



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
MECÁNICO DE ARCILLAS UTILIZANDO LAS  
ECUACIONES MEJORADAS DERIVADAS DEL  
PRINCIPIO DE PROPORCIONALIDAD NATURAL**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL  
(GEOTECNIA)**

PRESENTA:

**ALEJANDRO HERRERA CANSECO**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO**

CODIRECTOR DE TESIS

**DR. EULALIO JUÁREZ BADILLO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2006





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente : **Dr. Eulalio Juárez Badillo**  
Secretario : **Dr. Venancio Trueba López**  
Vocal : **Dr. Rigoberto Rivera Constantino**  
1<sup>er</sup> Suplente : **M.I. Jaime Martínez Mier**  
2<sup>do</sup> Suplente : **Dr. Rafael Morales y Monroy**

Lugar donde se realizó la tesis:

**Ciudad Universitaria, México, D. F.**

DIRECTOR DE TESIS:

**Dr. Rigoberto Rivera Constantino**

---

Firma

## AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo A mis padres y hermano por ser la fuerza, el apoyo y la inspiración que me ha ayudado a llegar hasta aquí.

A mis amigos por ser simple y sencillamente lo que son “amigos” y ser parte de esta aventura que apenas comienza.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de estudiar en sus instalaciones, transmitirme su excelencia académica y todos sus valores.

Al Dr. E. Juárez Badillo y al Dr. Rigoberto Rivera Constantino por la dirección de éste trabajo y compartir sus experiencias y conocimientos no solo durante éste proceso, sino también dentro y fuera del salón de clases.

A todos y cada uno de mis maestros, que a lo largo de mi formación, me han motivado a seguir adelante, compartiendo algo de su tiempo, conocimientos, filosofía y experiencias, para buscar la excelencia profesional como personal.

Por último pero no por eso menos importantes a todas y cada una de las personas que a lo largo de este camino han compartido un momento, una sonrisa, una lagrima, un consejo, y que de una u otra forma son parte de lo que soy.

“Hay hombres que luchan un día y son buenos.  
Hay otros que luchan un año y son mejores.  
Hay quienes luchan muchos años y son muy buenos.  
Pero hay los que luchan toda la vida:  
Esos son los imprescindibles”

Bertolt Brecht

# ÍNDICE

Página

INTRODUCCIÓN.	I
<b>1 OBJETIVOS Y ALCANCES.</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.	1
1.2 ALCANCE.	1
<b>2 PRINCIPIO DE PROPORCIONALIDAD NATURAL.</b>	<b>2</b>
2.1 ECUACIONES PARA DESCRIBIR EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LOS GEOMATERIALES EN PRUEBAS CU Y CD.	2
2.1.1 Antecedentes.	2
2.1.2 Ecuaciones generales para las relaciones esfuerzo desviador-deformación natural para suelos.	2
2.1.2.1 Ecuaciones generales para las relaciones esfuerzo desviador – deformación unitaria para arcillas preconsolidadas.	9
2.1.3 Ecuaciones generales de presión de poro y cambio de volumen en arcillas.	14
Presión de poro.	14
Cambio de volumen.	17
2.1.3.1 Ecuaciones de presión de poro y cambio de volumen para arcillas preconsolidadas.	19
Presión de poro.	19
Cambios de volumen.	20
<b>3 ANÁLISIS DE DATOS.</b>	<b>22</b>
3.1 APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES GENERALES.	23
3.1.1 Proceso de ajuste para las curvas esfuerzo vs. deformación en pruebas CU y CD.	24
3.1.1.1 Región del Pre – pico.	24
3.1.2 Proceso de ajuste para las curvas de presión de poro normalizadas con $\sigma'_{co}$ .	24
3.1.3 Proceso de ajuste para las curvas de cambio de volumen ( $\Delta V/V_0$ ).	25
3.2 COMPARACIONES TEÓRICO – EXPERIMENTALES.	25
3.2.1 Arcilla de Weald.	26
3.2.1.1 Pruebas CU (Consolidadas No Drenadas).	26
3.2.1.2 Pruebas CD (Consolidadas Drenadas).	43
3.2.2 Arcilla de Valle de México.	89
3.2.2.1 Reconstituida (Pruebas CU).	89
3.2.2.2 Pruebas CU Estado Natural.	100
3.2.3 Arcilla Caolinita.	117
<b>4 RESULTADOS.</b>	<b>129</b>
4.1 VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL PPN RESPECTO AL OCF PRUEBAS CD.	129
4.2 VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL PPN RESPECTO AL IP PRUEBAS CU.	150
<b>5 CONCLUSIONES.</b>	<b>162</b>
<b>6 REFERENCIAS.</b>	<b>164</b>

## ECUACIONES

2.1-1 .....	3
2.1-2 .....	3
2.1-3 .....	4
2.1-4 .....	4
2.1-5 .....	4
2.1-6 .....	4
2.1-7 .....	4
2.1-8 .....	4
2.1-9 .....	4
2.1-10.....	5
2.1-11.....	5
2.1-12.....	6
2.1-13.....	6
2.1-14.....	6
2.1-15.....	7
2.1-16.....	7
2.1-17.....	7
2.1-18.....	7
2.1-19.....	7
2.1-20.....	7
2.1-21.....	8
2.1-22.....	8
2.1-23.....	9
2.1-24.....	9
2.1-25.....	9
2.1-26.....	9
2.1-27.....	9
2.1-28.....	10
2.1-29.....	10
2.1-30.....	10
2.1-31.....	11
2.1-32.....	12
2.1-33.....	12
2.1-34.....	12
2.1-35.....	12
2.1-36.....	12
2.1-37.....	13
2.1-38.....	13
2.1-39.....	13
2.1-40.....	13
2.1-41.....	14
2.1-42.....	14
2.1-43.....	15
2.1-44.....	15
2.1-45.....	15
2.1-46.....	16
2.1-47.....	16
2.1-48.....	17
2.1-49.....	17
2.1-50.....	17
2.1-51.....	18
2.1-52.....	18

2.1-53.....	18
2.1-54.....	18
2.1-55.....	19
2.1-56.....	19
2.1-57.....	19
2.1-58.....	20
2.1-59.....	20
2.1-60.....	20
2.1-61.....	20
2.1-62.....	21
2.1-63.....	21
2.1-64.....	21
2.1-65.....	22
2.1-66.....	22
2.1-67.....	22

## TABLAS

TABLA 3-1: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS ESFUERZO DESVIADOR AXIAL VS. ( $E_A$ ) .....	27
TABLA 3-2: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS ESFUERZO DESVIADOR AXIAL VS. ( $E_A$ ) .....	29
TABLA 3-3: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS ESFUERZO DESVIADOR AXIAL VS. ( $E_A$ ) .....	43
TABLA 3-4: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS ESFUERZO DESVIADOR RADIAL VS. ( $E_A$ ) .....	44
TABLA 3-5: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS ESFUERZO DESVIADOR VS. ( $E_A$ ) MANTENIENDO $J = CTE$ . ...	45
TABLA 3-6.....	48
TABLA 3-7.....	48
TABLA 3-8.....	49
TABLA 3-9.....	53
TABLA 3-10.....	54
TABLA 3-11.....	55
TABLA 3-12.....	90
TABLA 3-13.....	91
TABLA 3-14.....	91
TABLA 3-15: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS ESFUERZO DESVIADOR AXIAL VS. ( $E_A$ ) .....	94
TABLA 3-16: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS PRESIÓN DE PORO NORMALIZADA VS. ( $E_A$ ) .....	94
TABLA 3-17: VALORES DE CORRELACIÓN. ....	95
TABLA 3-18.....	100
TABLA 3-19: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS ESFUERZO DESVIADOR AXIAL VS. ( $E_A$ ) .....	100
TABLA 3-20: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS PRESIÓN DE PORO NORMALIZADA VS. ( $E_A$ ) .....	101
TABLA 3-21: VALORES DE CORRELACIÓN. ....	101
TABLA 3-22.....	117
TABLA 3-23.....	117
TABLA 3-24: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS ESFUERZO DESVIADOR AXIAL VS. ( $E_A$ ) .....	118
TABLA 3-25: PARÁMETROS PARA OBTENER LAS CURVAS PRESIÓN DE PORO NORMALIZADAS VS. ( $E_A$ ) .....	119
TABLA 3-26: VALORES DE CORRELACIÓN. ....	119
TABLA 4-1.....	147
TABLA 4-2.....	148
TABLA 4-3.....	148
TABLA 4-4.....	151

## FIGURAS

FIG. 2-1: DIMENSIONES DE LA PROBETA.....	3
FIG. 2-3 . CURVAS DEFORMACIÓN NATURAL – ESFUERZO DESVIADOR PARA DISTINTOS VALORES DE $\nu$ .....	8
FIG. 2-4: ESFUERZOS IMPLICADOS EN EL FENÓMENO DE PRECONSOLIDACIÓN.....	11
FIG. 3-1: FUNCIÓN DE SENSITIVIDAD.....	25
FIG. 3-2: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\mu$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	28
FIG. 3-3: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $x_f$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	28
FIG. 3-4: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\alpha$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	29
FIG. 3-5: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\beta$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	30
FIG. 3-6: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $E_A^*$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	30
FIG. 3-7: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 1.....	31
FIG. 3-8: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) OCR = 1.....	31
FIG. 3-9: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 2.....	32
FIG. 3-10: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) OCR = 2.....	32
FIG. 3-11: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 4.....	33
FIG. 3-12: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) OCR = 4.....	33
FIG. 3-13: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 8.....	34
FIG. 3-14: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) OCR = 8.....	34
FIG. 3-15: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 12.....	35
FIG. 3-16: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) OCR = 12.....	35
FIG. 3-17: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 24.....	36
FIG. 3-18: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) OCR = 24.....	36
FIG. 3-19 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 1.....	37
FIG. 3-20: CURVA PRESIÓN DE PORO (AD) OCR = 1.....	37
FIG. 3-21 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 2.....	38
FIG. 3-22: CURVA PRESIÓN DE PORO (AD) OCR = 2.....	38
FIG. 3-23 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 4.....	39
FIG. 3-24: CURVA PRESIÓN DE PORO (AD) OCR = 4.....	39
FIG. 3-25 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 8.....	40
FIG. 3-26: CURVA PRESIÓN DE PORO (AD) OCR = 8.....	40
FIG. 3-27 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 12.....	41
FIG. 3-28: CURVA PRESIÓN DE PORO (AD) OCR = 12.....	41
FIG. 3-29 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 24.....	42
FIG. 3-30: CURVA PRESIÓN DE PORO (AD) OCR = 24.....	42
FIG. 3-31: VALORES DE $\mu$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=1$ .....	45
FIG. 3-32: VALORES DE $\mu$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	46
FIG. 3-33: VALORES DE $x_f$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=1$ .....	46
FIG. 3-34: VALORES DE $x_f$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	47
FIG. 3-35: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\alpha$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=1$ .....	49
FIG. 3-36: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\beta$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=1$ .....	50
FIG. 3-37: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $E_A^*$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PAR $\nu=1$ .....	50
FIG. 3-38: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\alpha$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	51
FIG. 3-39: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\beta$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	51
FIG. 3-40: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $E_A^*$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu=2$ .....	52
FIG. 3-41: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 1.....	56
FIG. 3-42: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 1.....	56
FIG. 3-43: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 1.7.....	56
FIG. 3-44: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 1.7.....	57
FIG. 3-45: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 2.0.....	57
FIG. 3-46: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 2.0.....	58
FIG. 3-47: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 2.7.....	58
FIG. 3-48: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 2.7.....	59
FIG. 3-49: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 4.0.....	59
FIG. 3-50: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 4.0.....	60



FIG. 3-51: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 8.0.....	60
FIG. 3-52: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 8.0.....	61
FIG. 3-53: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 12.0.....	61
FIG. 3-54: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 12.0.....	62
FIG. 3-55: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) OCR = 24.0.....	62
FIG. 3-56: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 24.0.....	63
FIG. 3-57: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 1.0.....	63
FIG. 3-58: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 1.0.....	64
FIG. 3-59: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 1.7.....	64
FIG. 3-60: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 1.7.....	65
FIG. 3-61: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 2.0.....	65
FIG. 3-62: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 2.0.....	66
FIG. 3-63: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 4.0.....	66
FIG. 3-64: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 4.0.....	67
FIG. 3-65: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 8.0.....	67
FIG. 3-66: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 8.0.....	68
FIG. 3-67: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 12.0.....	68
FIG. 3-68: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 12.0.....	69
FIG. 3-69: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AD) OCR = 24.0.....	69
FIG. 3-70: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 24.0.....	70
FIG. 3-71: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RD) OCR = 1.0.....	70
FIG. 3-72: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 1.0.....	71
FIG. 3-73: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RD) OCR = 1.7.....	71
FIG. 3-74: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 1.7.....	72
FIG. 3-75: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RD) OCR = 2.0.....	72
FIG. 3-76: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 2.0.....	73
FIG. 3-77: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RD) OCR = 4.0.....	73
FIG. 3-78: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 4.0.....	74
FIG. 3-79: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RD) OCR = 8.0.....	74
FIG. 3-80: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 8.0.....	75
FIG. 3-81: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RD) OCR = 12.0.....	75
FIG. 3-82: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 12.0.....	76
FIG. 3-83: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RD) OCR = 24.0.....	76
FIG. 3-84: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 24.0.....	77
FIG. 3-85: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RI) OCR = 1.0.....	77
FIG. 3-86: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 1.0.....	78
FIG. 3-87: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RI) OCR = 2.0.....	78
FIG. 3-88: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 2.0.....	79
FIG. 3-89: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RI) OCR = 4.0.....	79
FIG. 3-90: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 4.0.....	80
FIG. 3-91: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RI) OCR = 8.0.....	80
FIG. 3-92: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 8.0.....	81
FIG. 3-93: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RI) OCR = 12.0.....	81
FIG. 3-94: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 12.0.....	82
FIG. 3-95: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (RI) OCR = 24.0.....	82
FIG. 3-96: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 24.0.....	83
FIG. 3-97: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (CJC) OCR = 1.0.....	83
FIG. 3-98: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (CJC) OCR = 1.0.....	84
FIG. 3-99: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (CJC) OCR = 4.0.....	84
FIG. 3-100: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (CJC) OCR = 4.0.....	85
FIG. 3-101: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (CJC) OCR = 12.0.....	85
FIG. 3-102: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (CJC) OCR = 12.0.....	86
FIG. 3-103: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (EJC) OCR = 1.0.....	86
FIG. 3-104: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (EJC) OCR = 1.0.....	87
FIG. 3-105: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (EJC) OCR = 4.0.....	87
FIG. 3-106: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (EJC) OCR = 4.0.....	88

FIG. 3-107: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (EJC) OCR = 12.0 .....	88
FIG. 3-108: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (EJC) OCR = 12.0 .....	89
FIG. 3-109: CURVAS DE COMPRESIBILIDAD ISOTRÓPICAS.....	92
FIG. 3-110: CURVA DE COMPRESIBILIDAD $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ KG/CM}^2$ .....	92
FIG. 3-111: CURVA DE COMPRESIBILIDAD $\sigma_{oct} = 1.0 \text{ KG/CM}^2$ .....	93
FIG. 3-112: CURVA DE COMPRESIBILIDAD $\sigma_{oct} = 1.5 \text{ KG/CM}^2$ .....	93
FIG. 3-113: CURVA DE COMPRESIBILIDAD PROMEDIO.....	94
FIG. 3-114: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ KG/CM}^2$ .....	95
FIG. 3-115: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ KG/CM}^2 \nu = 1$ .....	96
FIG. 3-116: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ KG/CM}^2 \nu = 2$ .....	96
FIG. 3-117: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) $\sigma_{oct} = 1.0 \text{ KG/CM}^2$ .....	97
FIG. 3-118: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ KG/CM}^2 \nu = 1$ .....	97
FIG. 3-119: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ KG/CM}^2 \nu = 2$ .....	98
FIG. 3-120: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (AI) $\sigma_{oct} = 1.5 \text{ KG/CM}^2$ .....	98
FIG. 3-121: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ KG/CM}^2 \nu = 1$ .....	99
FIG. 3-122: CURVA PRESIÓN DE PORO (AI) $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ KG/CM}^2 \nu = 2$ .....	99
FIG. 3-123: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 140 \text{ KPA}$ (A1) .....	102
FIG. 3-124: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 140 \text{ KPA}$ (A1).....	102
FIG. 3-125: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 140 \text{ KPA}$ (A1).....	103
FIG. 3-126: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 220 \text{ KPA}$ (A2) .....	103
FIG. 3-127: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 220 \text{ KPA}$ (A2).....	104
FIG. 3-128: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 220 \text{ KPA}$ (A2).....	104
FIG. 3-129: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 300 \text{ KPA}$ (A3) .....	105
FIG. 3-130: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 300 \text{ KPA}$ (A3).....	105
FIG. 3-131: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 300 \text{ KPA}$ (A3).....	106
FIG. 3-132: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 80 \text{ KPA}$ (A4) .....	106
FIG. 3-133: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 80 \text{ KPA}$ (A4).....	107
FIG. 3-134: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 80 \text{ KPA}$ (A4).....	107
FIG. 3-135: CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 150 \text{ KPA}$ (A5) .....	108
FIG. 3-136: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 150 \text{ KPA}$ (A5).....	108
FIG. 3-137: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 150 \text{ KPA}$ (A5).....	109
FIG. 3-138: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 200 \text{ KPA}$ (A11) .....	109
FIG. 3-139: CURVA PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 200 \text{ KPA}$ (A11).....	110
FIG. 3-140: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 200 \text{ KPA}$ (A11).....	110
FIG. 3-141: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 270 \text{ KPA}$ – A12 .....	111
FIG. 3-142: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 270 \text{ KPA}$ (A12).....	111
FIG. 3-143: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 270 \text{ KPA}$ (A12).....	112
FIG. 3-144: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 305 \text{ KPA}$ (A13) .....	112
FIG. 3-145: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 305 \text{ KPA}$ (A13).....	113
FIG. 3-146: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 305 \text{ KPA}$ (A13).....	113
FIG. 3-147: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 230 \text{ KPA}$ (A17) .....	114
FIG. 3-148: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 230 \text{ KPA}$ (A17).....	114
FIG. 3-149: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 230 \text{ KPA}$ (A17).....	115
FIG. 3-150: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 230 \text{ KPA}$ (A17) .....	115
FIG. 3-151: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 230 \text{ KPA}$ (A17).....	116
FIG. 3-152: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 230 \text{ KPA}$ (A17).....	116
FIG. 3-153: CURVA DE COMPRESIBILIDAD (CAOLINITA).....	118
FIG. 3-154: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 295 \text{ KPA}$ .....	120
FIG. 3-155: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 295 \text{ KPA}$ .....	120
FIG. 3-156: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 295 \text{ KPA}$ .....	121
FIG. 3-157: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 402 \text{ KPA}$ .....	121
FIG. 3-158: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 402 \text{ KPA}$ .....	122
FIG. 3-159: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 402 \text{ KPA}$ .....	122

FIG. 3-160: CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 645$ kPA .....	123
FIG. 3-161: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 645$ kPA .....	123
FIG. 3-162: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 645$ kPA .....	124
FIG. 3-163: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 800$ kPA .....	124
FIG. 3-164: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 800$ kPA .....	125
FIG. 3-165: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 800$ kPA .....	125
FIG. 3-166: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 1992$ kPA .....	126
FIG. 3-167: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 1992$ kPA .....	126
FIG. 3-168: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 1992$ kPA .....	127
FIG. 3-169: CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN $\sigma_{co} = 3240$ kPA .....	127
FIG. 3-170: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 3240$ kPA .....	128
FIG. 3-171: CURVA DE PRESIÓN DE PORO $\sigma_{co} = 3240$ kPA .....	128
FIG. 4-1: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 1 .....	130
FIG. 4-2: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 1.7 .....	131
FIG. 4-3: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 2.0 .....	131
FIG. 4-4: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 2.7 .....	132
FIG. 4-5: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 4.0 .....	132
FIG. 4-6: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 8.0 .....	133
FIG. 4-7: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 12.0 .....	133
FIG. 4-8: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AI) OCR = 24.0 .....	134
FIG. 4-9: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 1 .....	134
FIG. 4-10: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 1.7 .....	135
FIG. 4-11: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 2.0 .....	135
FIG. 4-12: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 4.0 .....	136
FIG. 4-13: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 8.0 .....	136
FIG. 4-14: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 12.0 .....	137
FIG. 4-15: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (AD) OCR = 24.0 .....	137
FIG. 4-16: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 1.0 .....	138
FIG. 4-17: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 1.7 .....	138
FIG. 4-18: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 2.0 .....	139
FIG. 4-19: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 4.0 .....	139
FIG. 4-20: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 8.0 .....	140
FIG. 4-21: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 12.0 .....	140
FIG. 4-22: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RD) OCR = 24.0 .....	141
FIG. 4-23: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 1.0 .....	141
FIG. 4-24: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 2.0 .....	142
FIG. 4-25: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 4.0 .....	142
FIG. 4-26: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 8.0 .....	143
FIG. 4-27: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 12.0 .....	143
FIG. 4-28: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (RI) OCR = 24.0 .....	144
FIG. 4-29: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (CJC) OCR = 1.0 .....	144
FIG. 4-30: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (CJC) OCR = 4.0 .....	145
FIG. 4-31: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (CJC) OCR = 12.0 .....	145
FIG. 4-32: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (EJC) OCR = 1.0 .....	146
FIG. 4-33: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (EJC) OCR = 4.0 .....	146
FIG. 4-34: CURVA DE CAMBIO VOLUMÉTRICO (EJC) OCR = 12.0 .....	147
FIG. 4-35: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\beta$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu = 1$ .....	149
FIG. 4-36: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\alpha$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu = 1$ .....	149
FIG. 4-37: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $E_A^*$ RESPECTO AL <i>OCF</i> PARA $\nu = 1$ .....	150
FIG. 4-38: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\mu$ RESPECTO AL <i>IP</i> .....	152
FIG. 4-39: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $x_F$ RESPECTO AL <i>IP</i> .....	152
FIG. 4-40: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\mu$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	153
FIG. 4-41: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $x_F$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	153
FIG. 4-42: DETALLE DE LA VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\mu$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	154
FIG. 4-43: DETALLE DE LA VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $x_F$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	154

FIG. 4-44: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\alpha$ RESPECTO AL $IP$ .....	155
FIG. 4-45: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\beta$ RESPECTO AL $IP$ .....	155
FIG. 4-46: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $E_A^*$ RESPECTO AL $IP$ .....	156
FIG. 4-47: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\alpha$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	156
FIG. 4-48: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\beta$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	157
FIG. 4-49: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $E_A^*$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	157
FIG. 4-50: DETALLE DE LA VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\alpha$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	158
FIG. 4-51: DETALLE DE LA VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\beta$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	158
FIG. 4-52: DETALLE DE LA VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $E_A^*$ RESPECTO AL $\sigma_c$ .....	159
FIG. 4-53: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\mu$ RESPECTO AL $IP$ PARA $\sigma_c \approx$ CTE. ....	159
FIG. 4-54: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $X_f$ RESPECTO AL $IP$ PARA $\sigma_c \approx$ CTE. ....	160
FIG. 4-55: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\alpha$ RESPECTO AL $IP$ PARA $\sigma_c \approx$ CTE. ....	160
FIG. 4-56: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $\beta$ RESPECTO AL $IP$ PARA $\sigma_c \approx$ CTE. ....	161
FIG. 4-57: VARIACIÓN DEL PARÁMETRO $E_A^*$ RESPECTO AL $IP$ PARA $\sigma_c \approx$ CTE. ....	161

## SIMBOLIGÍA

$\alpha$	Coefficiente de presión de poro
$\beta$	Coefficiente de presión de poro (PPN)
$\Delta\sigma$	Incremento de esfuerzo
$\Delta\sigma_i$	Cambio del esfuerzo isotrópico
$\Delta u$	Presión de poro en exceso
$\Delta V$	Cambio Volumétrico
$\varepsilon$	Deformación unitaria natural isotrópica
$\varepsilon_a$	Deformación unitaria natural axial
$\varepsilon_r$	Deformación unitaria natural radial
$\varepsilon_v$	Deformación volumétrica unitaria natural
$\gamma$	Coefficiente de compresibilidad
$\gamma_p$	Coefficiente de expansibilidad
$\eta$	Deformación natural general al cortante
$\mu$	Coefficiente cortante
$\nu$	Exponente cortante
$\rho$	Relación expansibilidad – compresibilidad
$\sigma$	Esfuerzo o Presión
$\sigma_1$	Esfuerzo principal mayor
$\sigma_3$	Esfuerzo principal menor
$\sigma'_1$	Esfuerzo principal efectivo mayor
$\sigma'_3$	Esfuerzo principal efectivo menor
$\sigma_c$	Esfuerzo isotrópico de consolidación
$\sigma_{c0}$	Esfuerzo isotrópico inicial de consolidación

$\sigma'_{c0}$	Esfuerzo isotrópico de confinamiento
$\sigma_e$	Esfuerzo isotrópico equivalente de consolidación
$\sigma_{e0}$	Esfuerzo isotrópico equivalente inicial de consolidación
$\sigma_{oct}$	Esfuerzo octaédrico
$\sigma_p$	Esfuerzo isotrópico de preconsolidación
$\sigma_{p0}$	Esfuerzo isotrópico de preconsolidación inicial
$\sigma_s$	Presión isotrópica almacenada
AD	Axial disminuido
AI	Axial incrementado
$C_c$	Índice de compresibilidad
CD	Consolidada drenada
CJC	Compresión con J constante
$C_r$	Índice de recompresión
CT1	Curva teórica para $v = 1$
CT2	Curva teórica para $v = 2$
CU	Consolidada no drenada
$C_v$	Coefficiente de consolidación
$e$	Relación de vacíos
$e_a$	Deformación desviadora natural axial
$e_a^*$	Deformación axial desviadora natural característica
$e_{a1}$	Deformación axial desviadora natural de referencia
EJC	Extensión con J constante
$e_r$	Deformación desviadora natural radial
$G_s$	Densidad de sólidos
$IP$	Índice de plasticidad
J	Primer invariante
$k$	Coefficiente de permeabilidad
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
OCF	Factor de preconsolidación
OCR	Grado de preconsolidación
PPN	Principio de Proporcionalidad Natural
RD	Radial disminuido
RI	Radial incrementado
V	Volumen
$V_0$	Volumen Inicial
$V_c$	Volumen de consolidación

w	Contenido de agua
x	Esfuerzo desviador normalizado por $\sigma_{c0}$
$x_0$	Resistencia al corte máxima para $\dot{\epsilon} = 0$
$x_1$	Resistencia normalizada de referencia
$X_1, X_2, X_3$	Ejes cartesianos
$x_1, x_2, x_3$	Dimensiones finales de la probeta
$x_{10}, x_{20}, x_{30}$	Dimensiones iniciales de la probeta
$x_f$	Esfuerzo desviador normalizado por $\sigma_{c0}$ final
y	Función de sensibilidad
$y_N$	Función normal

## **INTRODUCCIÓN.**

### **Antecedentes.**

La mecánica de suelos se ha venido desarrollando a través de los años tratando de mejorar los modelos que intentan reproducir y predecir el comportamiento de algunos geomateriales para así resolver problemas prácticos. Uno de estos problemas es el que se refiere al comportamiento que sufren los geomateriales al estar sometidos a esfuerzos y al efecto del tiempo, para lo cual se han desarrollado modelos analíticos que reproducen con cierto grado de aproximación su comportamiento esfuerzo – deformación; sin embargo, muchos de estos modelos no toman en cuenta que el suelo es un material inelástico, no lineal, no homogéneo y anisotrópico.

