

ÍNDICE TEMÁTICO

	Página
1. TÍTULO Y AUTOR	1
2. RESUMEN	3
3. RESUM	7
4. ABSTRACT	11
5. INTRODUCCION	15
El riego y sus posibles consecuencias	15
6. ANTECEDENTES	19
6.1. Importancia de las propiedades mecánicas de los suelos.	19
6.2. Efecto de la sodicidad sobre las propiedades físicas de los suelos.	23
6.3. Efecto de los ciclos de humectación – desecación sobre las propiedades físicas de los suelos.	34
6.4. Algunos antecedentes de la mecánica del suelo agrícola.	37
6.5. Teoría del Estado Crítico.	42
6.6. Ley de Coulomb-Mohr	54
6.7. Métodos e instrumentos de medición de las propiedades mecánicas de los suelos.	56
7. OBJETIVOS	63
8. HIPÓTESIS	65
9. MATERIALES Y MÉTODOS	67
9.1. Suelos	67
9.1.1. Suelos utilizados en las pruebas de compresión y corte y resistencia a rotura de agregados individuales.	67
9.1.2. Procedimiento utilizado en la sodificación de los suelos.	72
9.1.3. Suelo utilizado en el <i>Brazilian Test</i> .	74
9.2. Pruebas preliminares.	76
9.2.1. Pruebas de estabilidad de agregados en agua.	76
9.2.2. Pruebas de expansión – contracción.	77
9.3. Pruebas de resistencia a rotura de agregados individuales.	78
9.4. Pruebas de resistencia a rotura mediante Brazilian Test.	82

9.5. Ensayos de Compresión y Corte.	86
9.5.1. Ensayos con material sometido a ciclo humectación – desección.	88
9.5.2. Ensayos con material no sometido a ciclos humectación – desección (material indisturbado).	94
9.5.3. Descripción de la Caja de Corte.	95
9.5.4. Adquisición y registro de las señales.	100
9.5.5. Cálculo de la Presión de Preconsolidación y obtención de la Línea Virgen (LV).	103
9.5.6. Cálculo de la Línea de Estado Crítico.	104
9.6. Tratamiento estadístico de los resultados.	107
10. RESULTADOS	110
10.1. Consideraciones previas.	110
10.2. Pruebas preliminares.	111
10.2.1. Pruebas de Estabilidad de Agregados en Agua.	111
10.2.2. Prueba de expansión – contracción.	114
10.3. Pruebas de resistencia a rotura de agregados individuales.	116
10.4. Pruebas de resistencia a rotura mediante Brazilian Test.	121
10.5. Pruebas de Compresión y Corte.	126
10.5.1. Curvas de Compresión.	126
10.5.2. Tensión de Preconsolidación (Pc).	138
10.5.3. Líneas Virgen.	141
10.5.4. Tensión de Corte y parámetros de Coulomb.	158
10.5.5. Líneas de Estado Crítico	175
10.6. Consideraciones Finales.	198
11. CONCLUSIONES	203
12. BIBLIOGRAFÍA	205

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Clasificación Taxonómica y origen de ambos suelos (Soil Taxonomy, 1994).	68
Tabla 2: Composición y características químicas de los suelos evaluados.	69
Tabla 3: Mineralogía de las arcillas	70
Tabla 4: Fracciones granulométricas de Cardone y Ozzano según USDA e ISSS.	71
Tabla 5: Clasificación Textural de ambos suelos.	72
Tabla 6: pH, CE, RAS y PSI de los suelos tratados	73
Tabla 7: Fracciones granulométricas de Cadriano según USDA.	74
Tabla 8: Composición y características químicas de Cadriano.	75
Tabla 9: RAS y PSI para ambos tratamientos de Cadriano (COA y COB).	76
Tabla 10: Composición Granulométrica Porcentual de los tratamientos COA y COB.	83
Tabla 11: Humedad, altura y diámetro de la muestra en cada momento de medición y por tratamiento.	114
Tabla 12: Variación de la densidad en cada momento de medición y por tratamiento.	115
Tabla 13: Variación porcentual de volumen de las muestras respecto al volumen inicial.	116
Tabla 14: Comparación de Tensión de Rotura “Y” (kPa) entre clases de agregados individuales sometidos a tracción para ambos tratamientos (A y B).	119
Tabla 15: Comparación entre tratamientos A vs. B de Tensión de Rotura “Y” (kPa) de agregados individuales de las clases I, II y III.	120

