con gas al 7 por ciento, Figura C.61 se observa que durante el intervalo de seis (6) a nueve (9) por ciento de deformación al corte el decremento del esfuerzo vertical normalizado de mantiene constante, mientras se deforma la muestra de arcilla, este comportamiento se asocia a que se genera un reacomodo de las burbujas de gas dentro de la arcilla debido, posiblemente, a una liberación de presión y, por lo tanto, una redistribución de los esfuerzos internos.

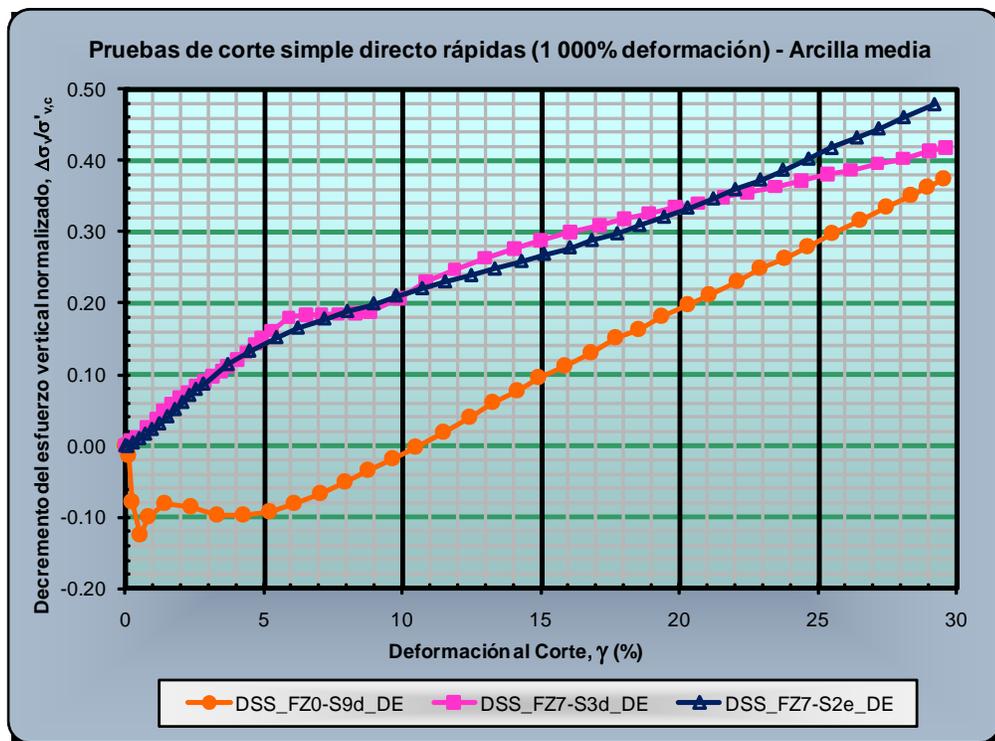


Figura C.61. Decremento de esfuerzo vertical normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