En México se ha propuesto desde hace algunos años una nueva línea de investigación que tiene sus bases en el Principio de Proporcionalidad Natural (PPN), establecido por el Dr. Eulalio Juárez Badillo y el cual establece que todos los fenómenos de la naturaleza son ordenados y simples. Las teorías derivadas del PPN se han ido perfeccionando a través de los años, lo que ha permitido su aplicación a diversos geomateriales, obteniendo resultados muy consistentes.

La última mejora consiste en la introducción de la ecuación de sensibilidad en términos de deformaciones y justificada a través del PPN, lo que permite la aplicación de las ecuaciones tanto en la región del pre-pico como en la del pos-pico.

Previo a este trabajo, se han realizado algunas tesis de Maestría, en donde se investigó el comportamiento de la arcilla del Valle de México, interpretando los resultados experimentales mediante las teorías del Dr. E. Juárez-Badillo. En esta arcilla se estudiaron el comportamiento consolidado no drenado y el drenado, para los estados normalmente consolidado y preconsolidado, otros estudios incluyeron a las arenas con diferentes grados de compacidad y presión de confinamiento.

Dentro de los principales modelos constitutivos utilizados en la geotecnia (Eduardo Rojas y Miguel P. Romo 1993), están los que parten de comprender la física básica del comportamiento del material estudiado y a partir de ahí establecer, en la forma más sencilla posible, la formulación matemática que contenga los aspectos más importantes de dicho comportamiento. Así surgen los modelos plásticos, modelos del estado crítico, endocrónicos, incrementales hipoeelásticos y el basado en el PPN.

En el marco de los modelos del estado crítico existen, entre otros, los basados en la teoría del estado crítico la cual se apoya en el estudio de los mecanismos de disipación de energía dentro del esqueleto del suelo, así como en la observación del comportamiento macroscópico de los materiales.

El modelo de Cambridge se construye a partir de las ecuaciones del estado crítico a las cuales se agregan las condiciones específicas de un ensaye para obtener la respuesta teórica del material.

El modelo de Pender no parte del estudio de los mecanismos de la disipación de la energía dentro del esqueleto del suelo, como lo hace el de Cambridge, sino que se basa en las funciones matemáticas que definen los siguientes tres aspectos: la superficie de fluencia, la trayectoria de un ensaye no drenado y la relación entre los incrementos de deformación plástica desviadora y volumétrica. Además considera que la superficie de fluencia viaja junto con el estado de esfuerzos y que el material se vuelve más resistente en cada ciclo de carga, por lo que es capaz de simular adecuadamente el comportamiento de los suelos bajo carga cíclica.

El modelo de Sandler, en el cual para evitar los problemas de unicidad y de continuidad propios de los modelos del estado crítico, se desarrollaron los modelos de cubierta, los cuales pueden simular el comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de carga, la superficie de fluencia de estos modelos consiste en una envolvente de falla y una cubierta cuya posición es función de la historia de deformación volumétrica del material. Se utiliza la regla de flujo asociado con lo cual se satisfacen las condiciones de continuidad y unicidad. Por medio de las reglas de endurecimiento, del modelo es capaz de simular el comportamiento cíclico de los materiales, además de los fenómenos viscosos y aquellos ligados a la anisotropía de los materiales. Las formulaciones matemáticas de la envolvente de falla y de su cubierta dependen del tipo de material que se desea modelar.

Con otro enfoque totalmente diferente utilizado por la mayoría de los investigadores el Dr. Eulalio Juárez Badillo ha venido desarrollando ecuaciones (Juárez Badillo, 1975) para predecir el comportamiento esfuerzo – deformación – tiempo de los geomateriales, basadas en el PPN.

Las ecuaciones usadas en esta investigación, han sido aplicadas en la descripción del comportamiento de los geomateriales con resultados muy satisfactorios, así como en la predicción de los hundimientos de obras reales con resultados excelentes.

El principio de proporcionalidad natural condujo a su autor a una teoría no lineal esfuerzo – deformación para los geomateriales, ella permite predecir los cambios volumétricos y la resistencia en pruebas triaxiales drenadas, así como la presione de poro y la resistencia en pruebas triaxiales no drenadas.



# 1 OBJETIVOS Y ALCANCES.

## 1.1 Objetivos.

En esta investigación se hace la predicción del comportamiento  $\sigma - \varepsilon$ ,  $\Delta V / V_0 - \varepsilon$  y  $\Delta u - \varepsilon$ , de diferentes tipos de arcilla, sometidas a pruebas triaxiales de tipo CU y CD, bajo la base de las ecuaciones teóricas mejoradas derivadas del PPN, también se pretende establecer un la ley de variación de los parámetros involucrados en las ecuaciones teóricas, en función del grado de preconsolidación y el índice de plasticidad de los materiales estudiados.

## 1.2 Alcance.

Para lograr el objetivo planteado, se analizaron y ajustaron las pruebas tipo CU y CD de una arcilla reconstituida (arcilla de Weald) en la cual se indujeron diferentes grados de preconsolidación. Todas estas pruebas se llevaron a cabo en el Imperial College de la Universidad de Londres, bajo la dirección del Profesor D.J. Henkel. También se hizo lo mismo con las pruebas tipo CU en la arcilla de la Ciudad de México, realizadas en la Universidad Nacional Autónoma de México, tanto por el Dr. Mendoza como por el M.I. Héctor Nava M. y las pruebas tipo CU en una arcilla Caolinita, realizadas por el Dr. Venancio Trueba L. en la Escuela Central de París.

Todas estas pruebas fueron ajustadas aplicando las ecuaciones mejoradas derivadas del PPN para conocer los parámetros característicos de cada una de ellas y posteriormente intentar establecer su variación con respecto al grado de preconsolidación y el índice de plasticidad.

Para este trabajo solo se contempla la utilización de las ecuaciones en la región del pre - pico, debido a que las pruebas reconstituidas tomadas para este trabajo no presentan pos-pico.

## 2 PRINCIPIO DE PROPORCIONALIDAD NATURAL.

### 2.1 Ecuaciones para describir el comportamiento esfuerzo-deformación de los geomateriales en pruebas CU y CD.

#### 2.1.1 Antecedentes.

Haciendo una retrospectiva, el Dr. Eulalio Juárez-Badillo siempre ha tenido un interés muy especial en el comportamiento mecánico de los geomateriales, (llámese a estos: sólidos, líquidos y gases), desde el punto de vista de su resistencia, permeabilidad, cambio de volumen y cambio de forma de todos y cada uno de ellos, ya que estas características son funciones de los esfuerzos tanto isotrópicos como desviadores, del tiempo y la temperatura.

Para poder conjuntar en una teoría capaz de analizar todas las características antes mencionadas, el Dr. E. Juárez-Badillo recurrió a un principio filosófico. Inspirado en el Dr. George Birkhoff, matemático de la Universidad de Harvard quién define a la belleza, refiriéndose a las artes y a la música, como la relación:

$$Belleza = \frac{Orden}{complejidad}$$

El Dr. Juárez-Badillo siente que la naturaleza es simple y bella, entonces pensando en que la ciencia debe de ser de esta misma manera la relación anterior es también aplicable a ella. Bajo este concepto una teoría puede ser verdadera, simple y ordenada. Es por ello que el principio de la belleza científica (nombre científico) ahora llamado principio de proporcionalidad natural (nombre técnico) expresa simplemente, que todos los fenómenos en la naturaleza son ordenados y simples; ordenados porque conducen a pensar que todos los fenómenos se pueden describir por una ecuación matemática; simples porque conducen a pensar que las ecuaciones matemáticas son de esta manera, “simples”.

Por lo anterior, el principio de proporcionalidad natural ha proveído ecuaciones muy simples para describir el comportamiento de los suelos en lo que respecta ha: la compresibilidad, la variación de la permeabilidad, la fluidez volumétrica o la compresión secundaria y la fluidez al corte o creep.

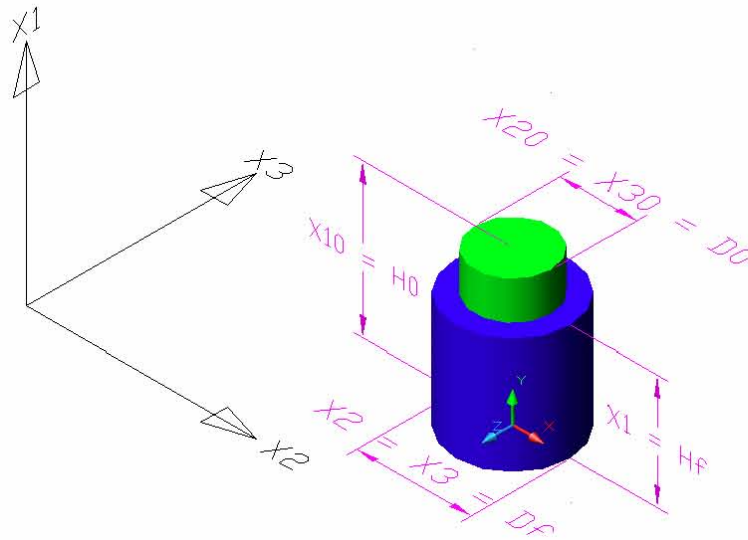
Para describir una cierta propiedad de un geomaterial es necesario hacer uso de una variable propia, que es, la variable natural más simple que permite lograr dicha descripción.

#### 2.1.2 Ecuaciones generales para las relaciones esfuerzo desviador-deformación natural para suelos.

El comportamiento esfuerzo desviador – deformación ha sido considerado por el Dr. Juárez – Badillo usando el concepto de la deformación general natural al cortante (Juárez –

Badillo, E. 1974)  $\eta$ .

Sea  $X_1$ , (axial)  $X_2$ , y  $X_3$  un sistema de referencia cartesiano de coordenadas y consideremos una muestra prismática de arcilla sometida a una presión isotrópica de consolidación  $\sigma_{c0}$ . Ahora consideremos que una prueba triaxial de compresión estándar es realizada, además consideremos que la velocidad del incremento de carga o la velocidad de deformación y la temperatura son constantes. Asumamos que  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor, respectivamente y por consiguiente  $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$  es el esfuerzo desviador que se define como el diámetro del círculo de Mohr. Si  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ , son las dimensiones de la muestra y  $x_{10}$ ,  $x_{20}$ ,  $x_{30}$  las dimensiones iniciales.



**Fig. 2-1: Dimensiones de la probeta.**

Las deformaciones naturales axial y radial para una prueba de compresión triaxial se definen de la siguiente forma:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 = \ln \frac{x_1}{x_{10}}$$

**2.1-1**

$$\varepsilon_r = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \ln \frac{x_3}{x_{30}} = \ln \frac{x_2}{x_{20}}$$

**2.1-2**

Por otra parte, la deformación volumétrica unitaria natural se expresar como:

$$\varepsilon_v = \ln \frac{V}{V_0} = \ln \frac{x_1 x_2 x_3}{x_{10} x_{20} x_{30}} = \left[ \ln \frac{x_1}{x_{10}} + \ln \frac{x_2}{x_{20}} + \ln \frac{x_3}{x_{30}} \right] = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$$

**2.1-3**

y la deformación unitaria natural isotrópica se expresa de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_v}{3} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} = \frac{\varepsilon_a + 2\varepsilon_r}{3}$$

**2.1-4**

Considerando lo anterior, se denomina a  $e_a$  y  $e_r$  como las deformaciones desviadora natural axial y radial respectivamente.

$$e_a = \varepsilon_a - \varepsilon$$

**2.1-5**

$$e_r = \varepsilon_r - \varepsilon$$

**2.1-6**

Siendo que:

$$e_a + 2e_r = 0 \Rightarrow e_r = -\frac{1}{2}e_a$$

**2.1-7**

entonces la deformación natural general al cortante (Juárez – Badillo, E. 1974), se expresa como:

$$\eta = \varepsilon_a - \varepsilon_r = (e_a + \varepsilon) - (e_r + \varepsilon) = e_a - e_r$$

**2.1-8**

y finalmente sustituyendo la ecuación 2-7 en la ecuación. 2-8 se tiene que:

$$\eta = e_a + \frac{1}{2}e_a = \frac{3}{2}e_a$$

**2.1-9**

Durante la prueba, el esfuerzo desviador varía de 0 a  $x_f$  al mismo tiempo que, la relación  $x_1/x_3$  que representa la forma de la probeta varía de  $x_{10}/x_{30}$  a cero. Estas relaciones cambian durante la aplicación del esfuerzo desviador, donde el máximo esfuerzo cortante es

$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ . Definido por:

$$x = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{c0}}$$

**2.1-10**

$$x_f = \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{c0}} \right)_f$$

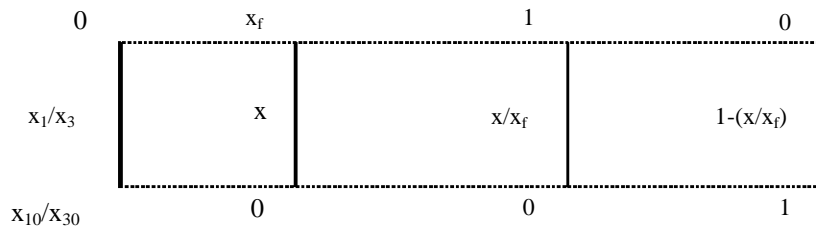
**2.1-11**

donde:

$x_f$  es la  $x$  final a  $e_a = \infty$

Hasta aquí ambos dominios están incompletos, puesto que son finitos. Los valores cero de las variables antes mencionadas no coinciden; es decir, las funciones propias que se han comentado deben ser congruentes.

De aquí que se requiera encontrar una función propia de una de ellas que sea congruente con la otra variable con el fin de que se relacionen. Procediendo como lo muestra el siguiente esquema (Fig. 2-3):



**Fig. 2-2: Esquema para encontrar las funciones propias.**

En la Fig. 2-2 se hace la consideración de que  $x_1/x_3$  sea la variable propia y al mismo tiempo sea una función propia; con esto se establece que la función propia es  $1-(x/x_f)$ , para la variable propia "x".

De esta manera, se tiene que la relación entre ambas funciones, teniendo presente el principio de proporcionalidad natural es:

$$\frac{d\left(\frac{x_1}{x_3}\right)}{\left(\frac{x_1}{x_3}\right)} = -\mu \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{2\sigma_{c0}} \left(1 - \frac{x}{x_f}\right)^\nu$$

**2.1-12**

Donde  $\mu$  es el “coeficiente cortante” y  $\nu$  “exponente cortante”, que son propiedades o parámetros del geomaterial.

Del primer miembro de la ecuación (2-12), se obtiene:

$$\frac{d\left(\frac{x_1}{x_3}\right)}{\left(\frac{x_1}{x_3}\right)} = \frac{x_3 dx_1 - x_1 dx_3}{x_1 x_3} = \frac{dx_1}{x_1} - \frac{dx_3}{x_3} = d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3 = de_1 - de_3 = d\eta$$

**2.1-13**

donde:

$\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  = deformaciones naturales correspondientes

$e_1$  y  $e_3$  = deformaciones naturales desviadoras correspondientes

$\eta$  = deformación natural general al cortante.

Introduciendo la ecuación (2-13) dentro de la ecuación (2-12) se obtiene:

$$d\eta = -\mu \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{2\sigma_{c0}} \left(1 - \frac{x}{x_f}\right)^\nu$$

**2.1-14**

Esta ecuación tiene la virtud de describir el comportamiento de la deformación desviadora, de los materiales que se suponen como elásticos lineales cuando  $\nu=0$  (caso del acero).

Para el caso de los suelos, podemos retomar la ecuación 2-14 introduciendo en ésta, la ecuación [2-9](#) en forma diferencial para finalmente obtener:

$$\frac{3}{2} de_a = -\mu \frac{\frac{dx}{2}}{\left(1 - \frac{x}{x_f}\right)^v}$$

**2.1-15**

Esta ecuación a su vez la podemos reescribir considerando que la relación entre el esfuerzo desviador normalizado y el esfuerzo desviador final normalizado sea,

$$y = \frac{x}{x_f}$$

**2.1-16**

De acuerdo con esto, se tiene que:

$$\frac{3}{2} de_a = -\mu \frac{\frac{dx}{2}}{(1-y)^v}$$

**2.1-17**

Ahora se despeja  $de_a$  como se muestra

$$de_a = -\frac{2}{3} \mu \frac{\frac{dx}{2}}{(1-y)^v} = -\frac{1}{3} \mu \frac{dx}{(1-y)^v}$$

**2.1-18**

Aprovechando que la ecuación [2-16](#) está en función de  $y$  podemos introducir  $dy$  en lugar de  $dx$ , consiguiendo de esta forma:

$$dy = \frac{dx}{x_f} \Rightarrow dx = dyx_f$$

**2.1-19**

Sustituyendo finalmente la ecuación 2-19 en la ecuación [2-18](#) se llega a:

$$de_a = -\frac{1}{3} \mu x_f \frac{dy}{(1-y)^v}$$

**2.1-20**

La integración de la ecuación anterior, nos conduce para cualquier valor positivo de  $\nu$ , excepto cuando  $\nu = 1$ , a la siguiente expresión:

$$e_a = -\frac{1}{3} \mu x_f \frac{1}{\nu - 1} \left[ \frac{1}{(1 - y)^{\nu - 1}} - 1 \right]$$

2.1-21

Para el caso particular de  $\nu = 1$ , la integración resulta ser:

$$e_a = \frac{1}{3} \mu x_f \ln(1 - y)$$

2.1-22

La figura 2-3 muestra los tipos de curva para diferentes valores de  $\nu$ .

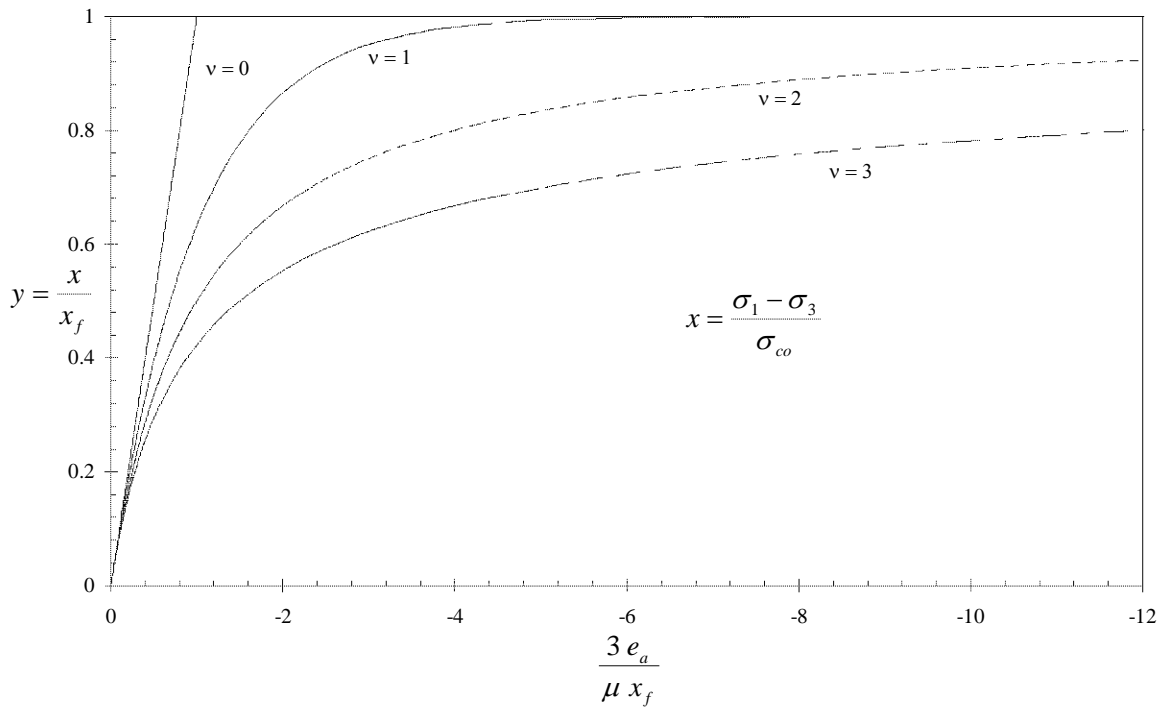


Fig. 2-3 . Curvas deformación natural – esfuerzo desviador para distintos valores de  $\nu$ .

Las ecuaciones anteriores son validas para pruebas de compresión, en caso de pruebas de extensión los signos se invierten



### 2.1.2.1 Ecuaciones generales para las relaciones esfuerzo desviador – deformación unitaria para arcillas preconsolidadas.

Para tratar de explicar cómo se presenta el fenómeno de preconsolidación, en la figura 2-4 se esquematiza las curvas que se obtienen de una prueba de compresibilidad estándar, en donde se visualiza la curva de compresión virgen y la curva de expansión en escala normal. Estas curvas se obtienen después de que la probeta de arcilla se somete a presiones isotrópicas crecientes en la cámara triaxial, siendo  $V$  su volumen para una presión  $\sigma$ .

Si se considera una ley de compresibilidad semejante a la de los gases, donde el producto  $V \cdot \sigma = \text{cte.}$  (ley de Boyle) se tiene:

$$dV \cdot \sigma + V \cdot d\sigma = 0$$

2.1-23

de donde:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\sigma}{\sigma}$$

2.1-24

en los suelos se considera una ley de forma análoga, sólo que la ecuación es matizada por un coeficiente de proporcionalidad  $0 < \gamma < 1$ ; obteniendo:

$$\frac{dV}{V} = -\gamma \frac{d\sigma}{\sigma}$$

2.1-25

donde:  $\gamma$  = coeficiente de compresibilidad de la arcilla menor que la unidad.

Integrando la ecuación anterior se llega a:

$$\ln \frac{V}{V_0} = -\gamma \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

2.1-26

de donde:

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma}$$

2.1-27

De esta forma podemos expresar los cambios volumétricos en función de la relación de vacíos:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1+e}{1+e_0}$$

**2.1-28**

sustituyendo en la ecuación 2-27 se tiene

$$\frac{1+e}{1+e_0} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma}$$

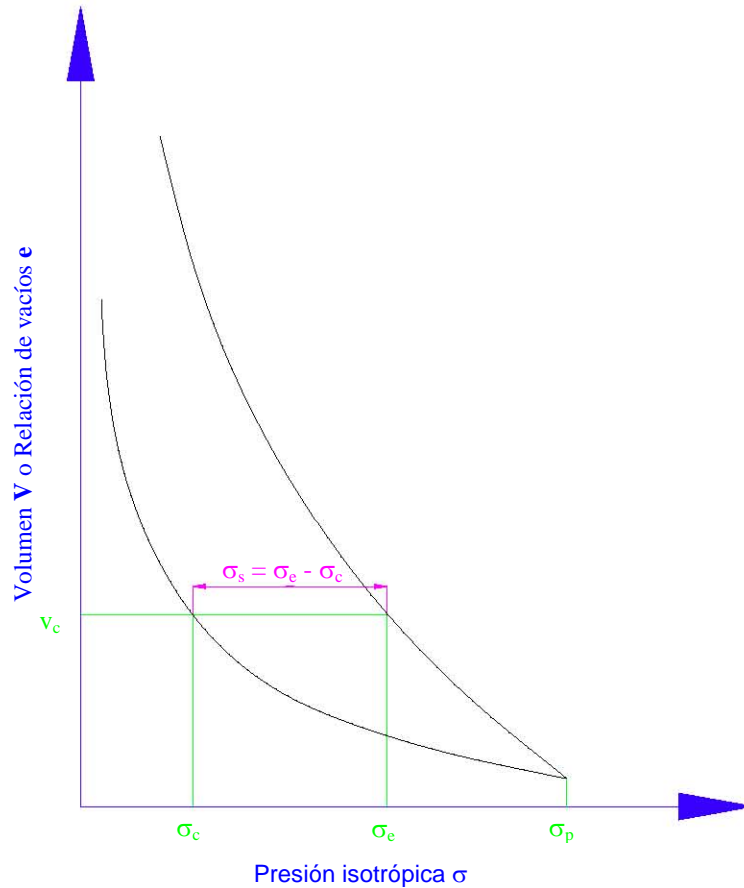
**2.1-29**

Si despejamos de la ecuación [2-26](#) el coeficiente de compresibilidad  $\gamma$  se obtiene:

$$\gamma = - \frac{\ln \frac{V}{V_0}}{\ln \frac{\sigma}{\sigma_0}}$$

**2.1-30**

Ahora, podemos hacer que la presión isotrópica disminuya después de alcanzar la presión máxima  $\sigma_p$ , consiguiendo con esto que la probeta de arcilla se expanda como se muestra en la curva de expansión (figura 2-4)



**Fig. 2-4: Esfuerzos implicados en el fenómeno de preconsolidación.**

Si se postula una ley de expansión, tal que al disminuir la presión isotrópica el suelo no libera toda la energía de deformación causada por el incremento de presión en el proceso de carga, es decir, sólo una fracción de esa energía es utilizada en el proceso de expansión y el resto se almacena en la estructura de la arcilla. En el proceso de descarga la cantidad  $dV/V$  está gobernada por una fracción  $\rho < 1$  de la relación  $d\sigma/\sigma$

$$\frac{dV}{V} = -\gamma \left( \rho \frac{d\sigma}{\sigma} \right) = -\gamma\rho \frac{d\sigma}{\sigma}$$

**2.1-31**

De esta forma podemos escribir  $\gamma_p = \gamma\rho$ , donde  $\rho$  es la relación de expansibilidad-compresibilidad. Con estas interpretaciones podemos decir que el suelo se expande según la misma curva de compresibilidad y que cuando el suelo tiene un volumen  $V_c$  a una presión isotrópica  $\sigma_c$  en la curva de expansión, la realidad es que la presión que soporta la estructura de la arcilla es una presión equivalente  $\sigma_e$  en la curva virgen de compresibilidad y no  $\sigma_c$ ; de esta forma la estructura de la arcilla almacena una presión  $\sigma_s$  que es igual a:

$$\sigma_s = \sigma_e - \sigma_c$$

**2.1-32**

obteniendo:

$$\frac{dV}{V} = -\gamma \frac{d\sigma_e}{\sigma_e}$$

**2.1-33**

en donde  $\sigma_e$  es la presión equivalente en la rama virgen de compresibilidad.