Tabla 16: Resultados de las pruebas de Brazilian Test.	125
Tabla 17: Volumen Específico Inicial y Final de los tratamientos del suelo Cardone.	126
Tabla 18: Comparación del Volumen Específico Inicial y Final de OZA vs. OZB al 15% de H° y para ambas clases de agregados ensayadas (II y III).	130
Tabla 19: Comparación de Volumen Específico Inicial y Final de Clase II vs. III para ambos tratamientos de Ozzano al 15% de humedad.	130
Tabla 20: Comparación de Vol. Esp. Inicial y Final entre Clases granulométricas (I a IV) para ambos tratamientos de Ozzano al 5% de humedad.	130
Tabla 21: Comparación de Volumen Específico Inicial y Final entre tratamientos A vs. B para todas las Clases de agregados de Ozzano al 5% de humedad.	134
Tabla 22: Comparación del parámetro PC entre tratamientos A vs. B para ambos suelos ensayados (CD y OZ).	140
Tabla 23: Comparación de pendientes de Línea Virgen (λ) y término independiente (N) entre A y B para todos los tratamientos.	149
Tabla 24: Comparación de pendientes de LV entre todas las clases granulométricas (I a IV) para ambos tratamientos (A y B) de OZ al 5% de humedad.	152
Tabla 25: Comparación de Términos Independientes de la ecuación de LV entre todas las clases granulométricas (I a IV) para ambos tratamientos de OZ al 5% de humedad.	153
Tabla 26: Comparación de pendientes de LV entre las clases II vs. III para ambos tratamientos (A y B) de OZ al 15% de humedad.	153
Tabla 27: Comparación de Términos Independientes de LV entre las clases II vs. III para ambos tratamientos de OZ al 15% de humedad.	154
Tabla 28: Humedad al corte promedio por tratamiento (%p/p)	165
Tabla 29: Comparación de A vs. B de las Tensiones de Corte (kPa) a diferentes Tensiones Normales ensayadas (kPa), Cohesión (kPa) y	166

Angulo de Rozamiento Interno ($tg\phi$) para todos los tratamientos de ambos suelos.

Tabla 30: Comparación entre Clases Granulométricas de las Tensiones de Corte (kPa) a diferentes Tensiones Normales ensayadas (kPa), Cohesión (kPa) y Angulo de Rozamiento Interno ($tg\phi$) para los tratamientos OZ 5% y OZ 15% de humedad.	168
Tabla 31: Comparación de A vs. B de la ordenada al origen y pendientes de las rectas de Relación Volumétrica al corte para CD y OZ en todos sus tratamientos.	182
Tabla 32: Tensión Normal (TN)(kPa) a la que se alcanza el Estado Crítico para ambos suelos (CD y OZ) y todos sus tratamientos.	183
Tabla 33: Términos independientes de la Línea Virgen (N), Línea de Estado Crítico (Γ) para todos los tratamientos de ambos suelos (CD y OZ).	189
Tabla 34: Diferencia entre términos independientes de LV y LEC (N – Γ) para todos los tratamientos de ambos suelos (CD y OZ).	190

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: fronteras de Estado en el espacio p - q -v.	46
Figura 2: Dominio Subcrítico y Supercrítico en el espacio p – v.	47
Figura 3: Curva de Compresión donde se ubica la Línea Virgen y Pc.	48
Figura 4: Expansión: Un suelo representado por el punto “c” ubicado en la región súper crítica alcanza la Línea de Estado Crítico “d” presentando un aumento de su volumen específico. En un gráfico p-q-	52

v (izquierda) y en un gráfico $v - \ln(p)$ (derecha)