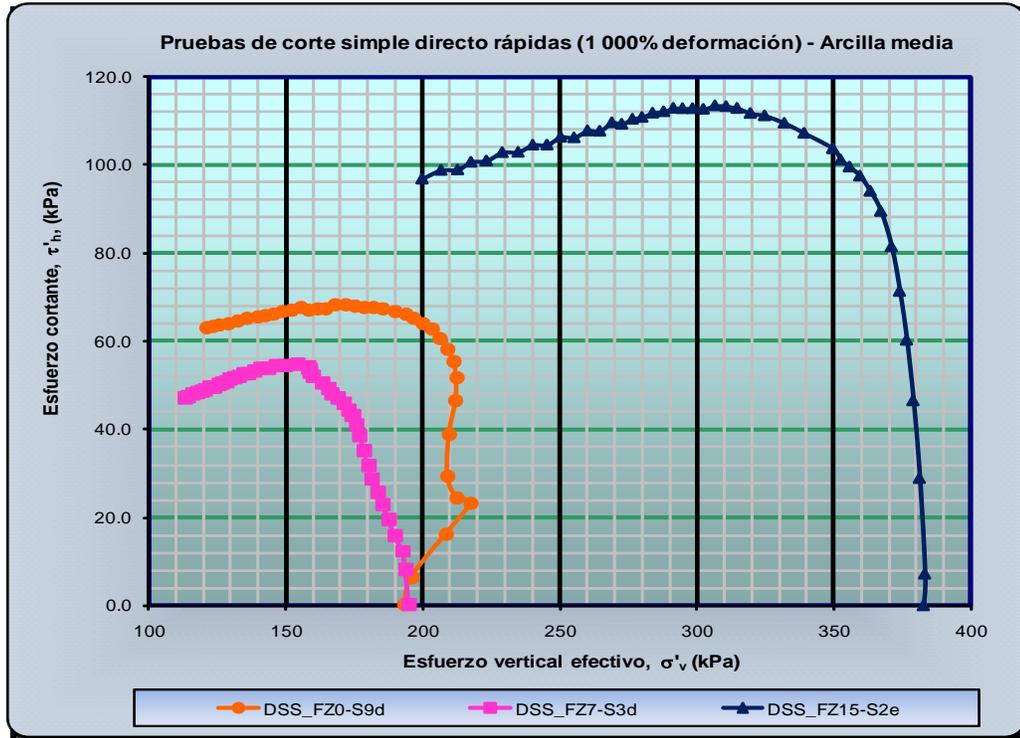


Figura C.62. Esfuerzo cortante de la arcilla blanda sin y con gas metano.