La siguiente expresión liga las presiones equivalentes con las presiones de consolidación  $\sigma_c = \sigma$

$$\frac{d\sigma_e}{\sigma_e} = \rho \frac{d\sigma}{\sigma}$$

**2.1-34**

Integrando esta ecuación se obtiene

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\rho$$

**2.1-35**

Como se observa en la figura [2-4](#), las dos curvas se interceptan en el mismo punto es decir en la carga de preconsolidación  $\sigma_p$  entonces  $\sigma_{e0} = \sigma_0 = \sigma_p$  y podemos escribir la ecuación anterior como:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_p} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_p} \right)^\rho$$

**2.1-36**

$\sigma_p / \sigma_c$  es el grado de preconsolidación y  $\sigma_e / \sigma_c$  se le denomina factor de preconsolidación, es decir

$$OCF = \frac{\sigma_{e0}}{\sigma_{c0}} = \left( \frac{\sigma_{p0}}{\sigma_{c0}} \right)^{1-\rho} = (OCR)^{1-\rho}$$

2.1-37

en donde

$\sigma_{e0}$  = esfuerzo equivalente inicial de consolidación

$\sigma_{p0}$  = esfuerzo de preconsolidación inicial

Una vez definidas las relaciones anteriores, se establecen en lo que sigue, las relaciones esfuerzo desviador – deformación para las arcillas preconsolidadas.

Considerando la zona del pre-pico de la curva esfuerzo – deformación se obtiene para  $\nu = 1$

$$e_a = \frac{1}{3} \mu x_f \frac{1}{OCF} \ln \left( 1 - \frac{x}{x_f} \right)$$

2.1-38

, para una prueba de extensión el signo de la ecuación anterior se invierte, donde

$$x = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{c0}}$$

Si despejamos el valor de  $x$  en la ecuación 2-38, se tiene:

$$x = x_f \left( 1 - e^{-\frac{3 * OCF * e_a}{\mu * x_f}} \right)$$

2.1-39

Con esta expresión podemos construir la curva teórica esfuerzo-deformación.

Para la zona del pre-pico se tiene, para  $\nu = 2$ :

$$x = x_f \left[ 1 - \left( 1 + \{1 - \nu\} \frac{-3e_a \sqrt{OCF}}{\mu x_f} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} \right]$$

2.1-40

### 2.1.3 Ecuaciones generales de presión de poro y cambio de volumen en arcillas.

#### *Presión de poro.*

En una prueba triaxial no drenada (CU), el volumen de una probeta de arcilla saturada permanece constante durante la aplicación del esfuerzo desviador, ya que está impedido el drenaje del agua; si se le incrementa la presión exterior ( $\Delta\sigma$ ) en todas las direcciones se tendrá que  $\Delta\sigma_i = \Delta u$ , lo cual se puede expresar como:

$$\Delta u = \Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3}$$

2.1-41

Sin embargo si el cambio de esfuerzos no es isotrópico, se presenta una presión de poro adicional, debida a la perturbación ocasionada por el cambio de forma en la probeta, es decir, si la probeta se consolida a una presión  $\sigma_{c0}$ , la misma perturbación de la estructura de la arcilla hace que ya no pueda soportar esta presión  $\sigma_{c0}$  y entonces el agua debe de contribuir a soportarla en forma de presión de poro adicional, pero si en el instante de la falla de la probeta, el agua es quién ha tenido que ayudar aportando una fracción  $\alpha\sigma_{c0}$ ; considerando que  $\alpha < 1$ , entonces el incremento de presión de poro en el instante de la falla se obtiene como:

$$(\Delta u)_f = \left( \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} \right)_f + \alpha\sigma_{c0}$$

2.1-42

El incremento de la presión de poro ( $\Delta u$ ), durante la prueba se debe a dos razones; primero a la componente isotrópica de los esfuerzos aplicados y segunda, a la presión de poro adicional debida a la perturbación de la estructura por aplicación de esfuerzos cortantes.

A deformación infinita la presión adicional es  $\alpha\sigma_{c0}$ , y durante el transcurso de la prueba, será sólo una fracción del valor de ésta. Existe una función  $\gamma$  que multiplica a  $\alpha\sigma_{c0}$ , y que permite obtener dicha "fracción" en cada instante de la prueba; esta función  $\gamma$  recibe el nombre de "*función de sensibilidad*".

El nombre de función de sensibilidad, se le da precisamente por depender de la sensibilidad de la estructura de la arcilla bajo esfuerzos cortantes, además de que depende del grado de cambio de forma que ha sufrido la muestra, es decir, del estado de deformación tangencial.

Una forma de expresar esta función fue inicialmente mediante los esfuerzos cortantes, es decir

$$y = \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^\beta$$

2.1-43

Esta función debe tomar valores entre 0 y 1, es decir, cero al inicio de la prueba y uno al final cuando el suelo falla. El exponente  $\beta$  expresa la forma en que varía la presión de poro adicional, si esta variación resulta lineal en el transcurso de la prueba y además está en función de  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ , entonces  $\beta=1$ .

No obstante la experimentación ha demostrado que la variación no es lineal, dado que es afectada por la deformación tangencial en la parte final de la prueba más que en el inicio; y por esto el valor de  $\beta$  resulta ser mayor que la unidad.

$$\Delta u = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} + \alpha\sigma_{c0} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right)^\beta$$

2.1-44

Es conveniente, para fines prácticos expresar la ecuación anterior en forma adimensional; así la ecuación puede escribirse como:

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{c0}} = \frac{1}{3} \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{\sigma_{c0}} + \alpha \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right)^\beta$$

2.1-45

En el caso en que la componente isotrópica dependa únicamente del incremento en el esfuerzo vertical, es decir solo existe  $\Delta\sigma_1$ , se tiene que:

$$\sigma_1 = \sigma_{c0} + \Delta\sigma_1$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{c0}$$

por lo tanto:

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3 = 0$$

y

$$\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3}$$

y la ecuación 2-45 se expresa como sigue

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{c0}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_{c0}} \right) + \alpha \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right)^\beta$$

**2.1-46**

y en el instante mismo de la falla:

$$\left( \frac{\Delta u}{\sigma'_{c0}} \right)_f = \frac{1}{3} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_{c0}} \right)_f + \alpha$$

**2.1-47**

Similarmente, llamando siempre  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  a los esfuerzos principales mayor, intermedio y menor, si el tipo de prueba triaxial es de extensión en que se disminuya el esfuerzo vertical.

$$\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} = -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3}$$

Para el caso de la prueba de compresión realizada disminuyendo el esfuerzo lateral

$$\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} = -\frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

y para el caso de la prueba de extensión realizada aumentando el esfuerzo lateral

$$\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} = \frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

En el caso de la prueba de compresión en que la presión lateral se disminuya la mitad de lo que se aumenta la presión vertical se tiene que:

$$\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} = 0$$

lo cual también ocurre en el caso de la prueba de extensión en la que la presión lateral se incremente la mitad de lo que se disminuya la presión vertical. En estos casos la presión de poro se deberá únicamente al cambio de forma de la muestra, por ser nulo el incremento de presión isotrópica.



### ***Cambio de volumen.***

Considerando la ecuación integrada que evalúa el comportamiento de las arcillas bajo un estado de compresión isotrópica, la cual liga los cambios volumétricos con los cambios de presión isotrópica

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma}$$

**2.1-48**

Podemos afirmar que esta expresión es la que rige los cambios volumétricos de las arcillas, en una prueba drenada (CD), estableciendo que los esfuerzos isotrópicos  $\sigma$  se interpreten debidamente como los esfuerzos isotrópicos de consolidación de la probeta de arcilla.

En el apartado anterior se explica como la presión de poro se genera instantáneamente con la variación de los esfuerzos exteriores y que esto se debe primero, a un cambio de la componente isotrópica de los esfuerzos y segundo a una perturbación de la estructura de la arcilla causada por los esfuerzos cortantes y debido a que se permitía el drenaje, la muestra presentaba cambio de volumen por la disipación de la presión de poro.

Para el caso del cambio de volumen, se explica la interpretación que tiene el esfuerzo  $\sigma$  como un esfuerzo que ha consolidado a la muestra de volumen  $V$ , en donde  $\sigma$  es igual a todas las presiones de poro disipadas reales o virtuales; así, la ecuación [2-48](#) toma la forma:

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{\sigma_{c0} + \Delta u}{\sigma_{c0}} \right)^{-\gamma} = \left( 1 + \frac{\Delta u}{\sigma_{c0}} \right)^{-\gamma}$$

**2.1-49**

donde

$\sigma_{c0}$  = presión de consolidación inicial

$\Delta u$  = presión de poro disipada

Introduciendo la ecuación [2-44](#), relativa al cambio de presión  $\Delta u$ , en la ecuación 2-49 y considerando que en una prueba drenada la presión isotrópica de consolidación está cambiando durante la prueba, siendo en un instante dado igual a:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} + \Delta \sigma$$

**2.1-50**

Por otra parte, la resistencia drenada  $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ , es generalmente distinta de la resistencia no drenada  $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ ; con esto se puede considerar que la resistencia de la muestra va variando durante la prueba drenada del valor  $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$  al inicio de ella, al valor  $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$  al final de la misma. Entonces la función de influencia y estará dada por:

$$y = \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)'_f} \right]^\beta$$

**2.1-51**

donde  $(\sigma_1 - \sigma_3)'_f$  es igual a

$$(\sigma_1 - \sigma_3)'_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_u + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_d - (\sigma_1 - \sigma_3)_u}{(\sigma_1 - \sigma_3)_d} (\sigma_1 - \sigma_3)$$

**2.1-52**

De esta forma la presión de poro disipada ( $\Delta u$ ) en una prueba drenada la podemos escribir como

$$\Delta u = \Delta \sigma + \alpha (\sigma_{c0} + \Delta \sigma) \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)'_f} \right]^\beta$$

**2.1-53**

Y sustituyendo este valor en la ecuación [2-49](#), obtenemos la ecuación que rige el cambio de volumen

$$\frac{V}{V_0} = \left[ 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} + \alpha \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} \right) y \right]^{-\gamma}$$

**2.1-54**

en donde:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \Delta \sigma \\ V &= V_0 + \Delta V \end{aligned}$$

Así, la ecuación 2-54 la podemos describir como sigue

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \left[ 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} + \alpha \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} \right) y \right]^{-\gamma} - 1$$

2.1-55

### 2.1.3.1 Ecuaciones de presión de poro y cambio de volumen para arcillas preconsolidadas.

#### *Presión de poro.*

El cambio de forma que producen las deformaciones al cortante inducidas a su vez por los esfuerzos cortantes en la prueba triaxial ocasiona una perturbación de la estructura, que propicia la liberación del efecto de preconsolidación y esto ocasiona aumentos de volumen en pruebas drenadas y esfuerzos de tensión en el agua de poro en pruebas no drenadas. Lógicamente no toda la presión almacenada será liberada, solamente aquella correspondiente a la perturbación sufrida por la estructura de la arcilla que depende de las deformaciones al cortante que experimente, pudiéndose expresar como  $\alpha(\sigma_e - \sigma_c)$ .

El coeficiente  $\alpha$  es el mismo que se mencionó con anterioridad. A continuación se establece la ecuación del cambio de presión de poro final para arcillas preconsolidadas con alguna ligera modificación, respecto a la propuesta para arcillas N.C.:

$$(\Delta u)_f = \left( \frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3}{3} \right)_f + \alpha \sigma_{c0} \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} - \alpha (\sigma_{e0} - \sigma_{c0})$$

2.1-56

La ecuación 2-56 consta ahora de tres términos; el primero es la componente de la presión de poro debida al cambio de presión isotrópica exterior y este sumando no sufre alteración al aplicarse a las arcillas preconsolidadas; el segundo sumando es la componente de la presión de poro por perturbación de la estructura de la arcilla cuando ésta es normalmente consolidada, finalmente el último término representa el efecto de preconsolidación que tiene la arcilla. La ecuación 2-56 se puede escribir en forma adimensional considerando el coeficiente  $\alpha$  como factor común.

$$\left( \frac{\Delta u}{\sigma_{c0}} \right)_f = \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3}{\sigma_{c0}} \right)_f - \alpha \left( \frac{\sigma_{e0}}{\sigma_{c0}} - 1 - \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} \right)$$

2.1-57

Las ecuaciones definitivas para el cambio de presión de poro que se utilizaron en el presente trabajo, en pruebas de compresión triaxial aumentando el esfuerzo axial en arcillas preconsolidadas, considerando  $\nu=1$ , y para cualquier instante de la prueba son:

$$\frac{\Delta u}{\sigma_{c0}} = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \sigma_{c0}} + \alpha \left[ \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} - \left( \frac{\sigma_{e0}}{\sigma_{c0}} - 1 \right) \right] y = \frac{\Delta \sigma_i}{\sigma_{c0}} - \alpha \left[ \frac{\sigma_{e0}}{\sigma_{c0}} - 1 - \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} \right] y$$

2.1-58

donde

$$\frac{\Delta \sigma_i}{\sigma_{c0}} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{c0}} = \frac{x}{3}$$

2.1-59

Sustituyendo en la ecuación 2-58 las ecuaciones 2-59 y [2-39](#) obtenemos para la región del pre-pico

$$\frac{\Delta u}{\sigma_{c0}} = \frac{1}{3} x_f \left( 1 - e^{-\frac{3OCFe_a}{\mu x_f}} \right) - \alpha \left[ \frac{\sigma_{e0}}{\sigma_{c0}} - 1 - \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} \right] y$$

2.1-60

La función de sensibilidad ahora se expresa en términos de una relación de deformaciones desviadoras naturales.

$$y = \frac{1}{1 + \left( \frac{e_a}{e_a^*} \right)^{-\beta}}$$

2.1-61

donde

$e_a$  = Deformación desviadora natural

$e_a^*$  = Deformación desviadora natural característica para  $y = 0.5$

$\beta$  = coeficiente de presión de poro.

### ***Cambios de volumen.***

Los cambios volumétricos de las arcillas normalmente consolidadas o preconsolidadas bajo cualquier tipo de prueba drenada, se rigen por la siguiente expresión:

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma}$$

2.1-62

en donde se puede interpretar al esfuerzo  $\sigma$  como el esfuerzo al que se ha consolidado la muestra de volumen  $V$ , siendo  $\sigma$  igual a todas las presiones de poro disipadas, incluyendo las presiones de poro debidas a los esfuerzos cortantes. De esta forma la ecuación anterior (2-62) se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{\sigma_{c0} + \Delta u}{\sigma_{c0}} \right)^{-\gamma} = \left( 1 + \frac{\Delta u}{\sigma_{c0}} \right)^{-\gamma}$$

2.1-63

En esta expresión la presión de poro disipada, ha sido  $\Delta u$ , que representa la presión de poro que se ha ido disipando hasta una cierta etapa de la prueba. La ecuación (2-44) es la que da la presión de poro que se genera en una prueba triaxial no drenada. Para aplicarla en la expresión (2-63) deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones: en una prueba drenada la presión isotrópica de consolidación generalmente está cambiando durante la prueba, así para un instante dado la presión se evalúa de la siguiente forma:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} + \Delta \sigma$$

2.1-64

Por lo tanto en la ecuación (2-63) se debe escribir  $\sigma_c$  en lugar de  $\sigma_{c0}$ . Otra consideración es la resistencia drenada  $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ , que es distinta a la no drenada. La resistencia varía de tal forma que si se supone una variación lineal con el esfuerzo  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  se puede decir que la resistencia  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  es la que corresponde a un instante intermedio de la prueba en que actúa precisamente el esfuerzo  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ , caso de la ecuación (2-52). Por otra parte la disipación de la presión de poro en una prueba drenada esta dada por la ecuación (2-53).

Se asume que en una muestra preconsolidada isotrópicamente a una presión de consolidación  $\sigma_{c0}$  y presión de consolidación equivalente  $\sigma_{e0}$ , la presión a la que realmente está consolidada es a  $\sigma_{e0}$ ; el cambio  $\Delta \sigma_c$  en la presión  $\sigma_{c0}$  conduce a una nueva presión de consolidación  $\sigma_c = \sigma_{c0} + \Delta \sigma_c$ .

Al incremento  $\Delta \sigma_c$ , corresponde un incremento  $\Delta \sigma_e$  en la presión  $\sigma_{e0}$ , así la nueva presión de consolidación equivalente es  $\sigma_e = \sigma_{e0} + \Delta \sigma_e$ .

De esta forma, la componente de la presión de poro, debida a un cambio en la componente isotrópica de los esfuerzos, cuando se disipa, cambia el volumen de la muestra, pero condicionado en la medida del cambio  $\Delta \sigma_e$  de la presión equivalente.

Cabe aclarar que en estas teorías se hace la hipótesis, de que bajo esfuerzos isotrópicos, la curva de recompresión es la misma que la curva de expansión siempre y cuando no se

rebase la carga de preconsolidación,  $\sigma_p$ , ya que después de ésta el suelo se comprime siguiendo la curva virgen de compresión.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, la ecuación [2-62](#) se puede escribir en la forma siguiente:

$$\frac{V}{V_0} = \left\{ \frac{\sigma_e + \left[ \alpha \sigma_c \frac{\sigma_c}{\sigma_e} - \alpha (\sigma_e - \sigma_c) \right] y}{\sigma_{e0}} \right\}^{-\gamma}$$

**2.1-65**

La ecuación (2-65) corresponde a una prueba de compresión triaxial aumentando el esfuerzo axial.

A continuación se presenta la ecuación que se emplea en el cálculo del cambio volumétrico para este trabajo, considerando  $\nu = 1$  donde se incluyen las deformaciones.

$$\frac{\Delta V}{V} = \left\{ \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} \right)^\rho - \alpha \left[ \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} \right)^\rho - \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} \right) - \left( \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} \right)^2 \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} \right)^{2-\rho} \right] y \right\}^{-\gamma} - 1$$

**2.1-66**

donde las relaciones  $\Delta \sigma_c / \sigma_{c0}$  para el pre-pico se definen a continuación

$$\frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{c0}} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{c0}} = \frac{x}{3} = \frac{1}{3} x_f \left( 1 - e^{-\frac{30CFe_a}{\mu x_f}} \right)$$

**2.1-67**

### 3 ANÁLISIS DE DATOS.

La predicción teórica se hace mediante la aplicación del principio de proporcionalidad natural descrito en el capítulo anterior, para las curvas esfuerzo desviador vs. deformación axial desviadora natural ( $q, e_a$ ), presión de poro normalizada vs. deformación axial desviadora natural ( $\Delta u/\sigma_{co}, e_a$ ) y cambio volumétrico normalizado vs. deformación axial desviadora natural ( $\Delta V/V_0, e_a$ ); a su vez las ecuaciones que se derivan de dicho principio requieren de la determinación de los parámetros  $\nu, x_f, \mu, \gamma, \alpha, \beta$  y  $\rho$ . Para el estudio relativo al comportamiento de arcillas preconsolidadas es necesario conocer además, el factor de preconsolidación  $OCF$ , el cual se obtiene a partir del grado de preconsolidación (OCR).

Los parámetros  $\nu$  y  $\mu$  se determinaron mediante la aplicación de las ecuaciones

generales  $q - e_a$  para la zona del pre-pico, mientras que los coeficientes de presión de poro  $\alpha$  y  $\beta$  se calcularon a partir de las curvas  $\Delta u/\sigma_{c0} - e_a$ ; para el caso del cambio volumétrico es necesario conocer además, los parámetros  $\gamma$  y  $\rho$ .

La calidad del ajuste que se obtiene al reproducir cada una de las curvas experimentales, depende de la experiencia, de la creatividad pero sobre todo de la *sensibilidad*.

### 3.1 Aplicación de las ecuaciones generales.

De la ecuación (2-38), correspondiente a una prueba de compresión aumentando el esfuerzo vertical, se despeja el valor  $x$ , obteniéndose así, el valor de la función que describe el comportamiento del material en la región del pre-pico, la ecuación (2-39), es válida únicamente para  $\nu=1$ .

$$x = x_f \left( 1 - e^{-\frac{3 * OCF * e_a}{\mu * x_f}} \right)$$

2-39

Si el valor de  $\nu=2$ , entonces se utilizará la ecuación (2-40).

$$x = x_f \left[ 1 - \left( 1 + \{1 - \nu\} \frac{3e_a \sqrt{OCF}}{\mu x_f} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} \right]$$

2-40

En el caso específico de la evaluación de la presión de poro y el cambio volumétrico, sólo se utilizaron las expresiones que a continuación se escriben, (ecuaciones 2-58 y 2-66).

$$\frac{\Delta u}{\sigma_{c0}} = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \sigma_{c0}} + \alpha \left[ \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} - \left( \frac{\sigma_{e0}}{\sigma_{c0}} - 1 \right) \right] y = \frac{\Delta \sigma_i}{\sigma_{c0}} - \alpha \left[ \frac{\sigma_{e0}}{\sigma_{c0}} - 1 - \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} \right] y$$

2-58

$$\frac{\Delta V}{V} = \left\{ \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{e0}} \right)^\rho - \alpha \left[ \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{e0}} \right)^\rho - \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{e0}} \right) - \left( \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{e0}} \right)^2 \left( 1 + \frac{\Delta \sigma_c}{\sigma_{e0}} \right)^{2-\rho} \right] y \right\}^{-\gamma} - 1$$

2-66



### 3.1.1 Proceso de ajuste para las curvas esfuerzo vs. deformación en pruebas CU y CD.

El proceso de ajuste de las curvas esfuerzo vs. deformación, experimentales, tanto en las pruebas CU como en las pruebas CD es muy similar.

#### 3.1.1.1 Región del Pre – pico.

La deformación axial desviadora natural ( $e_a$ ) se define mediante una serie de incrementos a partir de una deformación de referencia. Si es el caso de la aplicación de la ecuación (2-39) se tienen que obtener los datos conocidos tales como el esfuerzo desviador final ( $x_f$ ) normalizado con el esfuerzo de confinamiento inicial, el coeficiente cortante ( $\mu$ ) y el factor de preconsolidación ( $OCF$ ).

Primero se propone el valor de  $x_f$ , con lo que se acota el esfuerzo desviador, posteriormente se supone un valor de  $\mu$  que es la pendiente de inicio en la curva ( $q, e_a$ ), después de variar  $x_f$  y  $\mu$ , éstos parámetros se fijan cuando se tiene una tendencia definida de la pendiente de inicio y se observa que la curva siga los puntos experimentales.

En el caso específico de que se tenga que utilizar el valor de  $\nu = 2$ , la ecuación (2-40) se evaluará de manera similar que en el caso anterior, es aquí donde se comprueba la sensibilidad del factor de preconsolidación ( $OCF$ ).

### 3.1.2 Proceso de ajuste para las curvas de presión de poro normalizadas con $\sigma'_{c0}$ .

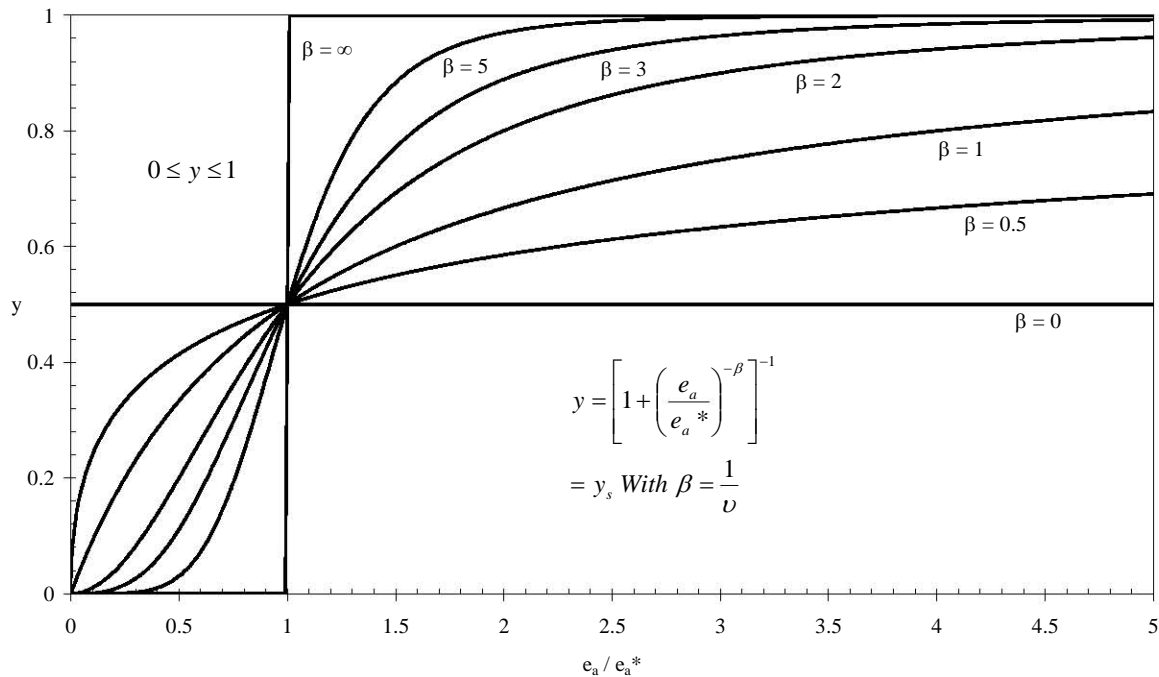
La expresión que se utilizó en el ajuste de las curvas de presión de poro es la (2-58), en la cual, intervienen la función de sensibilidad  $y$ , ecuación (2-61). En la ecuación (2-58) la componente isotrópica corresponde a una prueba triaxial en compresión, esto es  $\Delta\sigma_i = 1/3 (\sigma_1 - \sigma_3 / \sigma_{c0})$ .