Figura 5: Contracción: Un suelo representado por el punto “a” ubicado en la región sub crítica alcanza la Línea de Estado Crítico “b” presentando una disminución de su volumen específico. En un gráfico p-q-v (izquierda) y en un gráfico $v - \ln(p)$ (derecha)	53
Figura 6: Recta de Coulomb	55
Figura 7: Diagrama de esfuerzo de corte-deformación en tres condiciones: A: cementado, B: Suelto, C: Denso	61
Figura 8: Determinación de la resistencia a la tracción de un agregado.	80
Figura 9: Motor y sistema de empuje del plato inferior	80
Figura 10: Platos utilizados para determinar la resistencia a la tracción	81
Figura 11: Vista general de la máquina utilizada para la determinación de la resistencia a tracción de agregados individuales.	81
Figura 12: Cilindro listo para ser sometido a Brazilian Test.	85
Figura 13: Cilindro colocado en la máquina (izquierda) y cilindro comprimido exhibiendo rotura (derecha).	85
Figura 14: Molino utilizado en la molienda de los suelos (vista lateral).	87
Figura 15: Molino utilizado en la molienda de los suelos (vista de planta).	87
Figura 16: Tamizado del suelo.	88
Figura 17: Torta de donde eran extraídas las probetas	90
Figura 18: Extracción de las probetas con la utilización del cilindro de bronce	91
Figura 19: Introducción de la probeta en la caja de corte.	93
Figura 20: Muestra extraída de la caja una vez terminado el corte.	94
Figura 21: Sección en planta de la caja de corte (arriba) y vertical (abajo).	97
Figura 22: Sección vertical de la caja de corte.	98
Figura 23: Vista general de la Caja de Corte Directo construida en el DIAF.	98
Figura 24: Motor eléctrico “paso a paso”, reductor y eje telescópico de	99

movimiento horizontal encargado de dar el movimiento de traslación a la parte inferior de la caja de corte.

Figura 25: Caja de corte, se observa la parte inferior móvil, la parte superior unida a una celda de carga y tornillo unido al brazo de palanca.	99
Figura 26: Caja de Corte, se observa el transductor de movimiento vertical utilizado durante la compresión uniaxial, transductor de movimiento horizontal y celda de carga encargada de medir la fuerza de corte.	100
Figura 27: Colector de Datos Gould TA11 y ordenador portátil utilizados en la adquisición y almacenamiento de las señales	102
Figura 28: Obtención gráfica de la tensión de preconsolidación (Pc).	104
Figura 29: Regresión Log Tensión Normal – Relación volumétrica para hallar el estado crítico	106
Figura 30: Línea de descarga y de rebote en el ensayo de compresión	107
Figura 31: Organigrama Resumen de los diferentes ensayos realizados sobre los distintos suelos.	109
Figura 32: Pruebas de disgregación: arriba izquierda CDB, arriba derecha CDA, abajo izquierda OZB, abajo derecha OZA.	112
Figura 33: Prueba de dispersión, OZB (izquierda) y OZA (derecha).	113
Figura 34: Variación volumétrica en % durante el ciclo Expansión - Contracción.	115
Figura 35: Tensión de Rotura de agregados individuales OZA vs. OZB, Clases I, II y III.	120
Figura 36: Tensión de Rotura de agregados individuales de ambos tratamientos (A y B) en función de su diámetro efectivo.	121
Figura 37: Tensión de Compactación de Cilindros de COA vs. COB.	122
Figura 38: Tensión de Rotura de Cilindros por Brazilian Test de COA vs. COB.	123
Figura 39: organigrama ilustrativo de las pruebas conducidas con compresión y corte.	127
Figura 40: Líneas de Compresión CDA vs CDB al 18% de humedad.	128
Figura 41: Líneas de Compresión CDA vs. CDB al 8% de humedad.	128