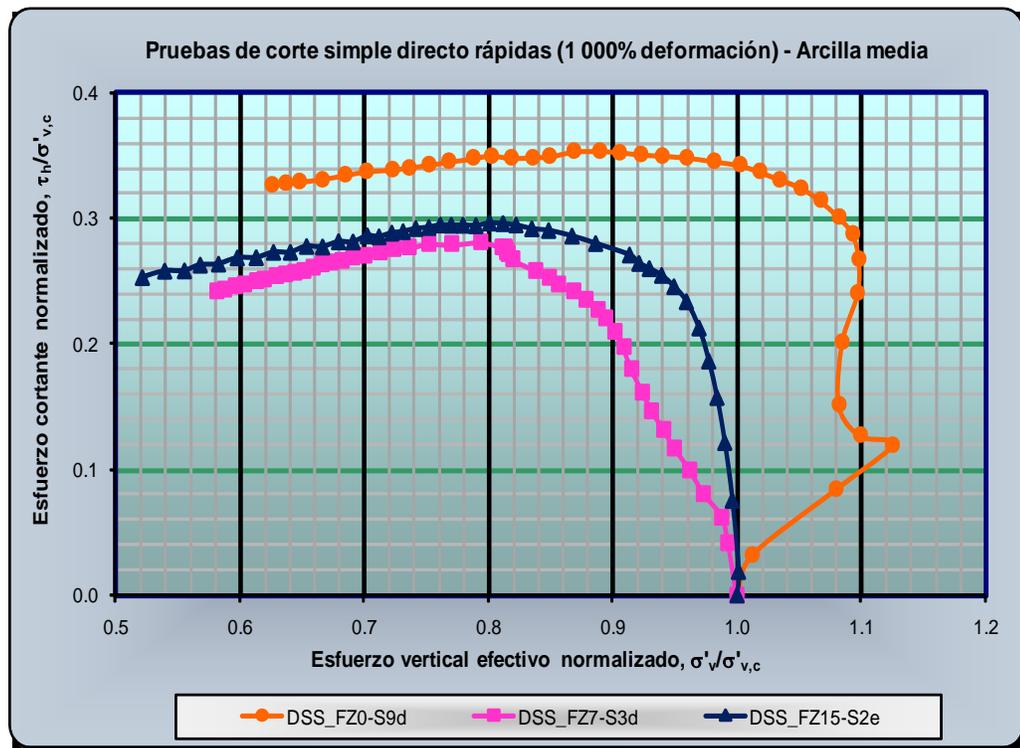


Figura C.63. Esfuerzo cortante normalizado de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En la Figura C.62 se presentan gráficamente los resultados del esfuerzo cortante versus el esfuerzo vertical y, aparentemente, se observa que existe un incremento de ambos esfuerzos en la arcilla con gas al 15 por ciento y una disminución en la arcilla con gas al 7 por ciento, mas sin embargo, en los datos presentados en la Figura C.63 se observa que el esfuerzo cortante normalizado es menor en ambas arcillas con gas, que el obtenido para la arcilla sin gas, pero ligeramente menor para la arcilla con gas al 7 por ciento; este comportamiento se atribuye a que la estructura de la arcilla-gas incrementa su rigidez cuando contienen el 15 por ciento de gas metano.

En la Tabla C.17 se observa que la menor y mayor presión de poro a la falla corresponden a la arcilla sin y con gas al 15 por ciento, mas sin embargo, en los datos normalizados, Figura C.64, se observa que la presión de poro normalizada desarrollada por ambas muestras de arcilla con gas metano es, prácticamente, igual y ambas mayores que la desarrollada por la arcilla sin gas, aunque la presión de poro normalizada de la arcilla con gas al 15 por ciento es ligeramente menor que la de la arcilla con gas al 7 por ciento, hasta 1.3 minutos aproximadamente, que es cuando la presión de poro desarrollada por la arcilla con gas al 15 por ciento se incrementa ligeramente.