Los datos que se requieren son:  $\alpha$  y  $OCF$ , el parámetro ( $\alpha \leq 1$ ), y los parámetros a determinar son la deformación axial desviadora natural característica ( $e_a^*$ ), y el coeficiente de presión de poro ( $\beta$ ).

Al sustituir los parámetros antes mencionados en la ecuación (2-58), se tienen que tomar en cuenta ciertos aspectos, los cuales darán un ajuste aproximado al comportamiento experimental. Es conveniente dibujar dentro de la gráfica de la curva experimental, la curva que corresponde a la parte isotrópica de los datos experimentales; posteriormente cuando ya se han introducido los parámetros en la ecuación que rige el comportamiento, se visualiza la tendencia de la curva teórica y se pueden comenzar a variar los parámetros, primero el parámetro ( $\alpha$ ), este no debe ser mayor a la unidad como anteriormente se mencionó; cabe resaltar que cuando  $\alpha = 0$  el comportamiento del material queda descrito únicamente por la parte isotrópica.

La deformación axial característica ( $e_a^*$ ), se obtiene a partir de la diferencia entre el valor de la ordenada máxima de la curva experimental y la isotrópica experimental, este valor

dividido entre dos se mide entre ambas curvas hasta obtener la intersección que permite leer en el eje de las abscisas el valor de  $e_a^*$  al que corresponde, posteriormente este valor se puede incrementar o disminuir para ajustar la curva teórica. El parámetro que se recomienda ajustar por último es  $\beta$ , apoyándose en la figura 3-1, correspondiente a la función de sensibilidad  $y$ ; primero se visualiza la tendencia de la curva y se escoge el valor de  $\alpha$  a ensaye y error, hasta conseguir el mejor ajuste.



**Fig. 3-1: Función de sensibilidad.**

### 3.1.3 Proceso de ajuste para las curvas de cambio de volumen ( $\Delta V/V_0$ ).

El proceso de ajuste de las curvas del cambio volumétrico es muy similar a lo explicado en el caso de la presión de poro, la expresión que se utiliza es la ecuación (2-66). Esta ecuación toma en cuenta la componente de la parte isotrópica, los parámetros que se varían en esta ecuación son: ( $\alpha$ ) en primer lugar, a continuación se podrán determinar  $e_a^*$  y  $\beta$ , los parámetros  $\gamma$  y  $\rho$  que tienen cierta correlación y son muy sensibles al factor de preconsolidación  $OCF$  se determinaran al final.

Para obtener un buen ajuste en cada uno de los casos (presión de poro y cambio volumétrico), es necesario mantener fijos los parámetros  $v$ ,  $x_f$  y  $\mu$  que se consideraron en el momento de ajustar la curva esfuerzo desviador vs. deformación desviadora natural.

### 3.2 Comparaciones teórico – experimentales.

Con los procedimientos de ajuste descritos anteriormente, se ajusta cada una de las curvas experimentales mediante la aplicación de las ecuaciones generales de comportamiento,

derivadas del Principio de Proporcionalidad Natural, para los casos esfuerzo desviador vs. deformación axial desviadora natural, presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ ) y cambio volumétrico vs. ( $e_a$ ).

### 3.2.1 *Arcilla de Weald.*

Las pruebas triaxiales realizadas en la arcilla de Weald fueron efectuadas en el Imperial Collage de la Universidad de Londres, bajo la dirección del Profesor D.J. Henkel (Henkel, D.J. 1960).

Las muestras cilíndricas de arcilla de 3 pulgadas de largo y 1 ½ pulgadas de diámetro fueron formadas en un molde de latón y en la mayoría de los casos las muestras fueron consolidadas en una celda triaxial bajo presión hidrostática. Esta presión vario entre 15 y 120 lb / in<sup>2</sup> y usualmente en un solo incremento. Las muestras preparadas de esta manera fueron consideradas esencialmente normalmente consolidadas.

Con el objeto de inducir un cierto grado de preconsolidación en las probetas de arcilla, una vez consolidadas estas bajo una cierta presión hidrostática, se descargaron a un valor predeterminado de la presión hidrostática.

Las pruebas de compresión y de extensión fueron realizadas usando diferentes trayectorias de esfuerzos, es decir variando los esfuerzos axiales como los radiales y pruebas manteniendo constante el promedio de los tres esfuerzos principales.

Los valores obtenidos en los límites de Atterberg para la arcilla de Weald fueron:

$$LL = 43$$

$$LP = 18$$

De análisis anteriores (Juárez-Badillo, E. 1975) se ha encontrado que para la arcilla de Weald el valor de  $\gamma = 0.06$  y el de  $\gamma_p = 0.02$  y un  $\rho = 1/3$ .

#### 3.2.1.1 *Pruebas CU (Consolidadas No Drenadas).*

En las figuras 3-7 a 3-30 se muestran las curvas experimentales de la arcilla de Weald obtenidas en el Imperial College de la Universidad de Londres por D.J. Henkel y las curvas teóricas obtenidas por el Principio de Proporcionalidad Natural para el comportamiento esfuerzo desviador vs. deformación axial desviadora natural ( $e_a$ ) y presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ ).

Los ajustes mostrados fueron obtenidos por los Drs. E. Juárez Badillo y Rigoberto Rivera Constantino en junio de 2004 para un artículo de Geotechnic.

Como se puede ver las pruebas fueron realizadas en especímenes con grados de preconsolidación ( $OCR$ ) iguales a 1, 2, 4, 8, 12 y 24. En el recuadro de datos de cada una de

las graficas, el parámetro exponente  $v$  es igual a dos y se aplicó la función normal en la región del pre – pico debido a que ninguna de las curvas mostró una falla de pico. En la tabla 3-1 se muestra el valor de los parámetros  $v$ ,  $\mu$  y  $x_f$  obtenidos para cada uno de los especimenes, además del valor del  $OCR$  y el factor de preconsolidación ( $OCF$ ) y en las figuras 3-2 a 3-3, se muestran los valores de forma grafica respecto al factor de preconsolidación.

Como mencionamos con anterioridad el comportamiento de la presión de poro, esta regido por tres componentes (Ec. 2.1-58), la componente isotrópica, siempre creciente correspondiendo a la mayor resistencia de la arcilla, variando de  $1/3$  a  $-1/3$  dependiendo si se trata de una prueba de compresión axial o de extensión axial y de  $2/3$  aumentando el esfuerzo radial a  $-2/3$  disminuyendo el esfuerzo radial, la componente debida a la “consolidación normal”, que decrece al crecer el grado de preconsolidación, la cual es siempre positiva para todo tipo de prueba y la componente debida a la preconsolidación, la cual crece de manera importante al crecer el  $OCR$ , la cual es siempre negativa para todo tipo de prueba, esta componente debida a la perturbación de la estructura de la arcilla es la principal responsable de que a partir de cierto grado de preconsolidación la presión de poro resultante sea negativa (Juárez Badillo y Rico Rodríguez Tomo 1).

**Tabla 3-1: Parámetros para obtener las curvas Esfuerzo desviador axial vs. ( $e_a$ )**

Prueba	OCR	OCF	$v$	$\mu$	$x_f$
Axial Incrementado	1.0	1.0	2	0.044	0.61
	2.0	1.6	2	0.046	0.95
	4.0	2.5	2	0.052	1.42
	8.0	4.0	2	0.060	2.06
	12.0	5.2	2	0.070	2.49
	24.0	8.3	2	0.095	3.32
Axial Disminuido	1.0	1.0	2	0.022	0.49
	2.0	1.6	2	0.024	0.82
	4.0	2.5	2	0.032	1.26
	8.0	4.0	2	0.046	1.83
	12.0	5.2	2	0.059	2.35
	24.0	8.3	2	0.090	3.34

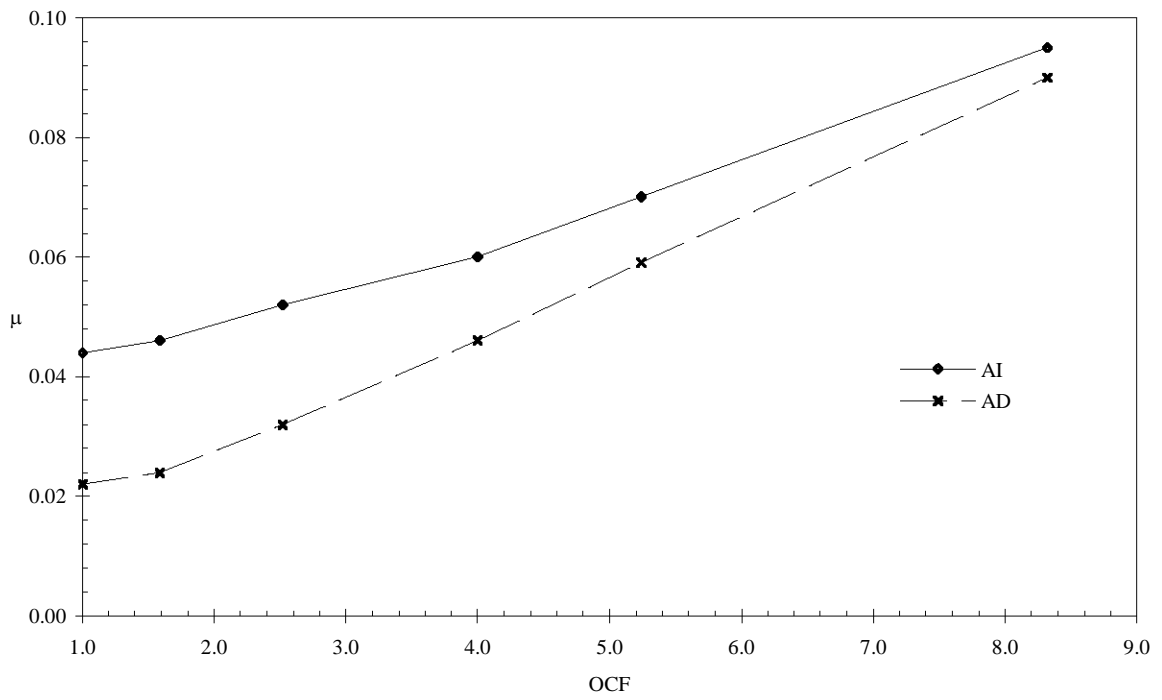


Fig. 3-2: Variación del parámetro  $\mu$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=2$ .

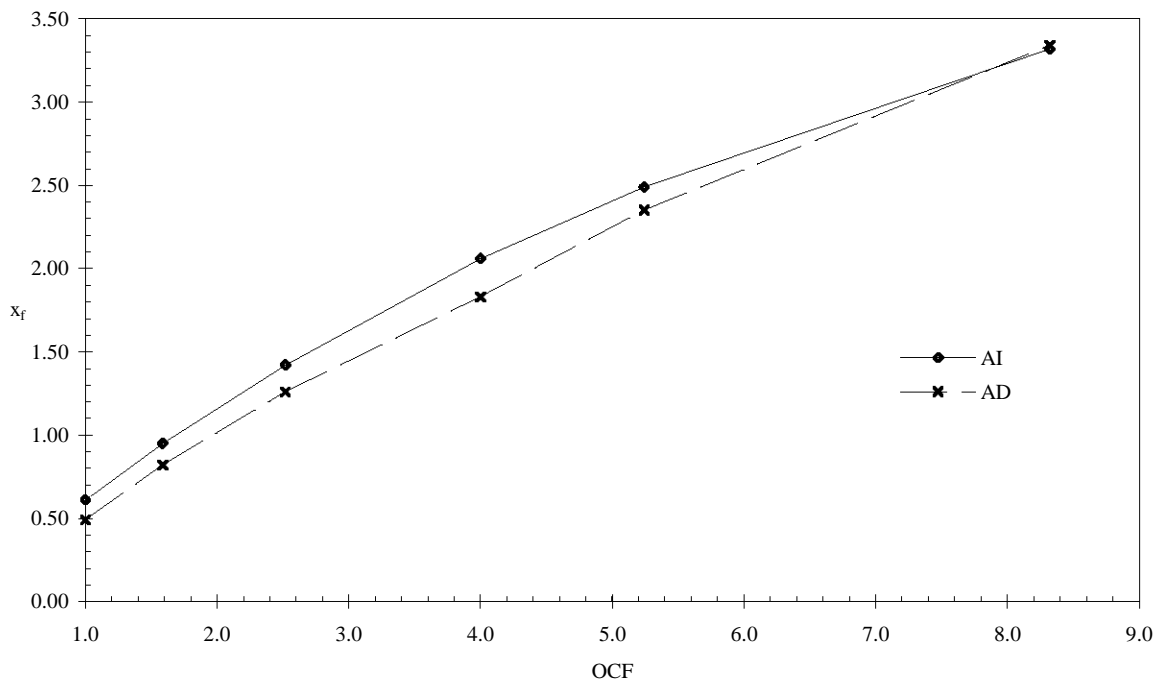


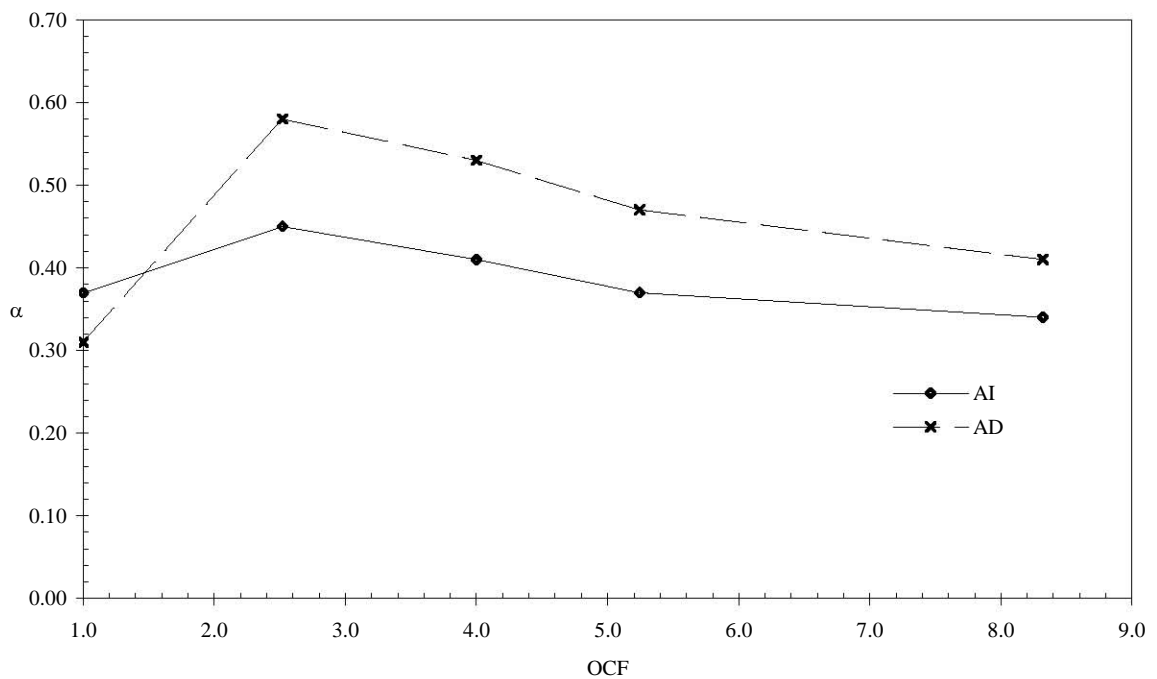
Fig. 3-3: Variación del parámetro  $x_f$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=2$ .

En las tablas 3-2 y en las figuras 3-4 a 3-6 se muestran los valores de los parámetros encontrados para la obtención de las curvas de presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ ), para un valor de  $\nu = 2$ .

**Tabla 3-2: Parámetros para obtener las curvas Esfuerzo desviador axial vs. ( $e_a$ )**

Prueba	OCR	OCF	$\alpha$	$\beta$	$e_a^*$
Axial Incrementado	1.0	1.0	0.37	1.5	-0.021
	2.0	1.6	*	-	-
	4.0	2.5	0.45	1.5	-0.038
	8.0	4.0	0.41	1.5	-0.048
	12.0	5.2	0.37	1.5	-0.056
	24.0	8.3	0.34	1.5	-0.100
Axial Disminuido	1.0	1.0	0.31	1.5	0.012
	2.0	1.6	*	-	-
	4.0	2.5	0.58	1.5	0.018
	8.0	4.0	0.53	1.5	0.034
	12.0	5.2	0.47	1.5	0.041
	24.0	8.3	0.41	1.5	0.060

\*Nota: El segundo termino en la ecuación de presión de poro es igual a cero si  $OCF = 1.6180$  ( $OCR = 2.06$ )



**Fig. 3-4: Variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $OCF$  para  $\nu = 2$ .**

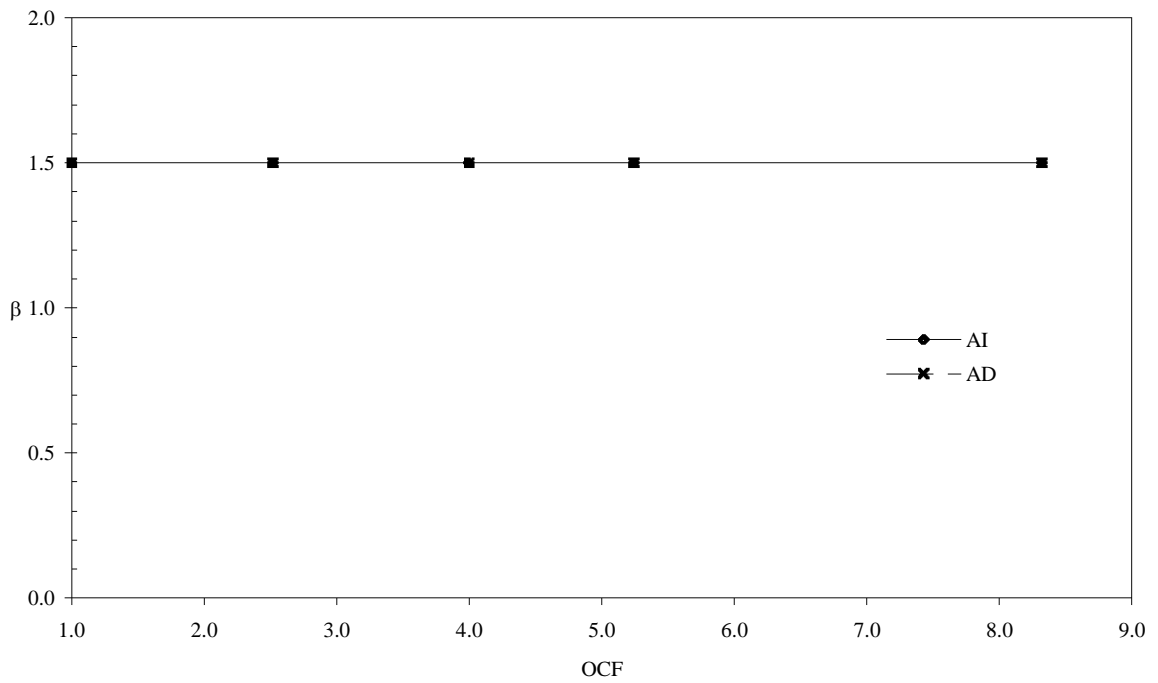


Fig. 3-5: Variación del parámetro  $\beta$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=2$ .

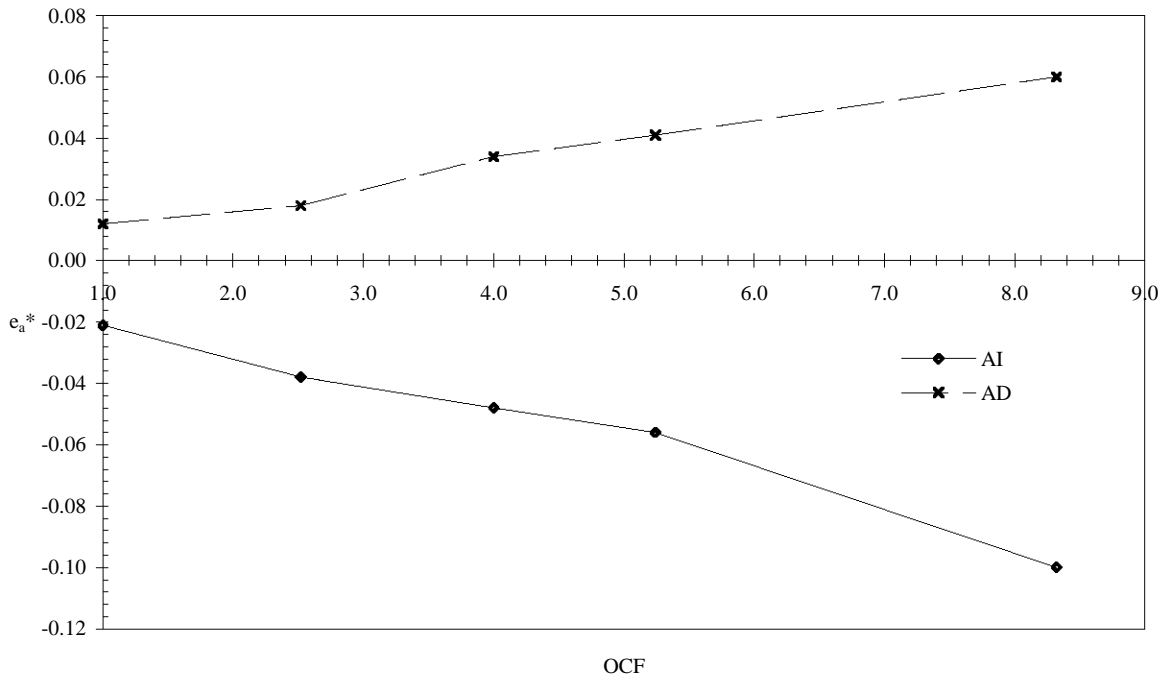


Fig. 3-6: Variación del parámetro  $e_a^*$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=2$ .