Figura 42: Líneas de Compresión OZA vs. OZB Clase II al 15% de humedad.	129
Figura 43: Líneas de Compresión OZA vs. OZB Clase III al 15% de humedad.	129
Figura 44: Líneas de Compresión de OZA al 5% de humedad, Todas las Clases Granulométricas.	131
Figura 45: Líneas de Compresión de OZB al 5% de humedad, Todas las Clases Granulométricas.	131
Figura 46: Líneas de Compresión OZA vs. OZB Clase I al 5% de humedad.	132
Figura 47: Líneas de Compresión de OZA vs. OZB Clase II al 5% de humedad.	132
Figura 48: Líneas de Compresión OZA vs. OZB Clase III al 5% de humedad.	133
Figura 49: Líneas de Compresión OZA vs. OZB Clase IV al 5% de humedad.	133
Figura 50: Líneas Virgen de CDA vs. CDB al 18% de humedad.	142
Figura 51: Líneas Virgen de CDA vs. CDB al 8% de humedad.	142
Figura 52: Líneas Virgen OZA vs. OZB Clase I al 5% de humedad.	143
Figura 53: Líneas Virgen OZA vs. OZB Clase II al 5% de humedad.	143
Figura 54: Líneas Virgen de OZA vs. OZB Clase III al 5% de humedad.	144
Figura 55: Líneas Virgen OZA vs. OZB Clase IV al 5% de humedad.	144
Figura 56: Líneas Virgen de OZA al 5% de humedad, Todas las Clases Granulométricas.	145
Figura 57: Líneas Virgen OZB al 5% de humedad, Todas las Clases Granulométricas.	145
Figura 58: Líneas Virgen OZA vs. OZB Clase II al 15% de humedad.	146
Figura 59: Líneas Virgen OZA vs. OZB Clase III al 15% de humedad.	146
Figura 60: Líneas Virgen OZA Clase II vs. Clase III al 15% de humedad.	147
Figura 61: Líneas Virgen OZB Clase II vs. Clase III al 15% de humedad.	147

Figura 62: Rectas de Coulomb de CDA vs. CDB al 18% de humedad.	158
Figura 63: Rectas de Coulomb de CDA vs. CDB al 8% de humedad.	159
Figura 64: Rectas de Coulomb de OZB II vs. OZB III al 15% de humedad.	159
Figura 65: Rectas de Coulomb de OZA II vs. OZA III al 15% de humedad.	160
Figura 66: Rectas de Coulomb de OZA vs. OZB Clase II al 15% de humedad.	160
Figura 67: Rectas de Coulomb de OZA vs. OZB Clase III al 15% de humedad.	161
Figura 68: Rectas de Coulomb de OZA al 5% de humedad, Todas las Clases Granulométricas.	161
Figura 69: Rectas de Coulomb de OZB al 5% de humedad, Todas las Clases Granulométricas.	162
Figura 70: Rectas de Coulomb OZA vs. OZB Clase I al 5% de humedad.	162
Figura 71: Rectas de Coulomb OZA vs. OZB Clase II al 5% de humedad.	163
Figura 72: Rectas de Coulomb OZA vs. OZB Clase III al 5% de humedad.	163
Figura 73: Rectas de Coulomb OZA vs. OZB Clase IV al 5% de humedad.	164
Figura 74: Relación de Volumen durante el corte CDA vs. CDB al 8% de humedad.	176
Figura 75: Relación de Volumen durante el corte CDA vs. CDB al 18% de humedad.	177
Figura 76: Relación de Volumen durante el corte OZA vs. OZB Clase I al 5% de humedad.	177
Figura 77: Relación de Volumen durante el corte OZA vs. OZB Clase II al 5% de humedad.	178
Figura 78: Relación de Volumen durante el corte OZA vs. OZB Clase III al 5% de humedad.	178