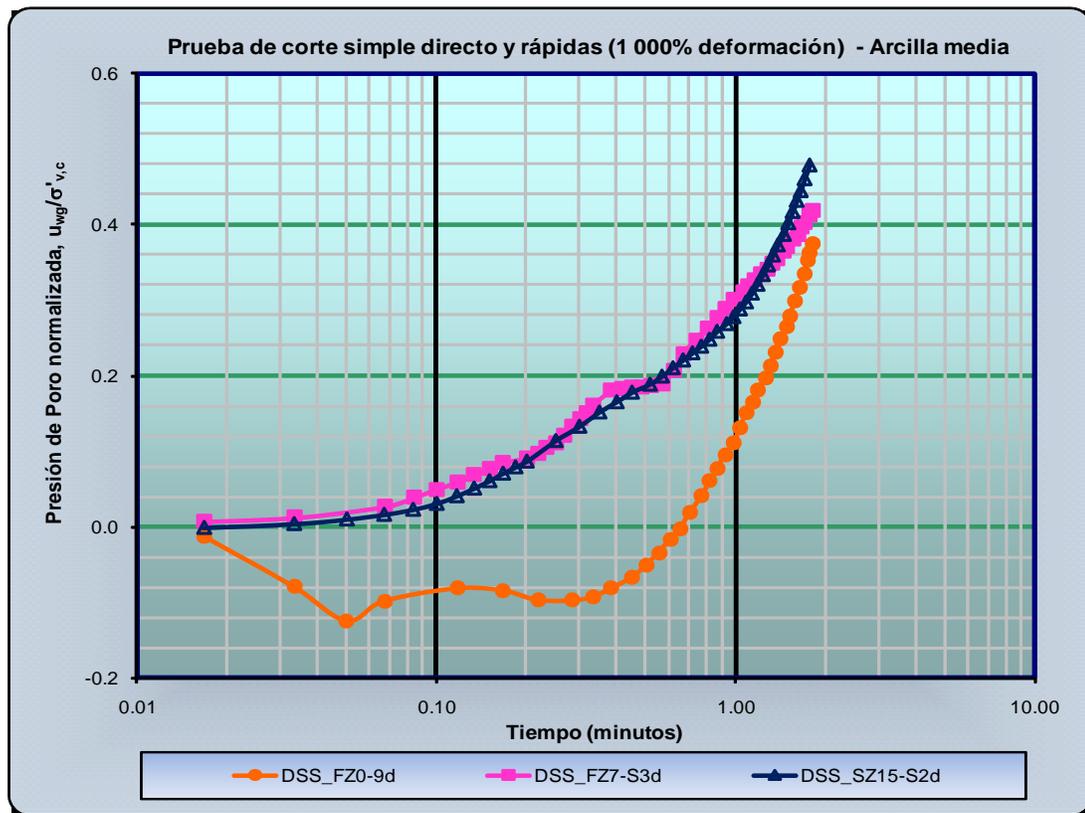


Figura C.64. Presión de poro normalizada de la arcilla blanda sin y con gas metano.



En la curva de la arcilla con gas al 7 por ciento presentada en la Figura C.64 se observa que se desarrolla una parte cóncava, que se asocia a una zona de alta presión, antecedida y seguida de una convexa, que se asocian a una liberación de presión. Este comportamiento se asocia a que se sobrepasa la resistencia soportada por la estructura de la arcilla-gas, mientras que en la arcilla con gas al 15 por ciento, se presenta un comportamiento «normal», es decir, no se generan concavidades o convexidades durante el ensaye, indicando que soporta mayores esfuerzos cortantes, además de que se generan altas presiones de poro en la arcilla durante la falla, debido a la presencia de gas metano.

En la Tabla C.17 se observa que el módulo secante a la falla es menor y mayor corresponden a la arcilla sin y con gas metano al 15 por ciento, mientras que en la Figura C.65 se observa que el módulo secante normalizado de la arcilla con gas al 7 por ciento es menor durante todo el ensaye, mientras que el de la arcilla con gas al 15 por ciento es mayor que las otras dos muestras de arcilla hasta el 5 por ciento de deformación al corte que es cuando se vuelve menor que la arcilla sin gas. La diferencia entre la arcilla con gas metano empieza a reducirse a partir del 9 por ciento de deformación al corte.