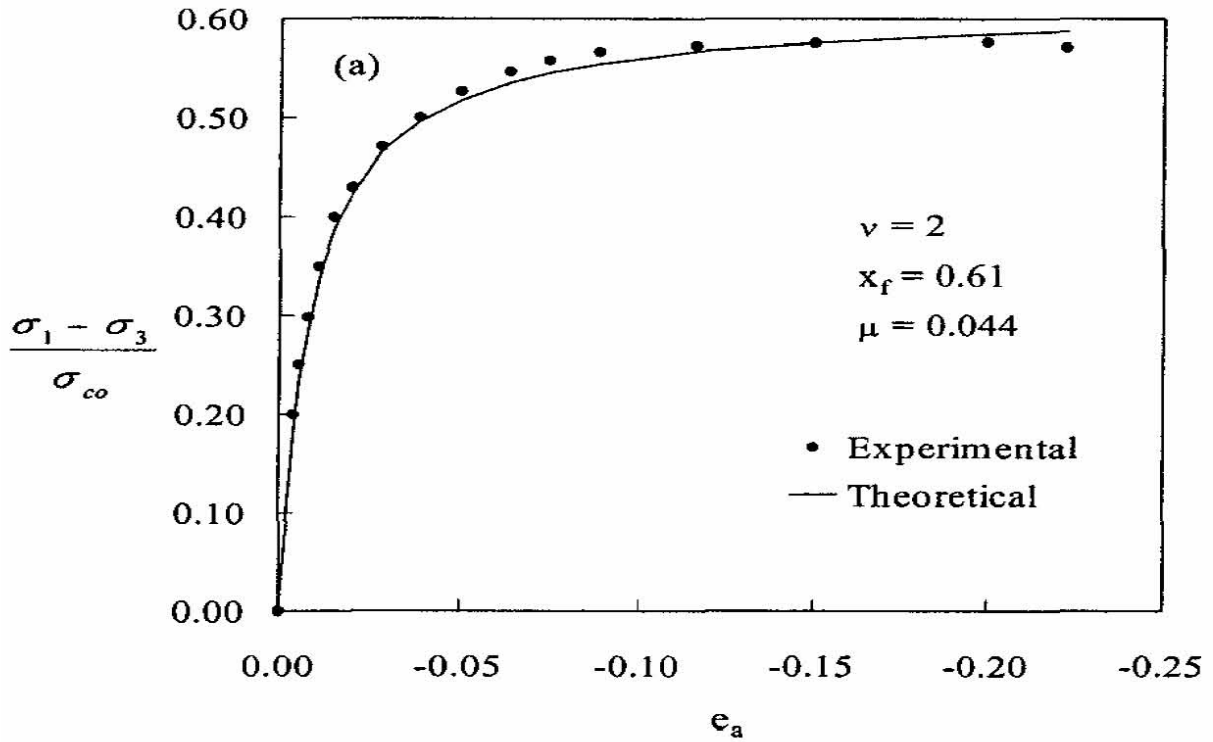


Fig. 3-7: Curva Esfuerzo - Deformación (AI) OCR = 1

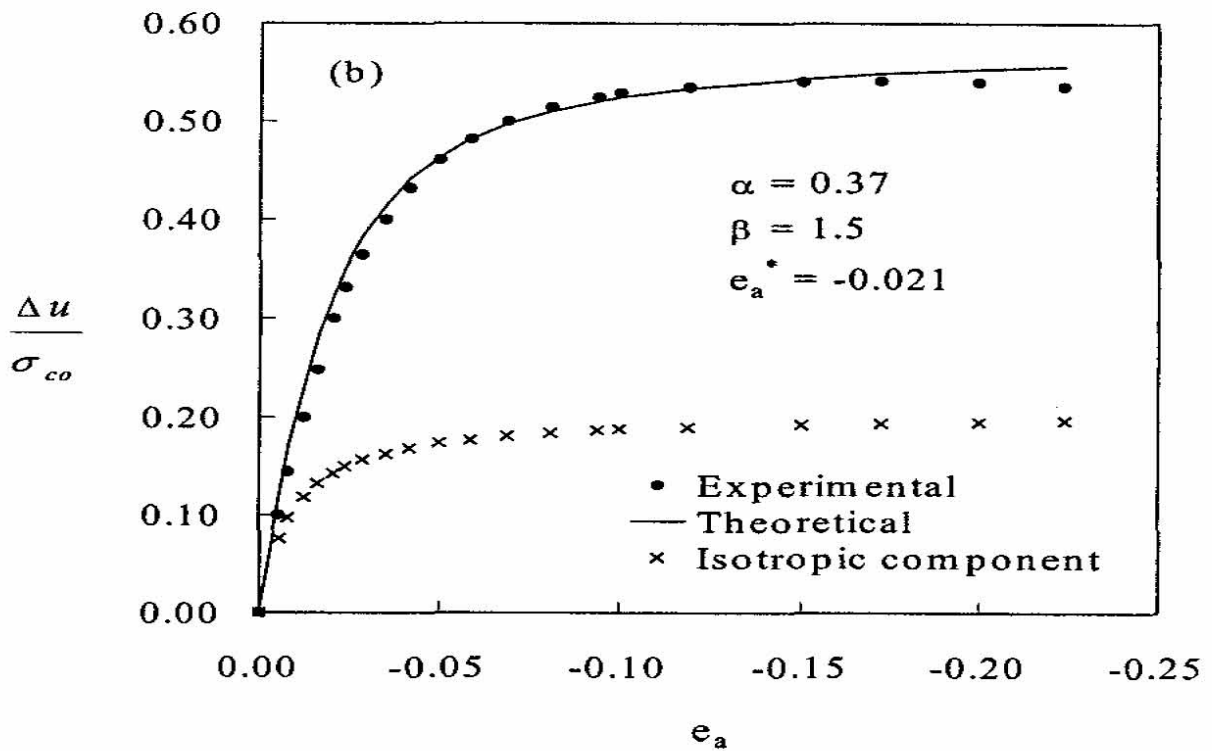


Fig. 3-8: Curva Presión de poro (AI) OCR = 1



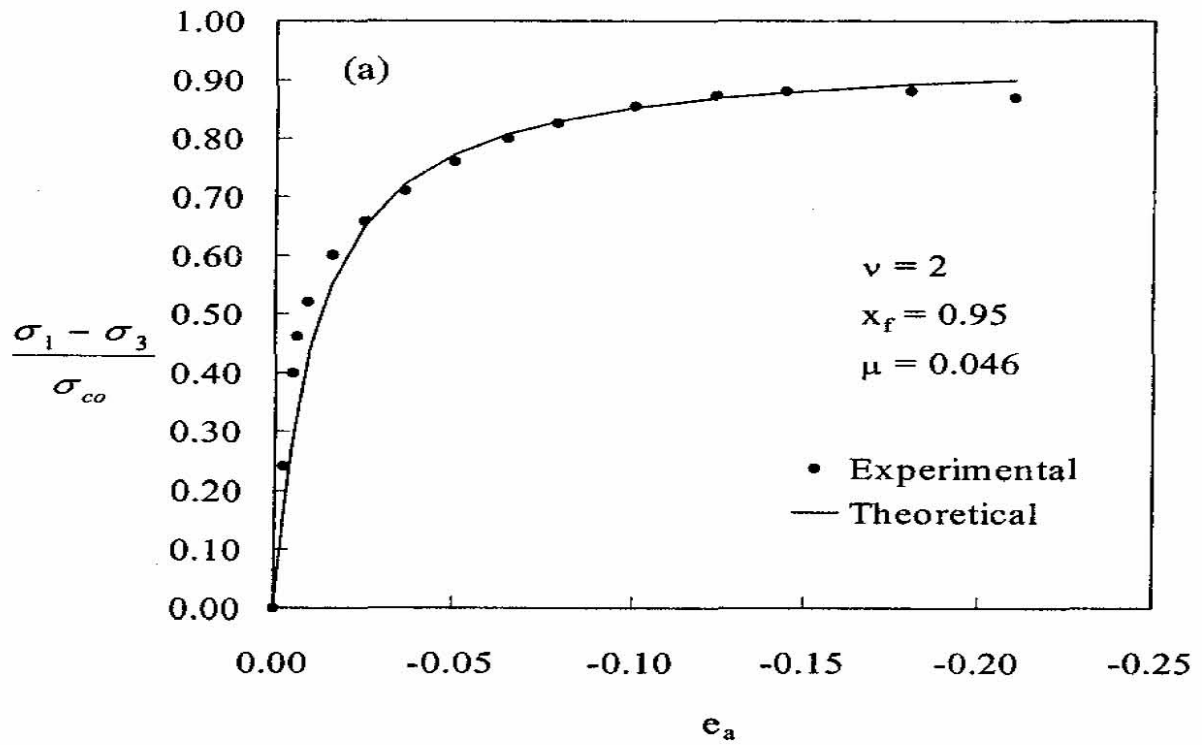


Fig. 3-9: Curva Esfuerzo - Deformación (AI) OCR = 2

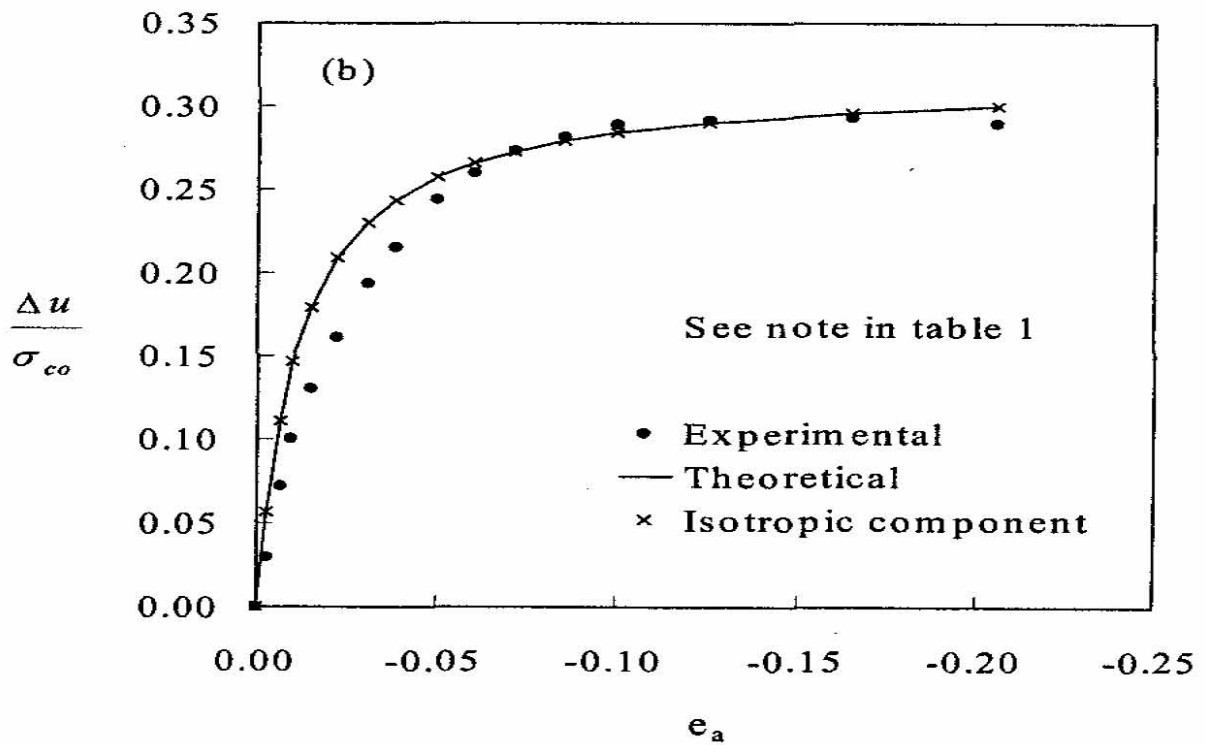


Fig. 3-10: Curva Presión de poro (AI) OCR = 2

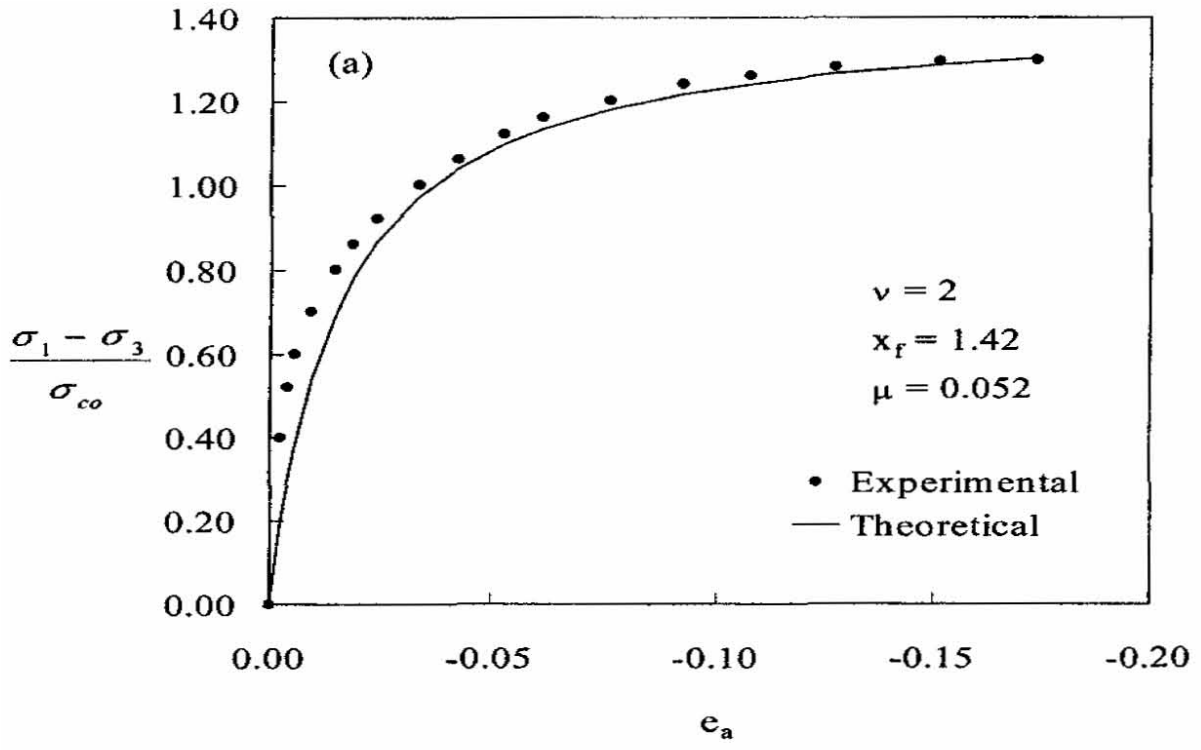


Fig. 3-11: Curva Esfuerzo - Deformación (AI) OCR = 4

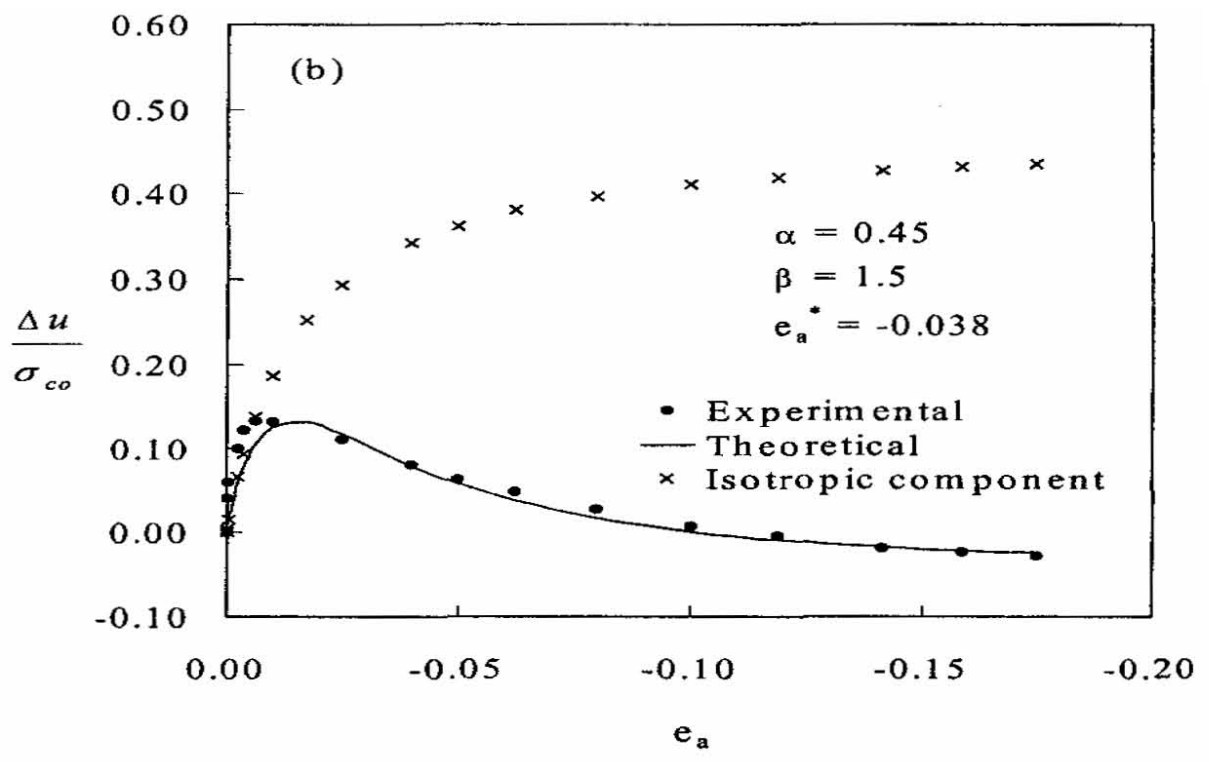


Fig. 3-12: Curva Presión de poro (AI) OCR = 4

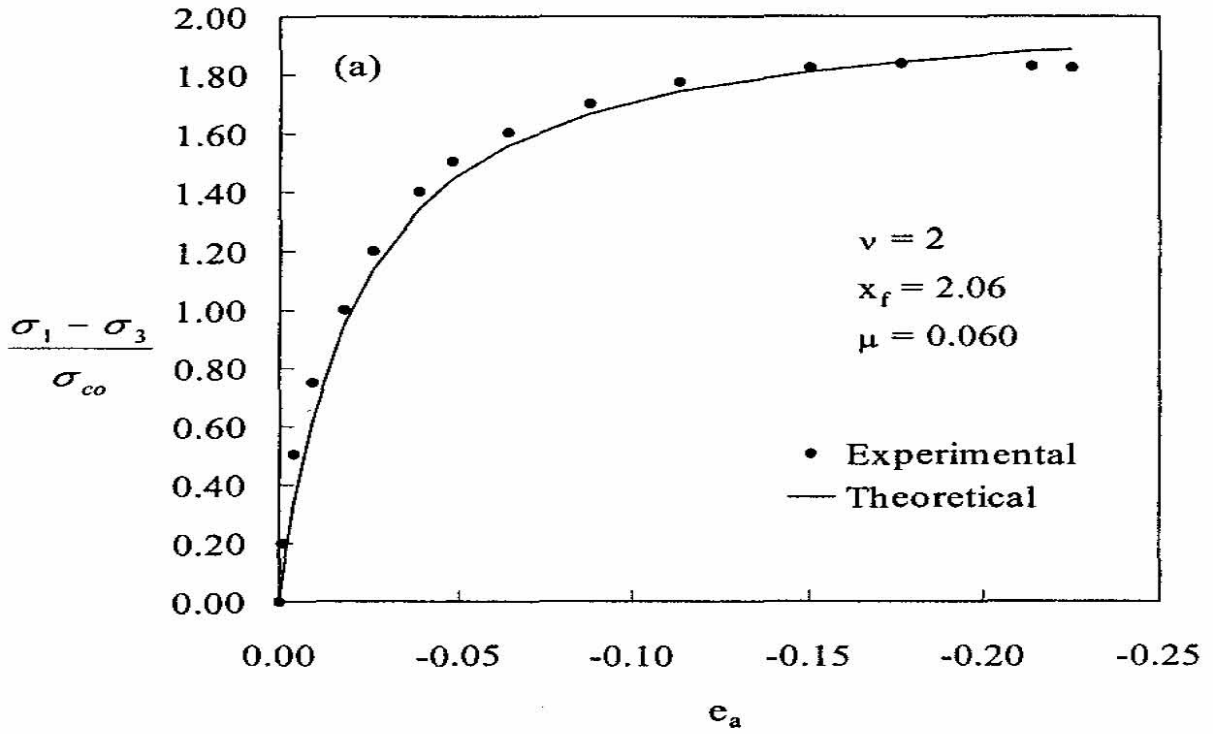


Fig. 3-13: Curva Esfuerzo – Deformación (AI) OCR = 8

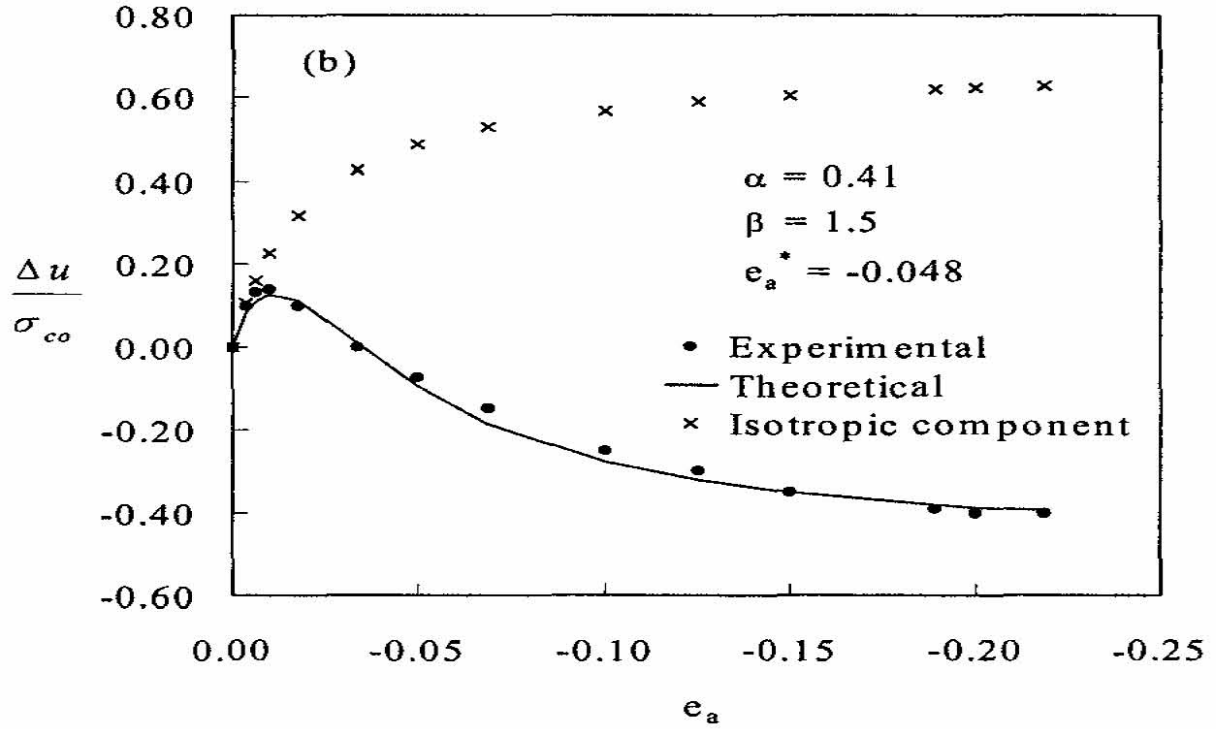


Fig. 3-14: Curva Presión de poro (AI) OCR = 8

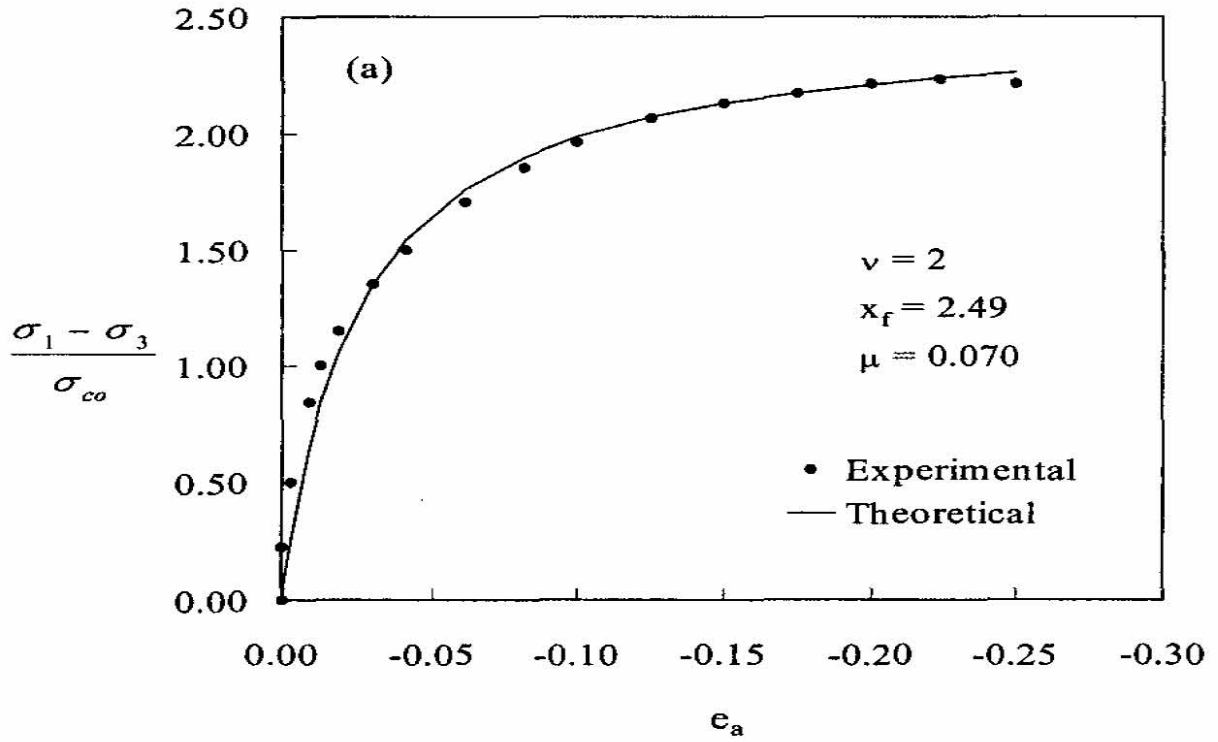


Fig. 3-15: Curva Esfuerzo – Deformación (AI) OCR = 12

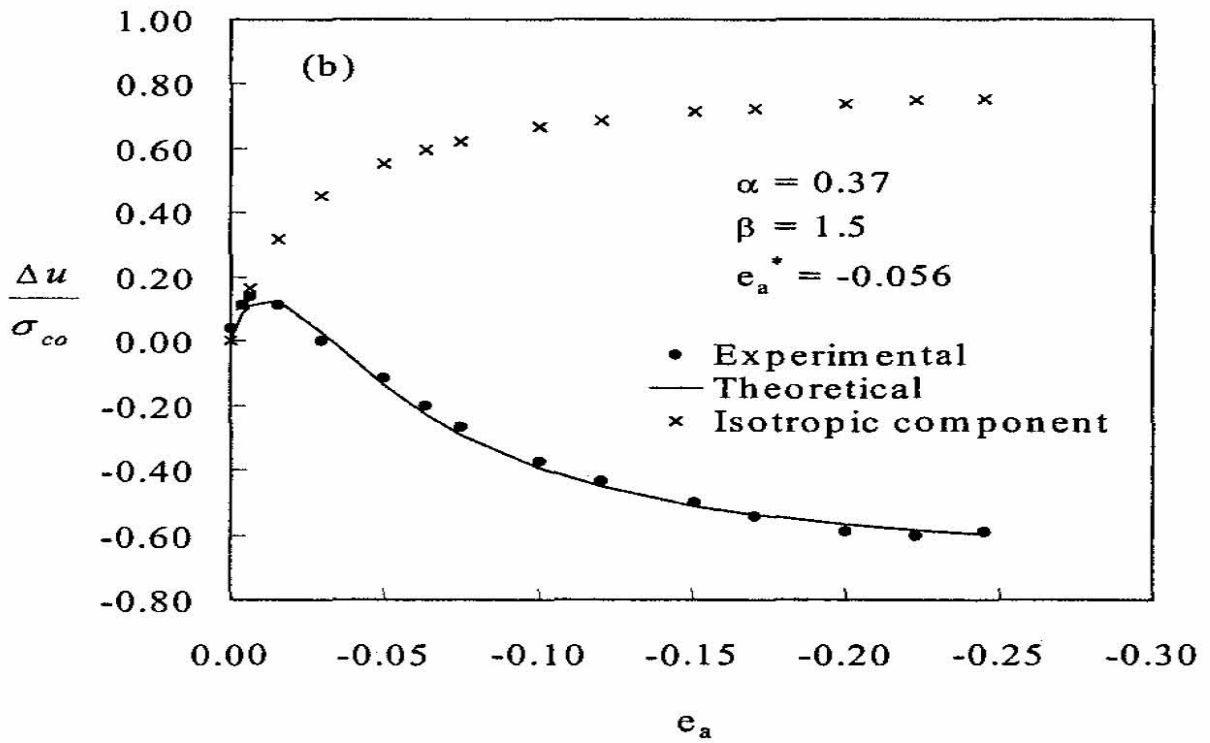


Fig. 3-16: Curva Presión de poro (AI) OCR = 12

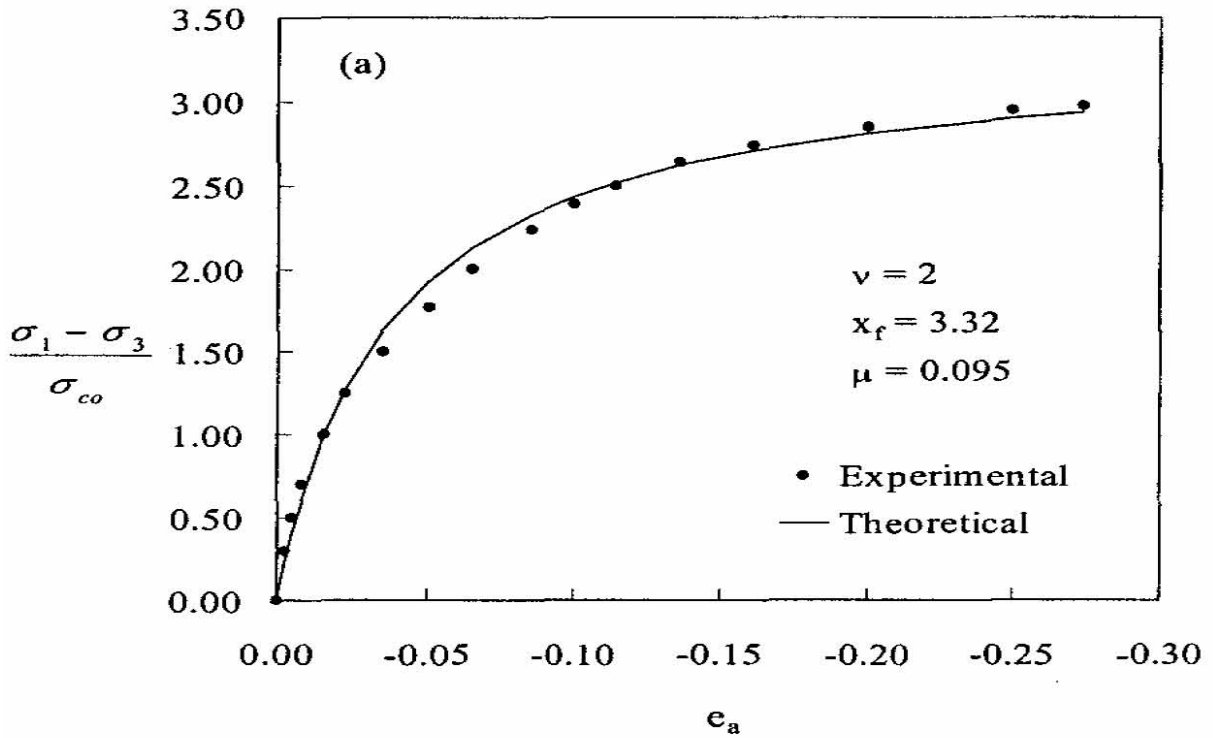


Fig. 3-17: Curva Esfuerzo - Deformación (AI) OCR = 24

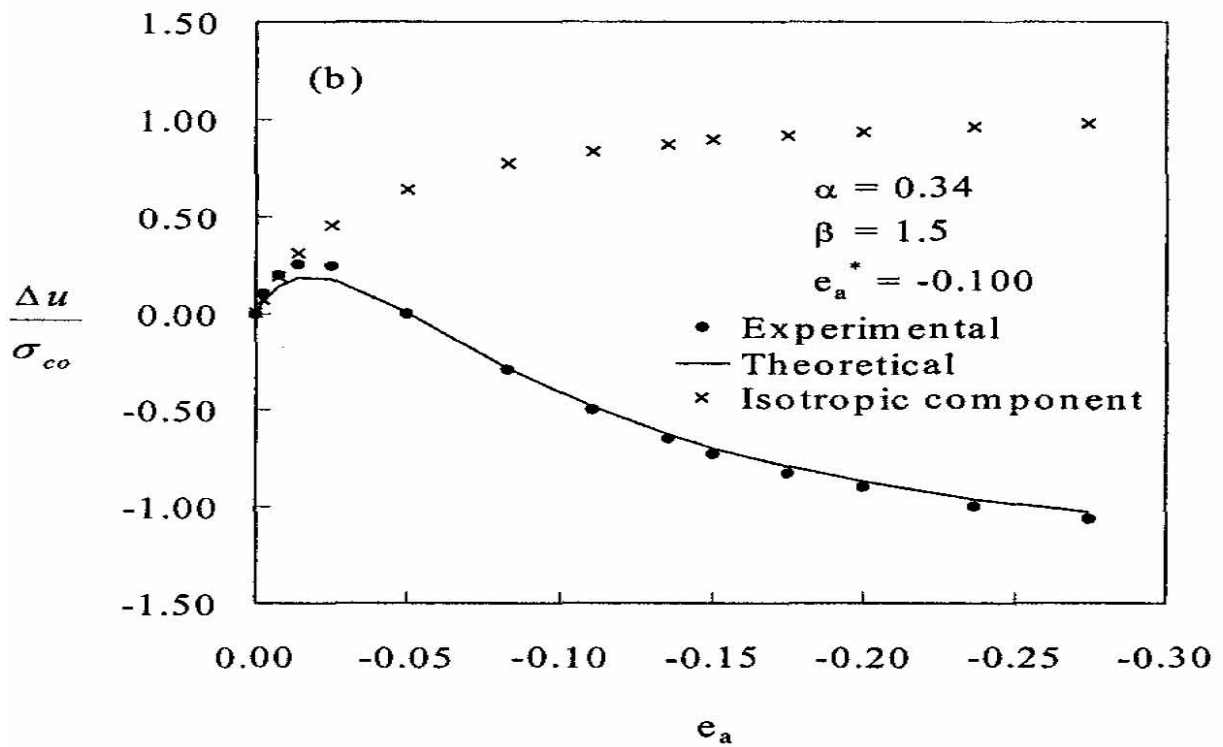


Fig. 3-18: Curva Presión de poro (AI) OCR = 24

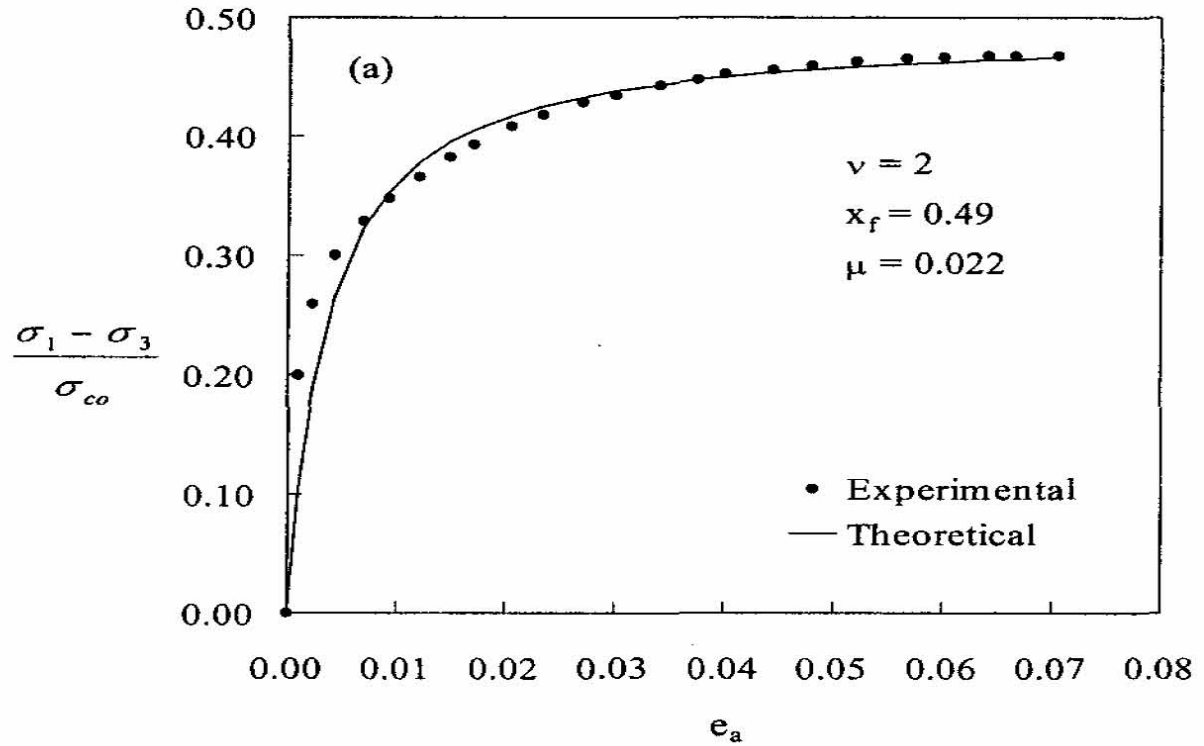


Fig. 3-19 Curva Esfuerzo - Deformación (AD) OCR = 1

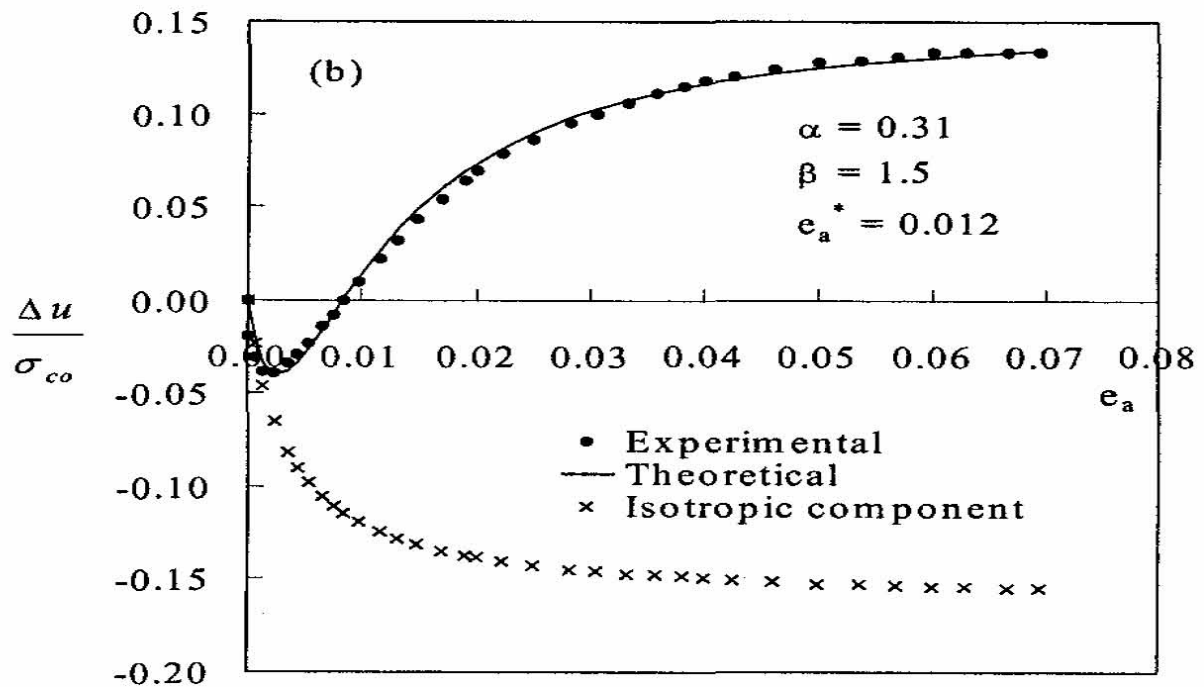


Fig. 3-20: Curva Presión de poro (AD) OCR = 1

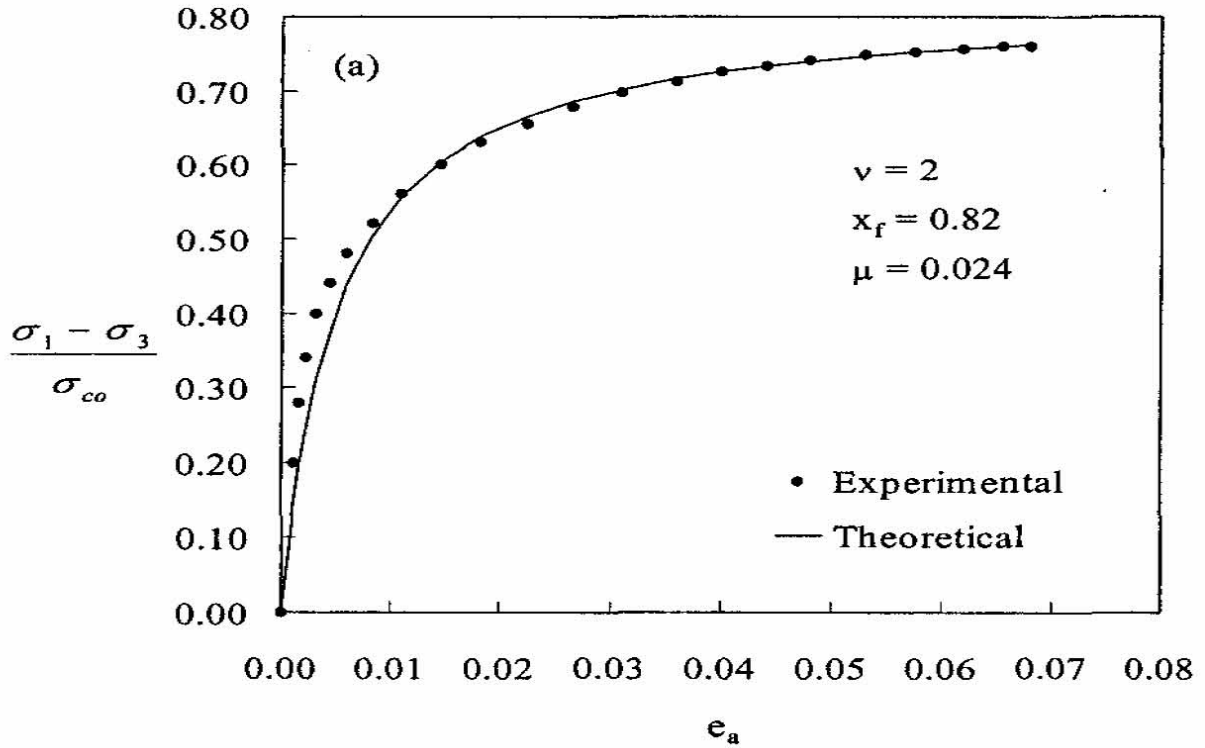


Fig. 3-21 Curva Esfuerzo - Deformación (AD) OCR = 2

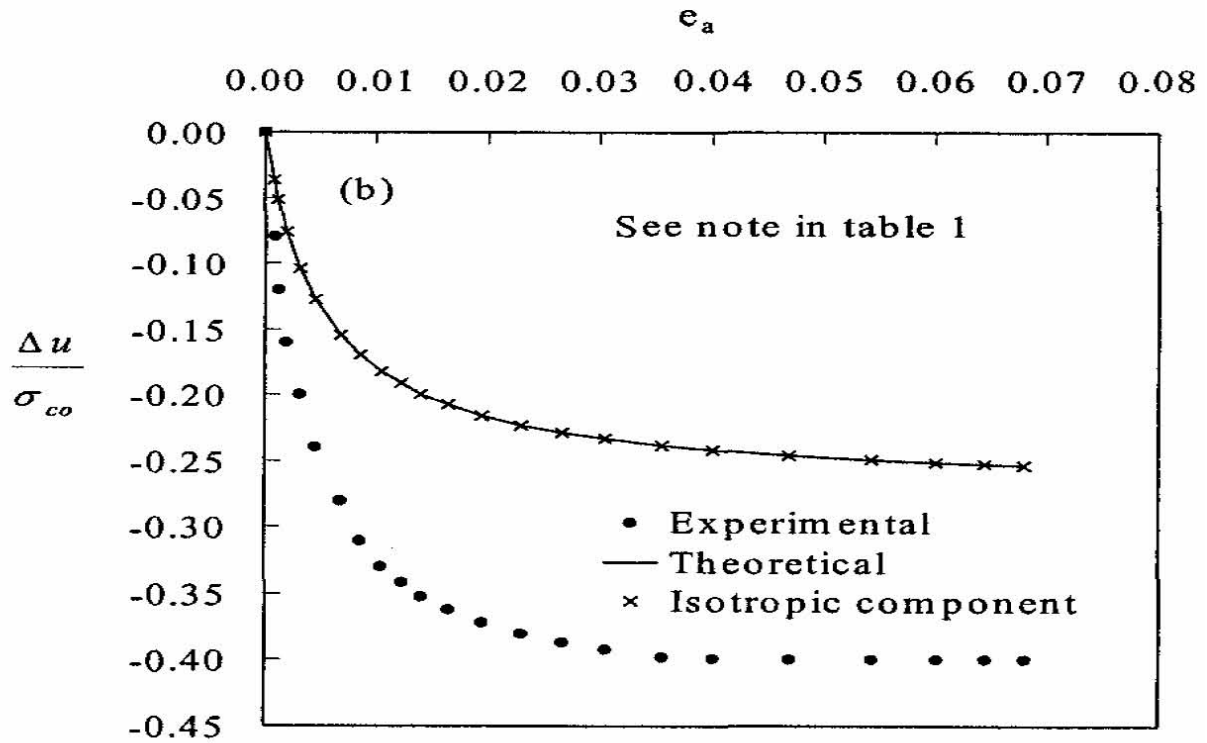


Fig. 3-22: Curva Presión de poro (AD) OCR = 2

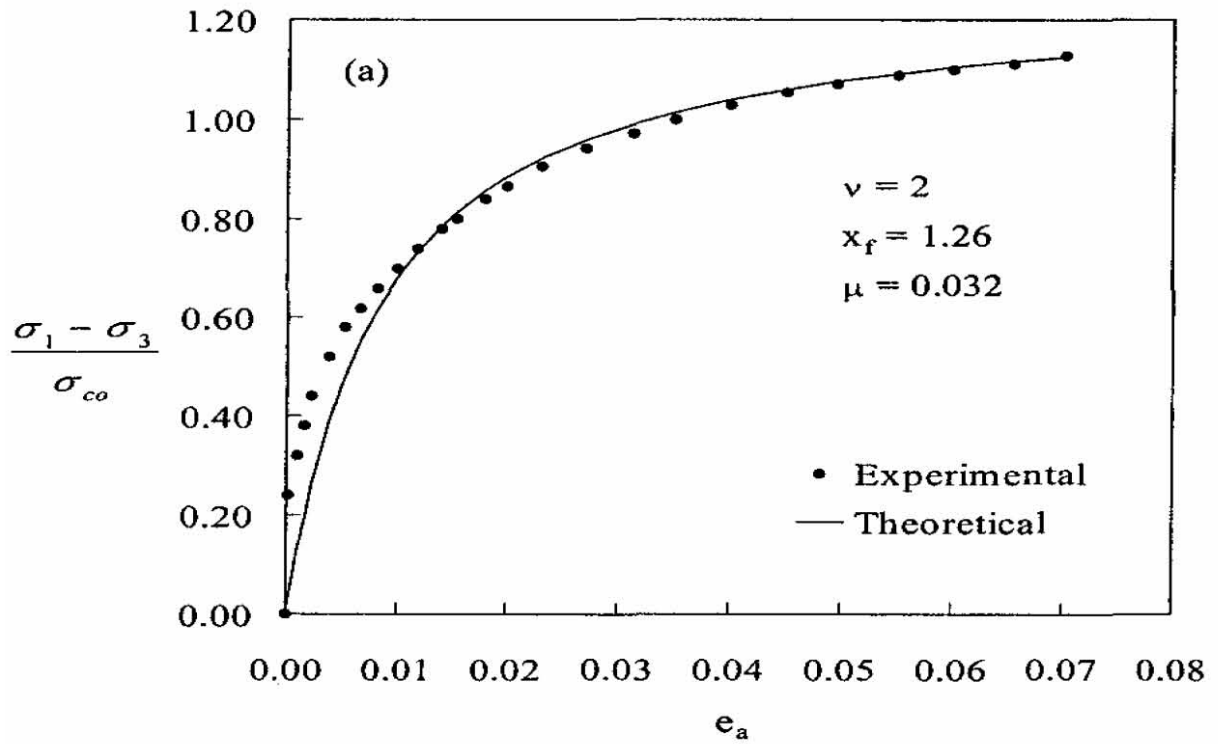


Fig. 3-23 Curva Esfuerzo - Deformación (AD) OCR = 4

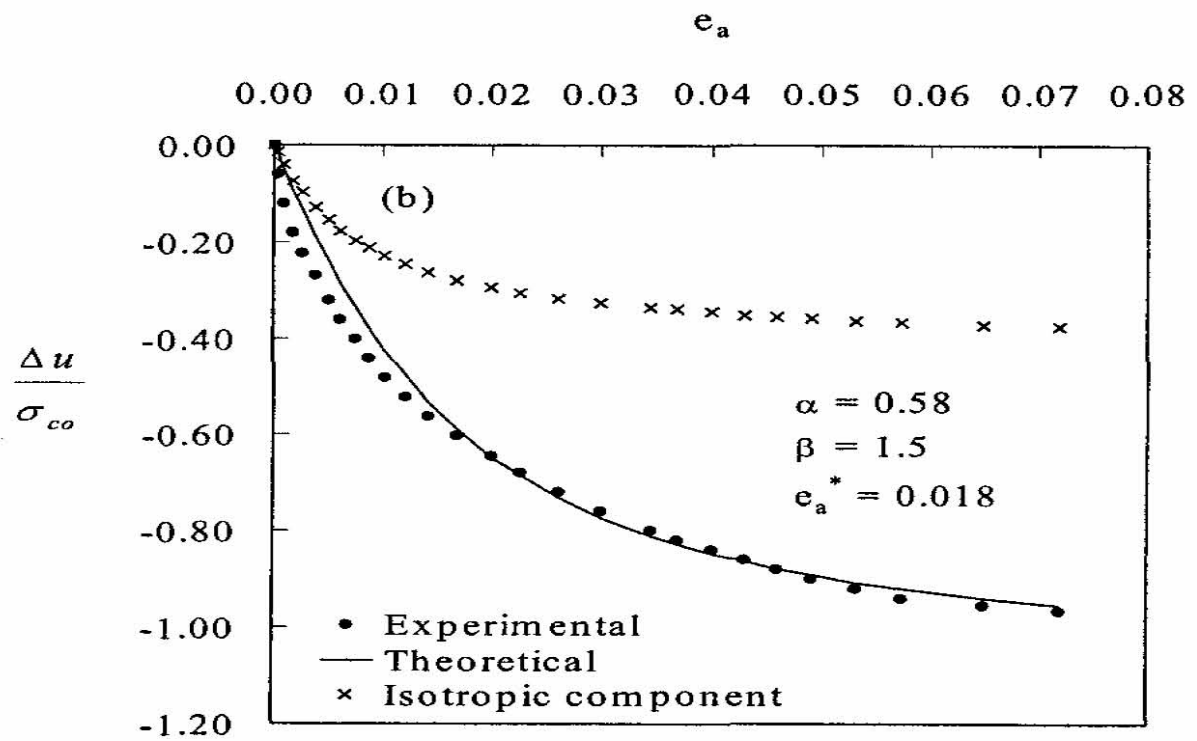


Fig. 3-24: Curva Presión de poro (AD) OCR = 4



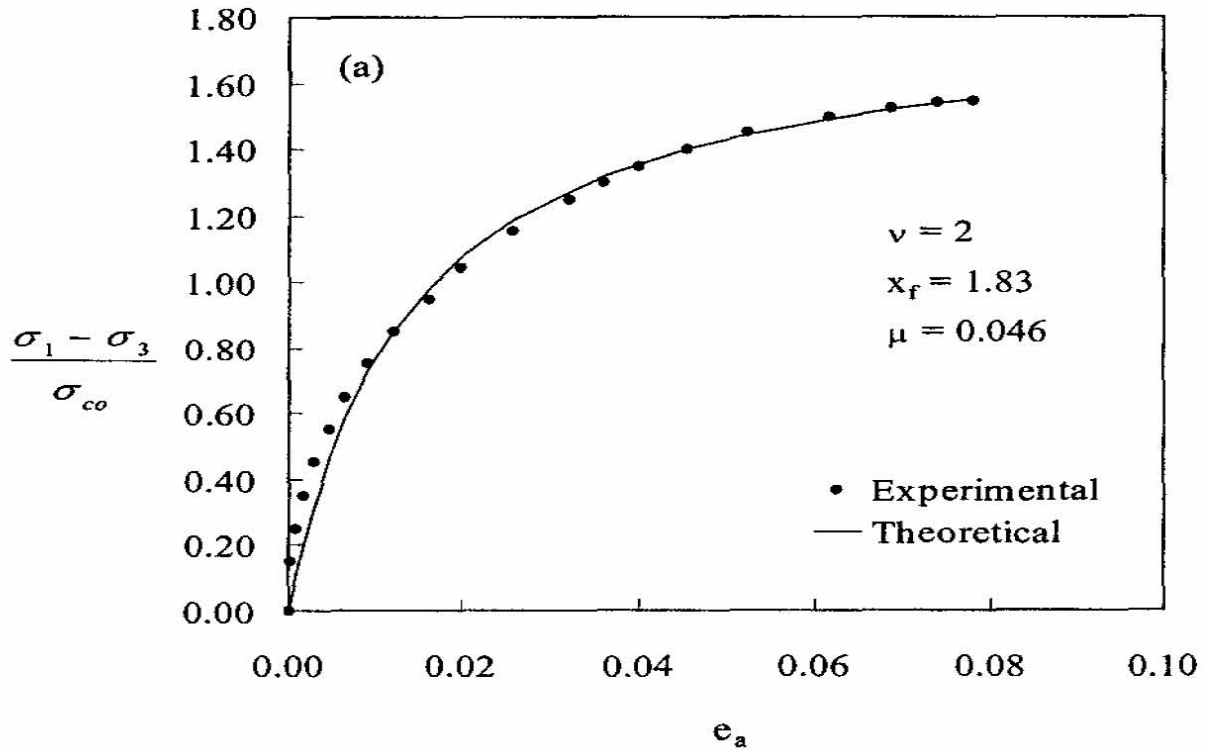


Fig. 3-25 Curva Esfuerzo - Deformación (AD) OCR = 8

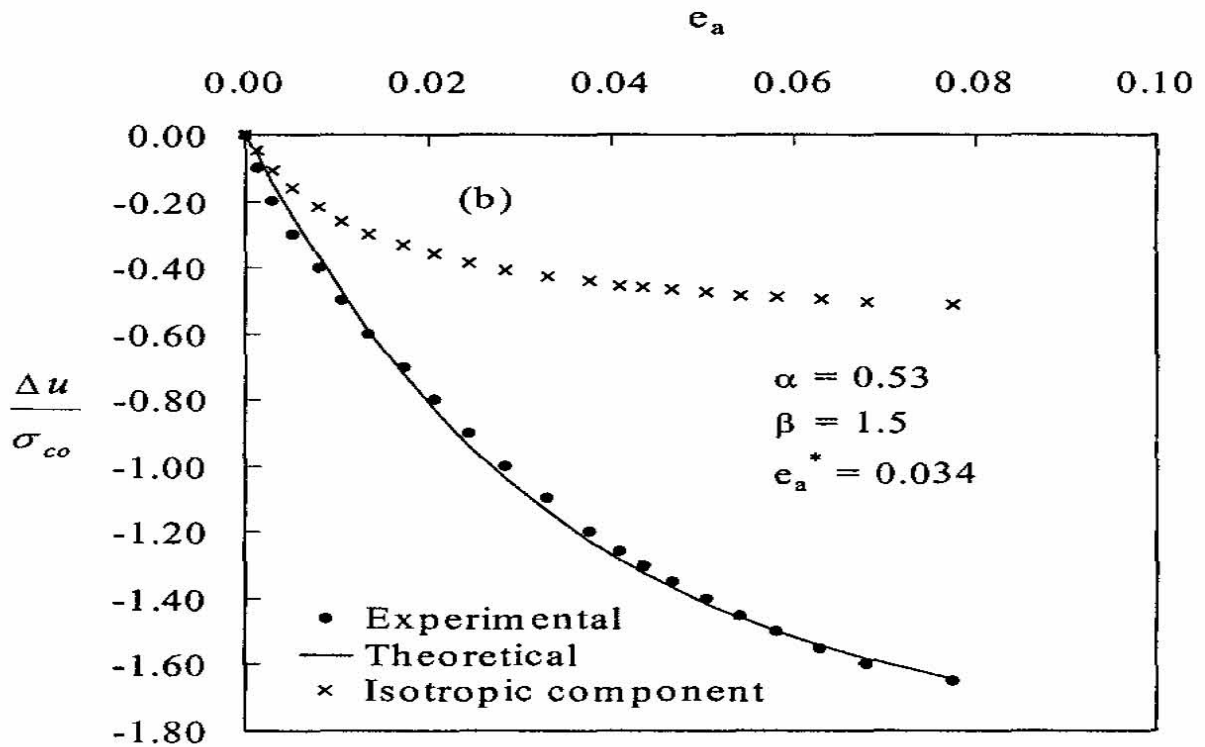


Fig. 3-26: Curva Presión de poro (AD) OCR = 8

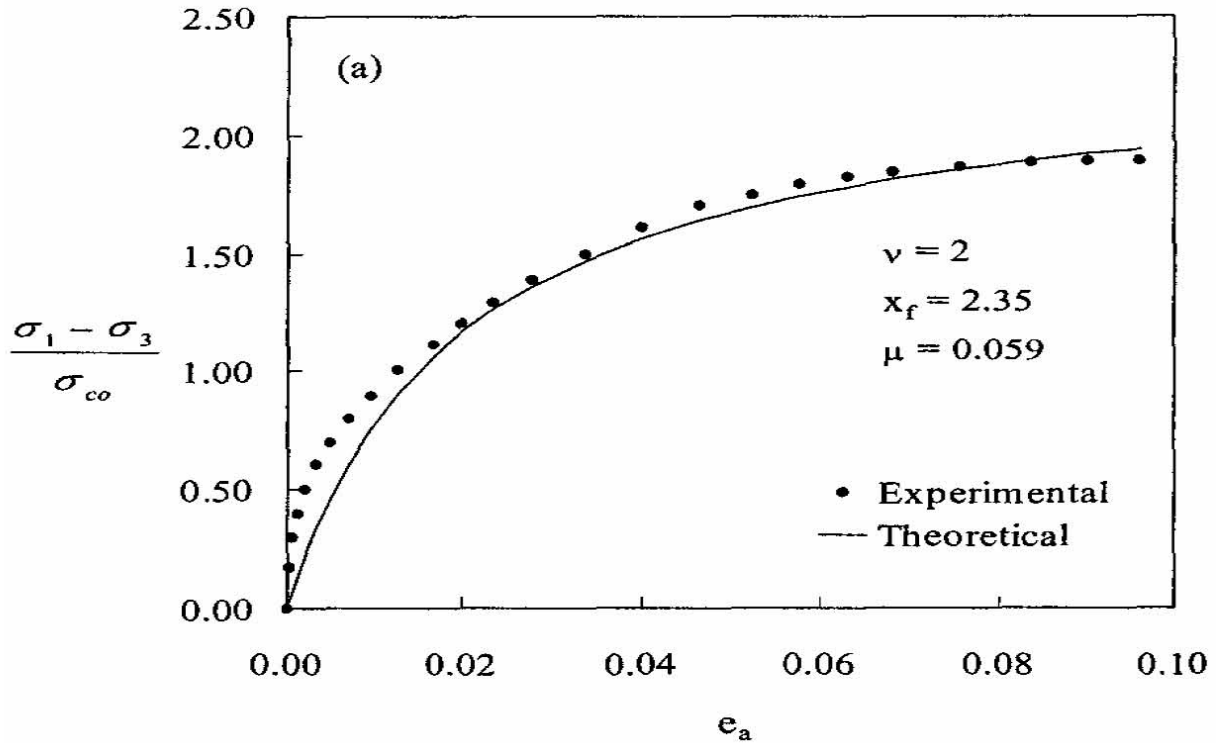


Fig. 3-27 Curva Esfuerzo - Deformación (AD) OCR = 12

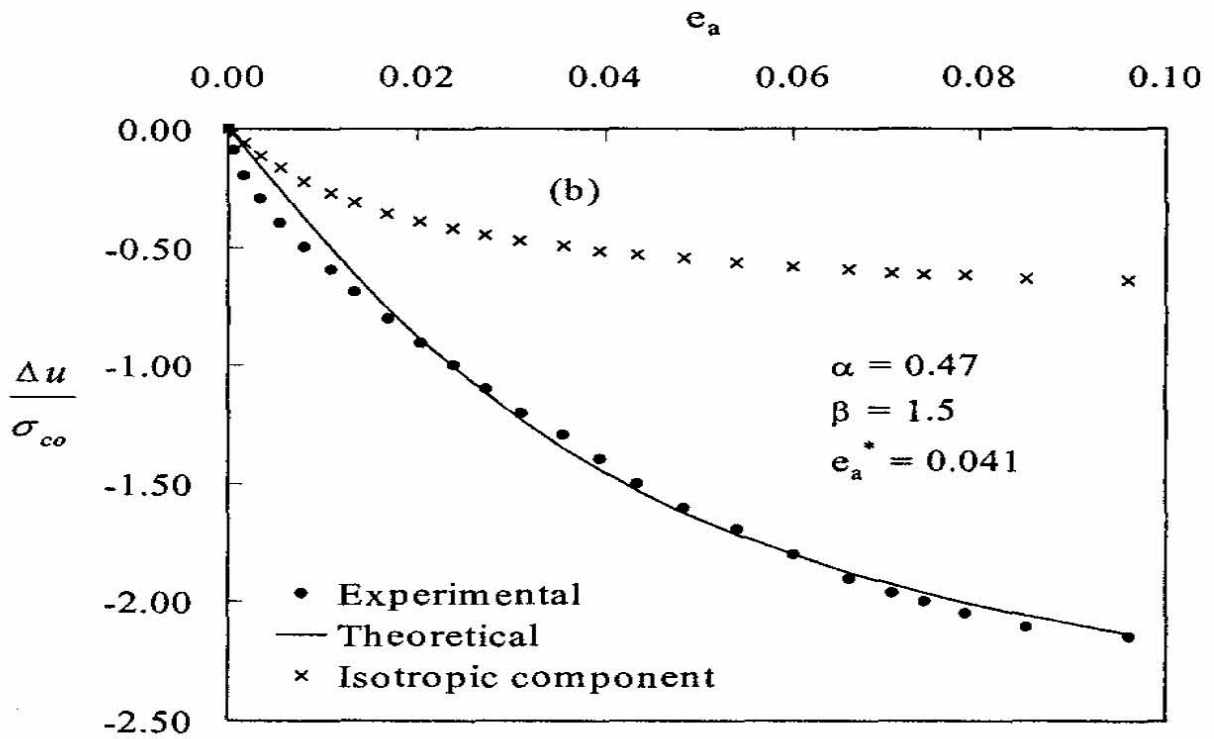


Fig. 3-28: Curva Presión de poro (AD) OCR = 12

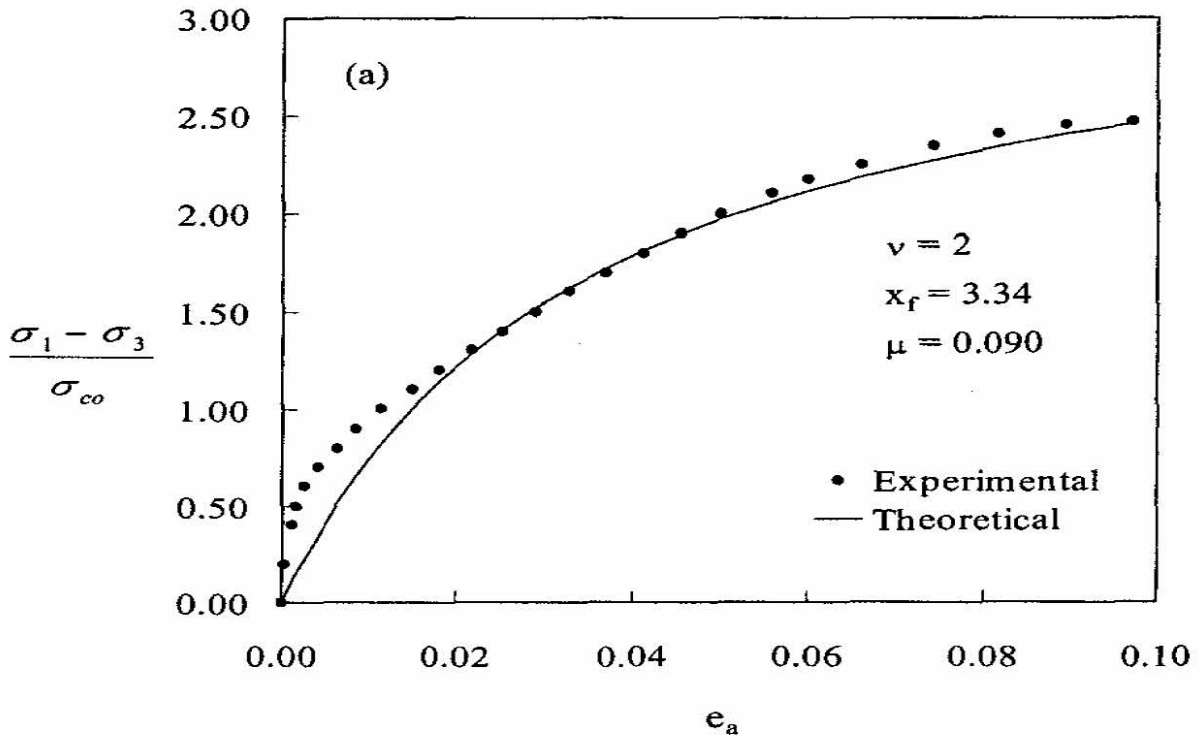


Fig. 3-29 Curva Esfuerzo - Deformación (AD) OCR = 24

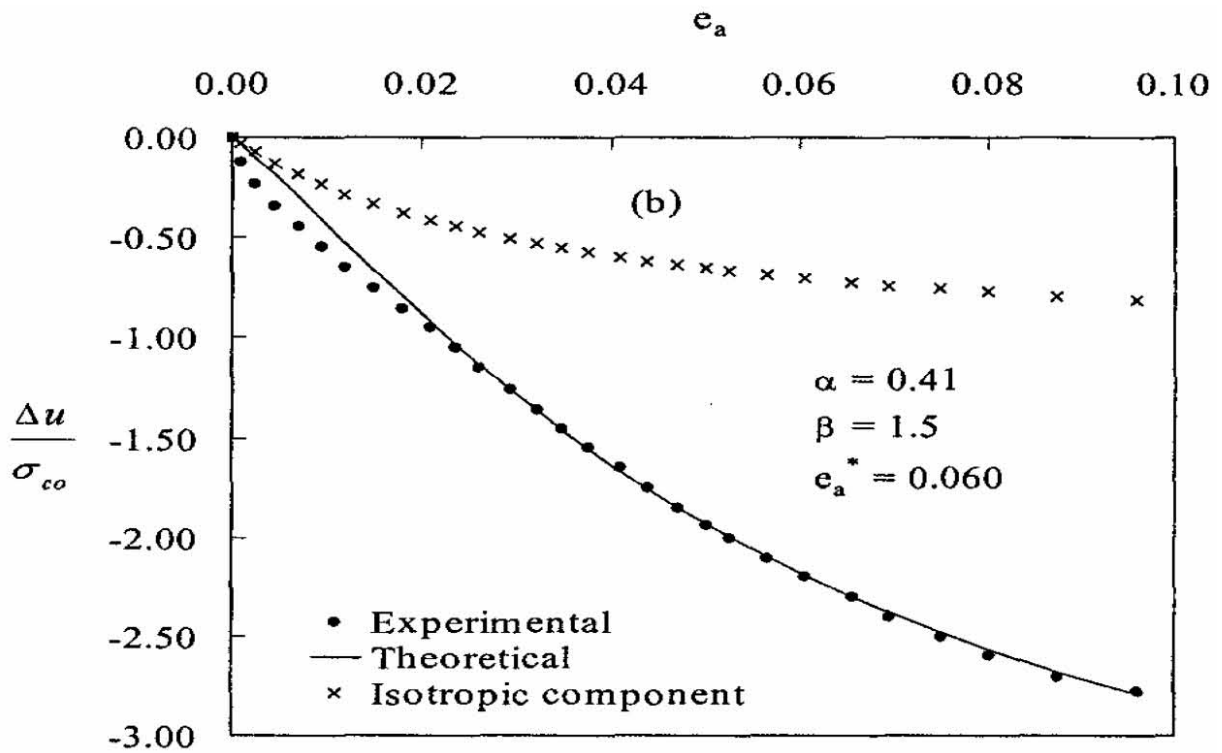


Fig. 3-30: Curva Presión de poro (AD) OCR = 24