Figura 79: Relación de Volumen durante el corte OZA vs. OZB Clase IV al 5% de humedad.	179
Figura 80: Relación de Volumen durante el corte OZA vs. OZB Clase II al 15% de humedad.	179
Figura 81: Relación de Volumen durante el corte OZA vs. OZB Clase III al 15% de humedad.	180
Figura 82: Líneas Virgen (LV) y de Estado Crítico (EC) de CDA vs. CDB al 8% de humedad.	185
Figura 83: Líneas Virgen (LV) y de Estado Crítico (EC) de CDA vs. CDB al 18% de humedad.	185
Figura 84: Líneas Virgen (LV) y de Estado Crítico (EC) de OZA vs. OZB Clase I al 5% de humedad.	186
Figura 85: Líneas Virgen (LV) y de Estado Crítico (EC) de OZA vs. OZB Clase II al 5% de humedad.	186
Figura 86: Líneas Virgen (LV) y de Estado Crítico (EC) de OZA vs. OZB Clase III al 5% de humedad.	187
Figura 87: Líneas Virgen (LV) y de Estado Crítico (EC) de OZA vs. OZB Clase IV al 5% de humedad.	187
Figura 88: Líneas Virgen (LV) y de Estado Crítico (EC) de OZA vs. OZB Clase II al 15% de humedad.	188
Figura 89: Líneas Virgen (LV) y de Estado Crítico (EC) de OZA vs. OZB Clase III al 15% de humedad.	188
Figura 90: Líneas de LV y EC para OZ Clase II al 5% de H° (A vs B). A una misma Tensión Normal OZ B tendría la posibilidad de alcanzar Vol.Esp. superiores.	193
Figura 91: Líneas de LV y EC para OZ Clase III al 5% de H° (A vs B). A una misma Tensión Normal OZ B tendría la posibilidad de alcanzar Vol.Esp. superiores.	194
Figura 92: Líneas de LV y EC para OZ Clase II al 5% de H° (A vs B). Para obtener un mismo valor de Vol. Esp., A soportaría menor Tensión Normal que B.	195

Figura 93: Líneas de LV y EC para OZ Clase III al 5% de H° (A vs B).
Para obtener un mismo valor de Vol. Esp., A soportaría menor Tensión Normal que B. 196

Figura 94: Líneas de LV y EC para OZ Clase II al 5% de H° (A vs B).
Tensión Normal al Corte al que se podría esperar un incremento de Vol.Esp. del 10% aproximadamente. 197

Figura 95: Líneas de LV y EC para OZ Clase III al 5% de H° (A vs B).
Tensión Normal al Corte al que se podría esperar un incremento de Vol.Esp. del 10% aproximadamente. 197

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Por orden de aparición.

PSI	Porcentaje de Sodio de Intercambio
RAS	Relación de Adsorción de Sodio
Y	Resistencia a la Tracción
F'	Fuerza Polar de Rotura
d	Diámetro medio efectivo
dm	diámetro de la clase granulométrica a la que pertenece el agregado correspondiente
m	valor individual de masa del agregado
m_0	masa media de los agregados de una clase

s_1	diámetro de la abertura de la malla del tamiz superior utilizado en la formación de cada una de las clases granulométricas de agregados
s_2	diámetro de la abertura de la malla del tamiz inferior utilizado en la formación de cada una de las clases granulométricas de agregados
n	es el número de agregados
MWD	Diámetro medio efectivo, <i>mean wight diameter</i> .
MOR	Modulo de Ruptura
ρ_{aps}	Masa Volumétrica Aparente Seca
v	Volumen Específico
p	Tensión Normal Media
q	Tensión Desviatoria, Tensión de Corte
L.E.C, C.S.L.	Línea de Estado Crítico, <i>Critical State Line</i>
L.V., N.C.L	Línea Virgen, Línea de Consolidación Normal, <i>Normal Consolidation Line</i>
P_c	Línea de Preconsolidación
λ	Pendiente de la Línea Virgen y de la Línea de Estado Crítico
N	Término independiente de la Línea Virgen
Γ	Término independiente de la Línea de Estado Crítico
ϕ	Ángulo de rozamiento Interno
c	Cohesión
τ	Esfuerzo Cortante
σ_n	Esfuerzo Normal Efectivo
CD	Suelo Cardone
OZ	Suelo Ozzano
CO	Suelo Cadriano
A	Tratamiento más sodificado
B	Tratamiento menos sodificado
C.I.C.	Capacidad de Intercambio Catiónico
MO	Materia Orgánica
CE	Conductividad Eléctrica

σ_t	Tensión de Rotura del Cilindro, <i>Tensile Strength</i>
F	Fuerza de Rotura del Cilindro
D	Diámetro del cilindro
h	Altura del cilindro
RV	Relación de Volumen
Vf	Volumen Final
Vi	Volumen Inicial
hf	Altura Final
hi	Altura Inicial
Af	Área Final
Ai	Área Inicial
H°	Humedad p/p
h	Altura de la torta
d	Diámetro de la torta
Δ	Variación
TN	Tensión Normal