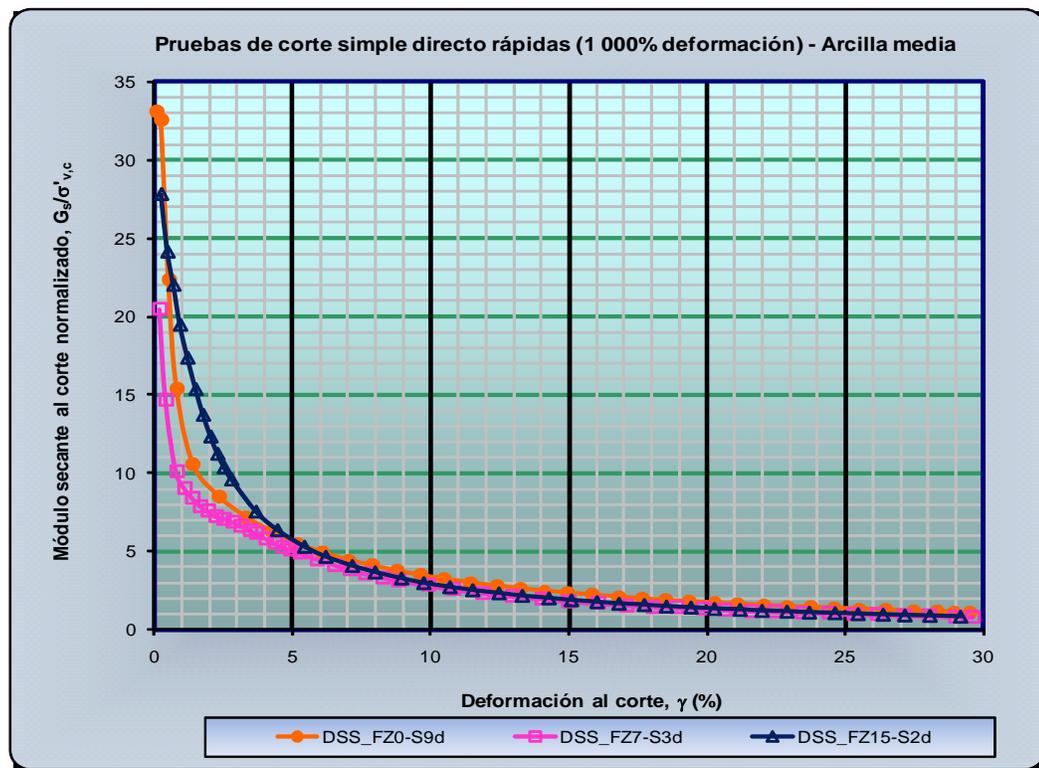


Figura C.65. Módulo secante al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.



En la Tabla C.17 se observa que el menor y mayor módulo tangente obtenido a la falla corresponden a la arcilla sin y con gas metano al 15 por ciento, mientras que, en los datos presentados en la Figura C.66a se observa que el módulo tangente normalizado es mayor en la arcilla con gas metano hasta 1.5 por ciento de deformación al corte, que es cuando se vuelve menor que las otras dos muestras de arcilla, mientras que el módulo tangente normalizado de la arcilla con gas al 7 por ciento es mayor desde 1.5 hasta 10 por ciento de deformación al corte que el de la arcilla con gas al 15 por ciento, Figura C.66b; posteriormente se comporta erráticamente con los de la arcilla con gas al 15 por ciento. En las curvas de la arcilla con gas metano se observan concavidades, principalmente, en la arcilla con gas al 7 por ciento, indicando zonas de alta presión. Este comportamiento se asocia a que la estructura de la arcilla con gas opone cierta resistencia, incrementando el valor del módulo tangente normalizado. Debido a que el gas se ha sobrepresionada por el confinamiento de las láminas de arcilla.