### 3.2.1.2 Pruebas CD (Consolidadas Drenadas).

De igual forma que en las pruebas consolidadas no drenadas CU, se ajustaron las curvas esfuerzo desviador vs. deformación desviadora natural ( $e_a$ ) y cambio volumétrico normalizado vs. ( $e_a$ ), para las curvas correspondientes a las pruebas de compresión (esfuerzo axial aumentado, radial disminuido y  $J = \text{cte.}$ ) y extensión (esfuerzo axial disminuido, radial aumentado y  $J = \text{cte.}$ ).

En las figuras 3-41 a 3-108 se presentan las curvas experimentales y teóricas del comportamiento esfuerzo desviador vs. ( $e_a$ ) y cambio volumétrico vs. ( $e_a$ ). El valor de los parámetros  $\mu$  y  $x_f$  que se encontraron de acuerdo al tipo de prueba se muestra en las tablas 3-3 a 3-5 tanto para un valor de  $\nu = 1$  como de  $\nu = 2$  y en las figuras 3-31 y 3-34 se muestra los valores de forma gráfica.

Además de esto podemos observar que debido a que en si la primera componente de la ecuación de presión de poro es negativa, existirá un cierto grado de expansión y correspondientemente un cierto efecto de preconsolidación inducida, que hará que la muestra de arcilla aumente su grado de preconsolidación o disminuya.

Ahora, si la muestra se preconsolida isotrópicamente a una presión de consolidación  $\sigma_{co}$  y presión de consolidación equivalente  $\sigma_{eo}$ , “realmente” consolidada a esta última presión y generamos un cambio  $\Delta\sigma_c$  en la presión  $\sigma_{co}$ , esto nos conduce a una nueva presión de consolidación  $\sigma_c = \sigma_{co} + \Delta\sigma_c$ . A este incremento  $\Delta\sigma_c$  corresponde un incremento  $\Delta\sigma_e$  en la presión  $\sigma_{eo}$ , de tal forma que la nueva presión de consolidación equivalente es  $\sigma_e = \sigma_{eo} + \Delta\sigma_e$ . Por lo tanto, la componente de presión de poro debida a un cambio en la componente isotrópica de los esfuerzos, cuando se disipa cambia el volumen de la muestra sólo en la medida del cambio  $\Delta\sigma_e$  de la presión equivalente.

La combinación de estos dos factores genera cambios de volumen, que como se puede observar en las graficas, en especial en las de mayor grado de preconsolidación nulifican por completo la tendencia normal de disminución Del volumen.

**Tabla 3-3: Parámetros para obtener las curvas Esfuerzo desviador axial vs. ( $e_a$ )**

Prueba	OCR	OCF	$\nu$	$\mu$	$x_f$	$\nu$	$\mu$	$x_f$
Axial Incrementado	1.0	1.0	1	0.138	1.182	2	0.093	1.409
	1.7	1.4	1	0.138	1.214	2	0.064	1.370
	2.0	1.6	1	0.148	1.205	2	0.052	1.305
	2.7	1.9	1	0.163	1.232	2	0.051	1.338
	4.0	2.5	1	0.134	1.282	2	0.024	1.338
	8.0	4.0	1	0.175	1.393	2	0.047	1.569
	12.0	5.2	1	0.197	1.531	2	0.032	1.633
	24.0	8.3	1	0.267	1.624	2	0.042	1.777

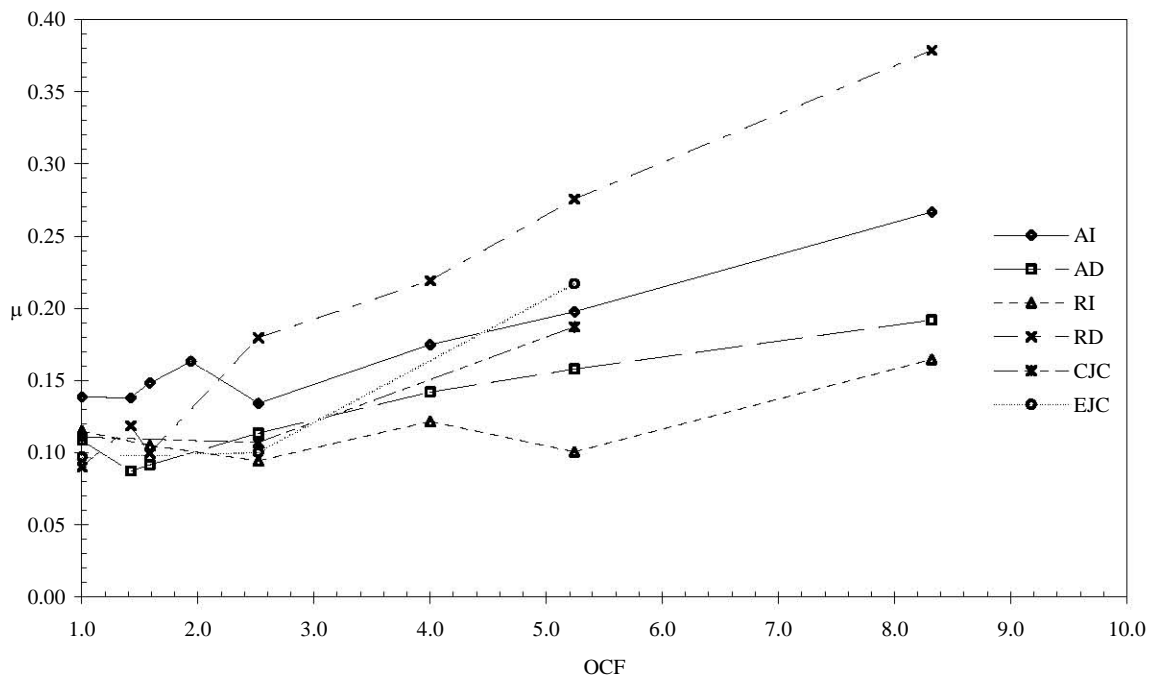
Prueba	OCR	OCF	$\nu$	$\mu$	$x_f$	$\nu$	$\mu$	$x_f$
Axial Disminuido	1.0	1.0	1	0.108	0.567	2	0.053	0.630
	1.7	1.4	1	0.087	0.568	2	0.030	0.615
	2.0	1.6	1	0.092	0.584	2	0.030	0.634
	2.7	1.9						
	4.0	2.5	1	0.113	0.605	2	0.032	0.663
	8.0	4.0	1	0.142	0.686	2	0.031	0.750
	12.0	5.2	1	0.158	0.704	2	0.036	0.790
	24.0	8.3	1	0.192	0.764	2	0.029	0.830

**Tabla 3-4: Parámetros para obtener las curvas Esfuerzo desviador radial vs. ( $e_a$ )**

Prueba	OCR	OCF	$\nu$	$\mu$	$x_f$	$\nu$	$\mu$	$x_f$
Radial Incrementado	1.0	1.0	1	0.115	1.291	2	0.094	1.711
	1.7	1.4						
	2.0	1.6	1	0.105	1.237	2	0.054	1.467
	2.7	1.9						
	4.0	2.5	1	0.094	1.275	2	0.037	1.490
	8.0	4.0	1	0.121	1.592	2	0.045	1.980
	12.0	5.2	1	0.100	1.717	2	0.022	1.909
	24.0	8.3	1	0.164	2.064	2	0.041	2.501
Radial Disminuido	1.0	1.0	1	0.090	0.533	2	0.042	0.586
	1.7	1.4	1	0.118	0.536	2	0.045	0.587
	2.0	1.6	1	0.100	0.542	2	0.027	0.575
	2.7	1.9						
	4.0	2.5	1	0.180	0.564	2	0.050	0.617
	8.0	4.0	1	0.219	0.585	2	0.048	0.639
	12.0	5.2	1	0.275	0.584	2	0.053	0.639
	24.0	8.3	1	0.379	0.603	2	0.057	0.657

**Tabla 3-5: Parámetros para obtener las curvas Esfuerzo desviador vs. ( $e_a$ ) manteniendo  $J = \text{Cte.}$**

Prueba	OCR	OCF	$\nu$	$\mu$	$x_f$	$\nu$	$\mu$	$x_f$
Compresión $J = \text{Cte.}$	1.0	1.0	1	0.111	0.856	2	0.057	0.952
	1.7	1.4						
	2.0	1.6						
	2.7	1.9						
	4.0	2.5	1	0.107	0.916	2	0.034	1.016
	8.0	4.0	1					
	12.0	5.2	1	0.187	1.091	2	0.046	1.240
	24.0	8.3	1					
Extensión $J = \text{Cte.}$	1.0	1.0	1	0.097	0.710	2	0.064	0.836
	1.7	1.4						
	2.0	1.6						
	2.7	1.9						
	4.0	2.5	1	0.100	0.775	2	0.033	0.868
	8.0	4.0						
	12.0	5.2	1	0.217	0.863	2	0.057	0.997
	24.0	8.3						



**Fig. 3-31: Valores de  $\mu$  respecto al OCF para  $\nu = 1$**

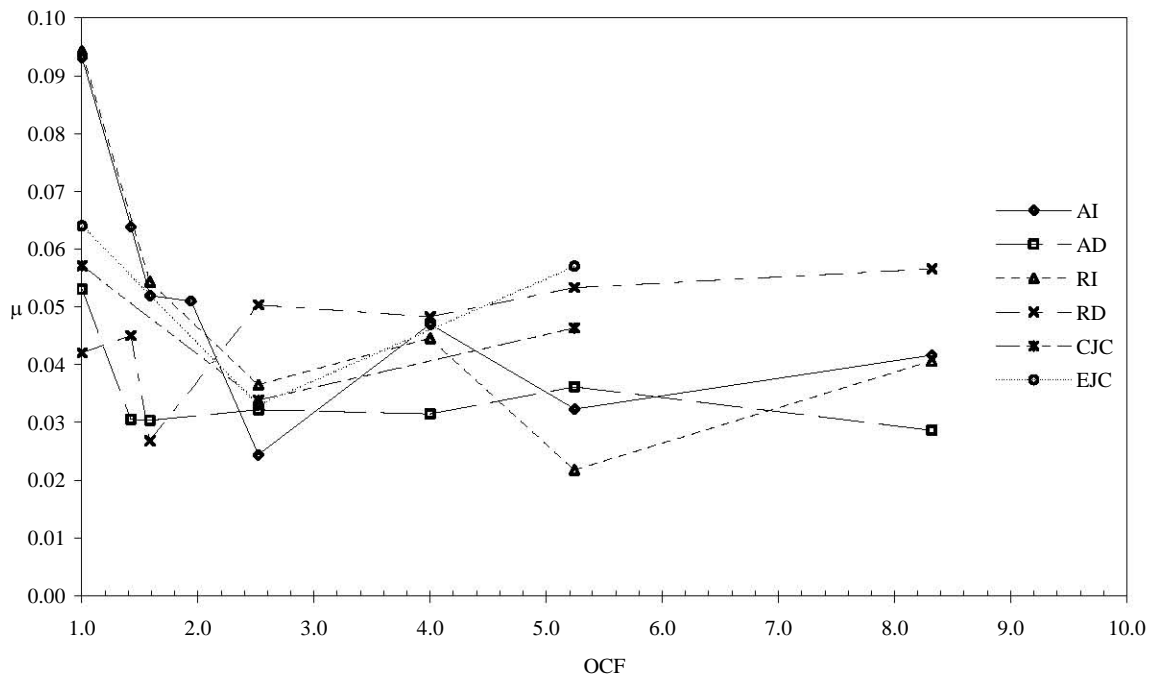


Fig. 3-32: Valores de  $\mu$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=2$