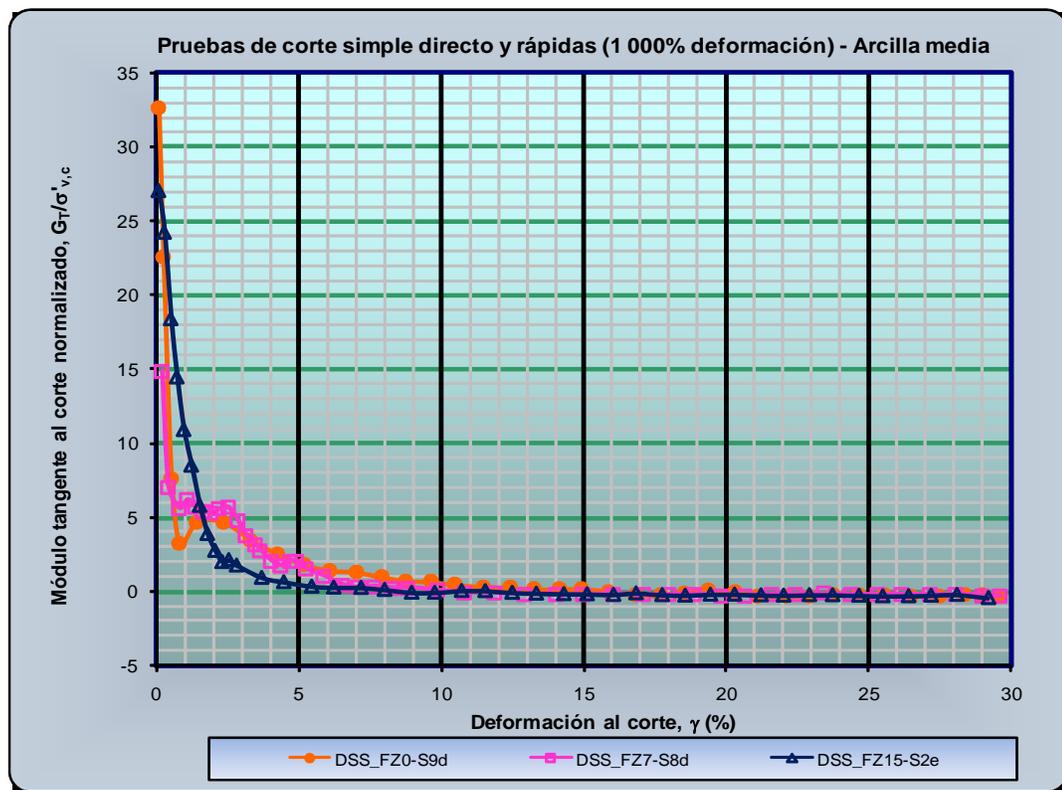


Figura C.66a. Módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas metano.

En la Tabla C. 17 se observa que el mayor y menor relación de esfuerzos, ángulo ϕ_{DSS} , obtenidos a la falla corresponden a la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, mas sin embargo, en la Figura C.67 se observa que la menor y mayor pendiente en las curvas corresponde a la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, aunque la variación entre las tres muestras es pequeña.

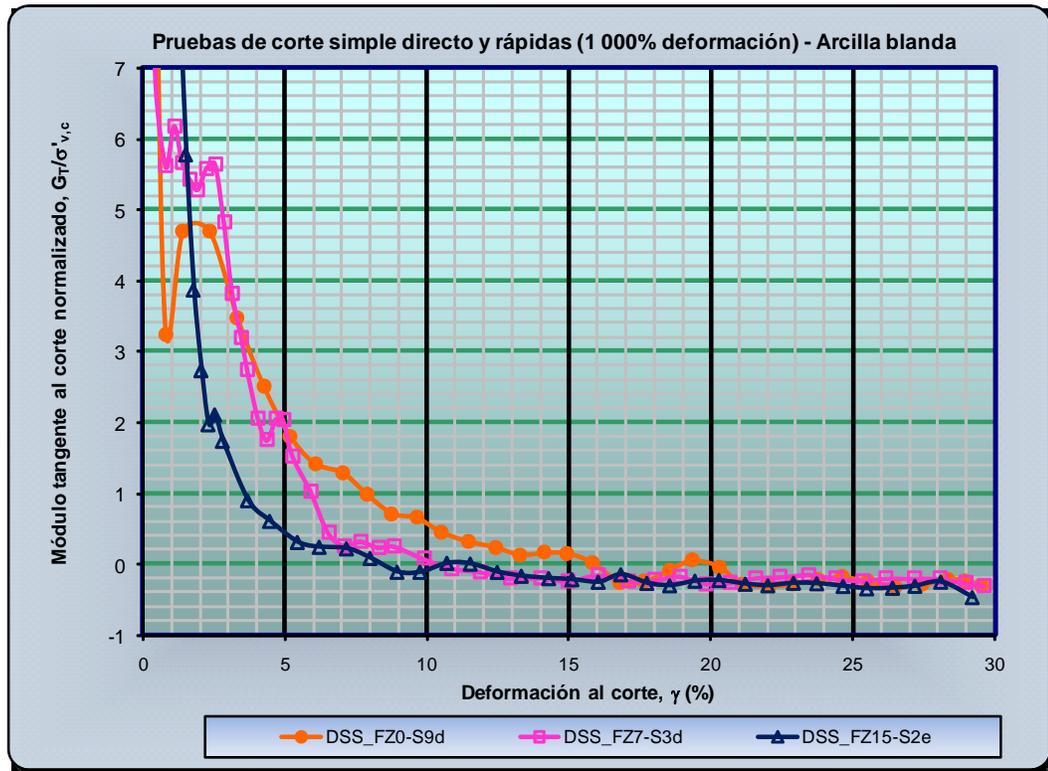


Figura C.66b. Detalle del módulo tangente al corte normalizado de la arcilla media sin y con gas.

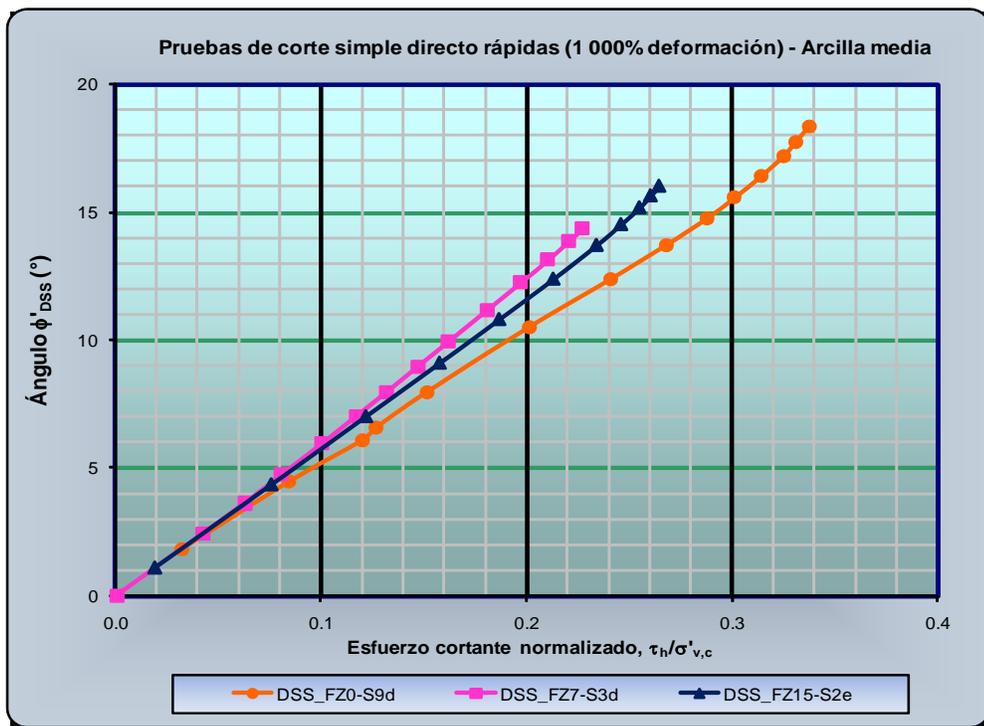


Figura C.67. Ángulo ϕ de la arcilla media sin y con gas metano.



En la Tabla C.18 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas índice realizadas en las muestras de arcilla blanda sin y con gas metano y se observa que el grado de saturación es mayor para la arcilla con gas al 7 por ciento que la arcilla con gas al 15 por ciento.

Tabla C.18. Resultados de las pruebas índice de la arcilla media sin y con gas metano. (Pruebas rápidas de DSS a 1 000 por ciento de deformación por hora).

Propiedades índice							
Número de muestra	S _o (%)	ω _o (%)	Peso volumétrico (kN/m ³)		Límites de Atterberg (%)		
			Total	Seco	LL	LP	IP
DSS_FZ0-S9d	99.6	55	16.59	10.71	79	24	55
DSS_FZ7-S3d	89.1	78	13.92	7.84	---	---	---
DSS_FZ15-S2e	83.1	53	14.69	9.60	81	28	53

En cuanto al peso volumétrico total y seco se observa que el mayor y menor corresponden a la arcilla sin y con gas al 7 por ciento, la diferencia obtenida en el peso volumétrico total es del 16 y para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, mientras que la diferencia obtenida en la arcilla con gas al 7 por ciento es del 5 por ciento, con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento. En cuanto al peso volumétrico seco la diferencia obtenida es del 27 y 10 por ciento aproximadamente para la arcilla con gas al 7 y 15 por ciento, respectivamente, con respecto a la arcilla sin gas, mientras que la diferencia obtenida por la arcilla con gas al 7 por ciento es del 18 por ciento con respecto a la arcilla con gas al 15 por ciento.