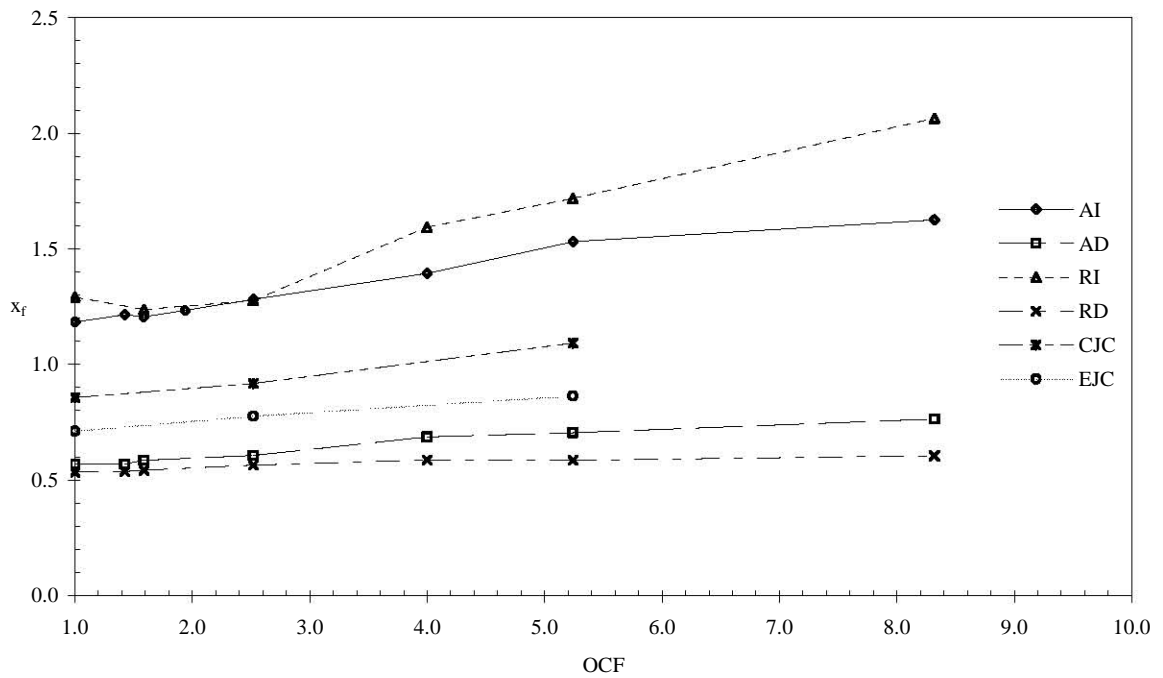
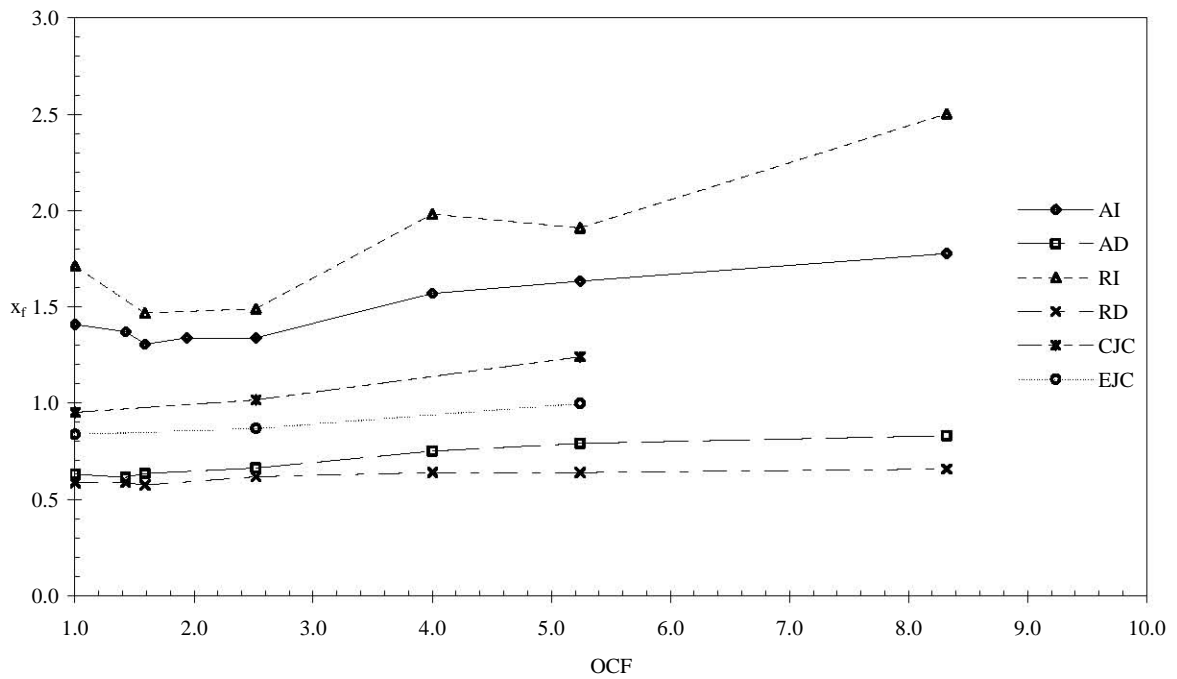


Fig. 3-33: Valores de  $x_f$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=1$



**Fig. 3-34: Valores de  $x_f$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=2$**

Como podemos observar en las figuras donde se muestran las curvas esfuerzo desviador vs. ( $e_a$ ), las curvas teóricas para un valor de  $\nu=2$  aparentemente se aproximan más al comportamiento real, sin embargo su variación respecto al valor del factor de preconsolidación es menos estable que el de las ajustadas para  $\nu=1$ , por lo que consideraremos a estas como las más adecuadas para tratar de encontrar una ley de variación.

En las tablas 3-6 a 3-8 y en las figuras 3-35 a 3-40 se muestran los valores encontrados para las curvas de cambio volumétrico normalizado vs. ( $e_a$ ), para  $\nu=1$  y  $\nu=2$ , pero como se pudo apreciar en los gráficos donde aparecen estas curvas solo aparece el ajuste para  $\nu=1$  debido a que se obtuvieron mejores aproximaciones.



**Tabla 3-6**

Prueba	OCR	OCF	v	$\alpha$	$\beta$	e*	v	$\alpha$	$\beta$	e*
Axial Incrementado	1.0	1.0	1	0.91	1.22	-13.63	2	0.72	1.64	-9.54
	1.7	1.4	1	0.60	1.11	-7.41	2	0.49	1.78	-5.78
	2.0	1.6	1	0.55	2.02	-9.03	2	0.50	2.80	-8.52
	2.7	1.9	1	0.46	1.20	-10.44	2	0.50	0.28	-6.33
	4.0	2.5	1	0.90	1.33	-14.00	2	1.00	0.80	-23.00
	8.0	4.0	1	0.65	1.71	-7.47	2	1.00	1.30	-13.55
	12.0	5.2	1	0.62	1.42	-8.58	2	1.00	1.03	-18.91
	24.0	8.3	1	0.80	1.16	-10.83	2	1.00	1.01	-16.00
Axial Disminuido	1.0	1.0	1	0.54	1.30	3.61	2	0.64	0.94	4.89
	1.7	1.4	1	1.00	2.00	2.74	2	1.00	1.00	2.08
	2.0	1.6	1	1.00	1.74	2.19	2	1.00	1.47	2.30
	2.7	1.9								
	4.0	2.5	1	0.61	1.54	3.05	2	0.54	1.86	2.62
	8.0	4.0	1	0.80	1.12	5.35	2	0.57	1.42	3.13
	12.0	5.2	1	0.71	1.42	4.53	2	0.55	1.66	3.24
	24.0	8.3	1	0.62	1.48	3.17	2	0.51	1.76	2.47

**Tabla 3-7**

Prueba	OCR	OCF	v	$\alpha$	$\beta$	e*	v	$\alpha$	$\beta$	e*
Radial Incrementado	1.0	1.0	1	0.47	1.48	8.55	2	0.35	2.16	5.94
	1.7	1.4								
	2.0	1.6	1	0.40	1.92	5.95	2	0.32	2.78	4.80
	2.7	1.9								
	4.0	2.5	1	1.00	1.78	3.00	2	1.00	0.80	3.00
	8.0	4.0	1	1.00	0.77	14.15	2	1.00	0.67	16.78
	12.0	5.2	1	0.98	0.63	17.66	2	1.00	0.46	31.17
	24.0	8.3	1	1.00	0.72	15.71	2	1.00	0.68	17.04
Radial Disminuido	1.0	1.0	1	0.68	1.48	-1.81	2	0.70	1.08	-1.49
	1.7	1.4	1	0.38	1.50	-1.00	2	0.35	1.50	-0.53
	2.0	1.6	1	1.00	0.35	-24.91	2	0.52	1.38	-2.59
	2.7	1.9								
	4.0	2.5	1	1.00	0.84	-7.75	2	0.61	1.41	-2.97
	8.0	4.0	1	0.83	1.12	-5.26	2	0.60	1.56	-3.15
	12.0	5.2	1	0.79	1.07	-3.63	2	0.63	1.43	-2.47
	24.0	8.3	1	0.73	1.16	-2.79	2	0.62	1.49	-2.14

Tabla 3-8

Prueba	OCR	OCF	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$e^*$	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$e^*$
Compresión J = Cte.	1.0	1.0	1	0.58	1.37	-3.66	2	0.58	1.37	-3.66
	1.7	1.4								
	2.0	1.6								
	2.7	1.9								
	4.0	2.5	1	0.44	1.23	-5.55	2	0.44	1.23	-5.55
	8.0	4.0	1							
	12.0	5.2	1	0.30	1.86	-5.29	2	0.30	1.86	-5.29
	24.0	8.3	1							
Extensión J = Cte.	1.0	1.0	1	0.45	1.36	2.91	2	0.45	1.36	2.91
	1.7	1.4								
	2.0	1.6								
	2.7	1.9								
	4.0	2.5	1	0.71	1.21	4.34	2	0.71	1.21	4.34
	8.0	4.0								
	12.0	5.2	1	0.46	1.31	2.24	2	0.46	1.31	2.24
	24.0	8.3								

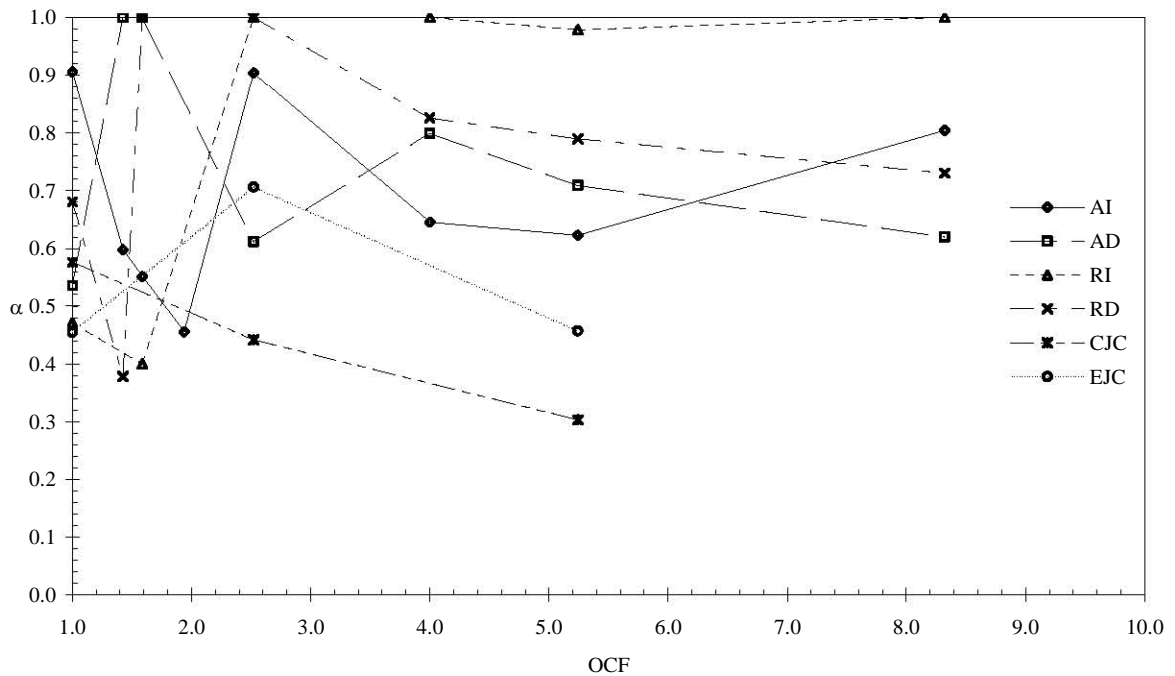


Fig. 3-35: Variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $OCF$  para  $\nu = 1$

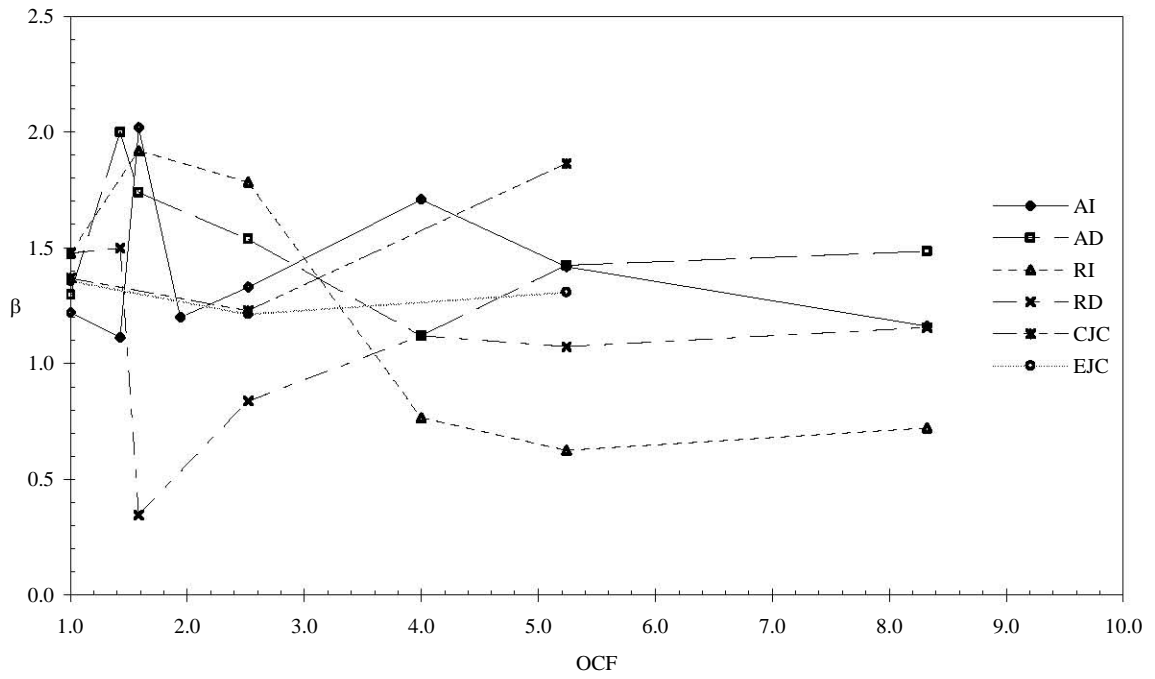


Fig. 3-36: Variación del parámetro  $\beta$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=1$

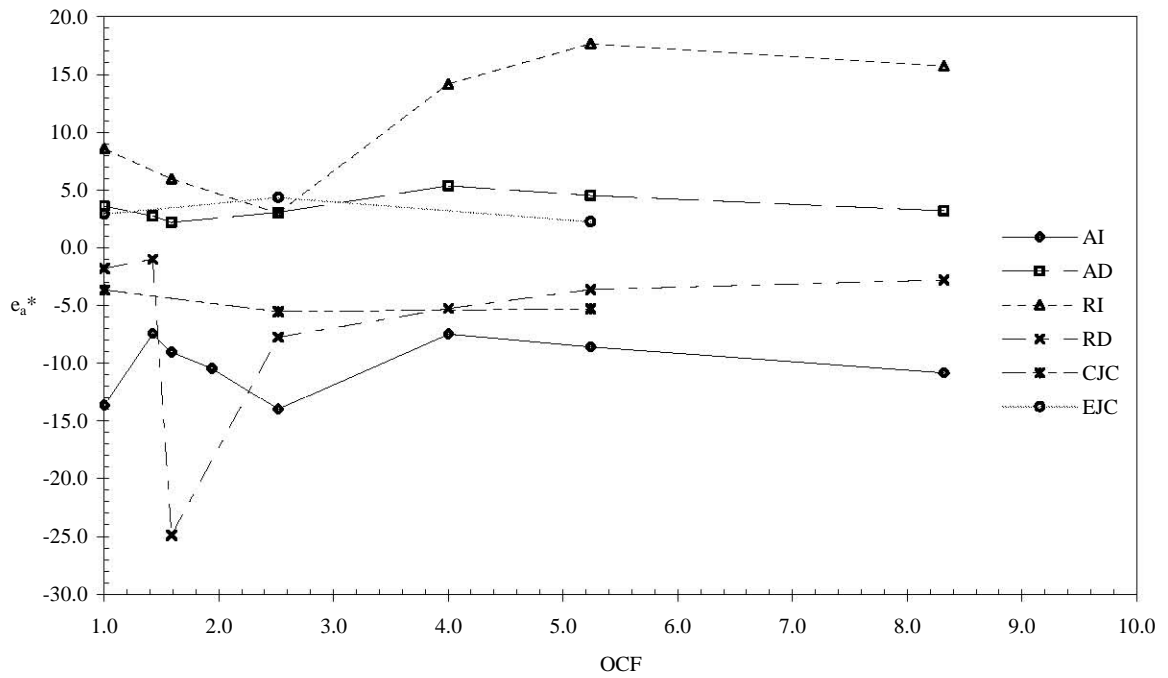


Fig. 3-37: Variación del parámetro  $e_a^*$  respecto al  $OCF$  par  $\nu=1$

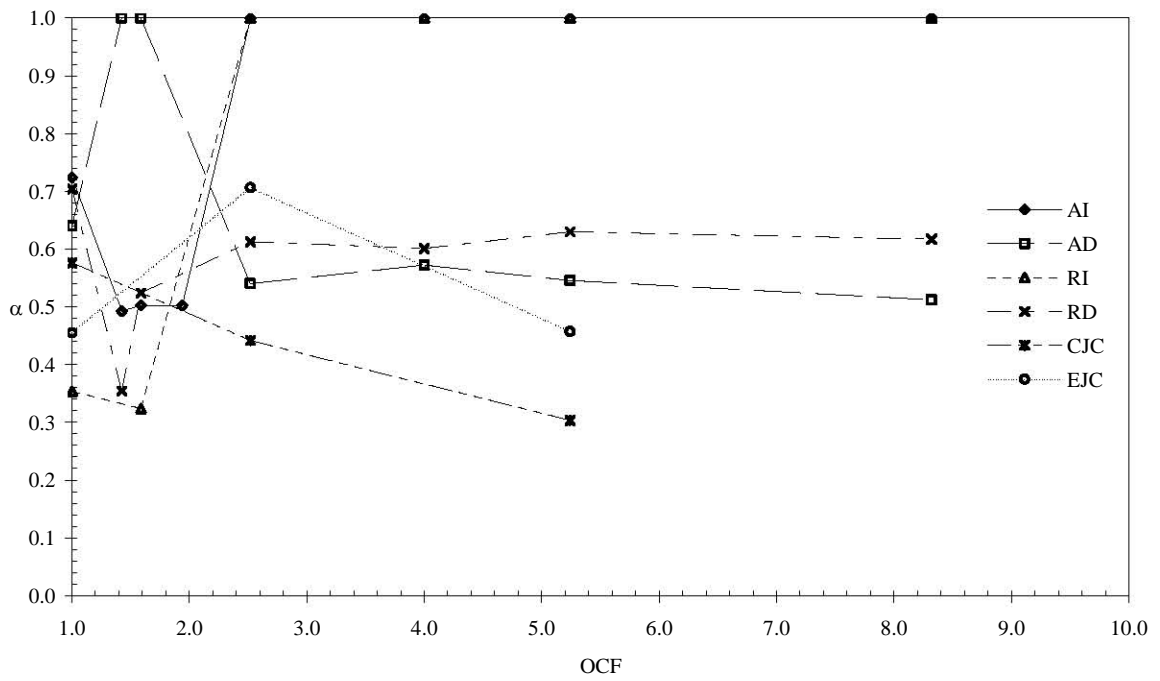


Fig. 3-38: Variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $OCF$  para  $\nu = 2$

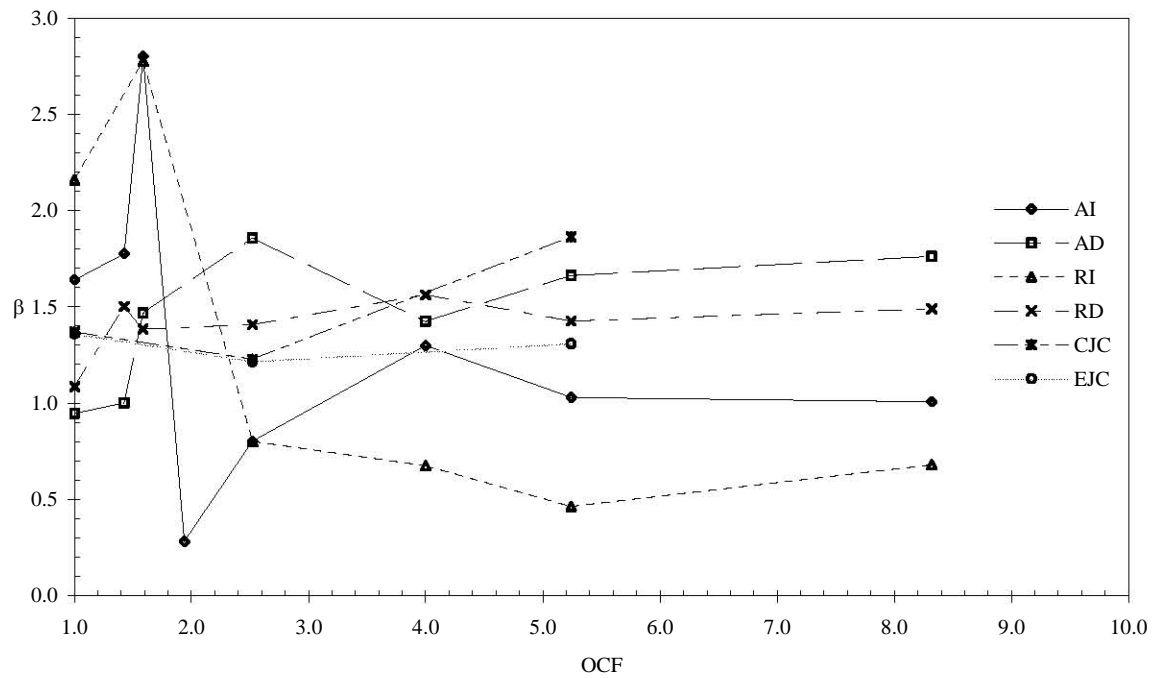
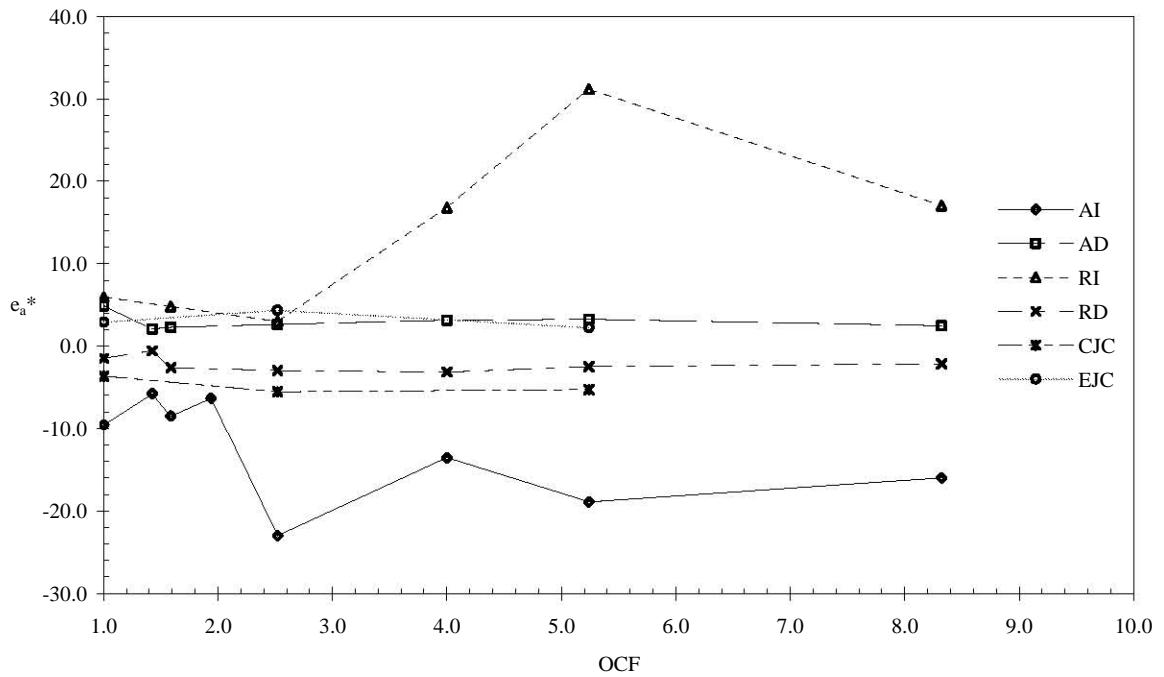


Fig. 3-39: Variación del parámetro  $\beta$  respecto al  $OCF$  para  $\nu = 2$



**Fig. 3-40: Variación del parámetro  $e_a^*$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=2$**

Definiendo al coeficiente de correlación entre los datos experimentales y los teóricos mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x * \sigma_y}$$

$$Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_x)(y_j - \mu_y)$$

tenemos que las correlaciones obtenidas para los diferentes tipos de pruebas y diferentes valores de  $\nu$  se muestran en las tablas 3-9 a 3-11:

**Tabla 3-9**

Prueba	OCR	OCF	Coeficiente de correlación para las curvas Esfuerzo desviador vs. Deformación desviadora natural		Coeficiente de correlación para las curvas Cambio volumétrico normalizado vs. Deformación desviadora natural	
			v = 1	v = 2	v = 1	v = 2
			Axial Incrementado	1.0	1.0	0.997
1.7	1.4	0.996		0.998	0.999	0.999
2.0	1.6	0.996		0.996	1.000	0.998
2.7	1.9	0.987		0.999	1.000	0.987
4.0	2.5	0.996		0.994	0.998	0.915
8.0	4.0	0.997		0.998	1.000	0.996
12.0	5.2	0.998		0.995	0.999	0.992
24.0	8.3	0.993		0.997	1.000	0.995
Axial Disminuido	1.0	1.0	0.992	0.999	0.997	0.998
	1.7	1.4	0.993	0.997	0.994	0.997
	2.0	1.6	0.993	0.999	0.992	0.998
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	0.995	0.998	1.000	1.000
	8.0	4.0	0.985	0.996	1.000	1.000
	12.0	5.2	0.996	0.997	1.000	1.000
	24.0	8.3	0.994	0.997	1.000	1.000

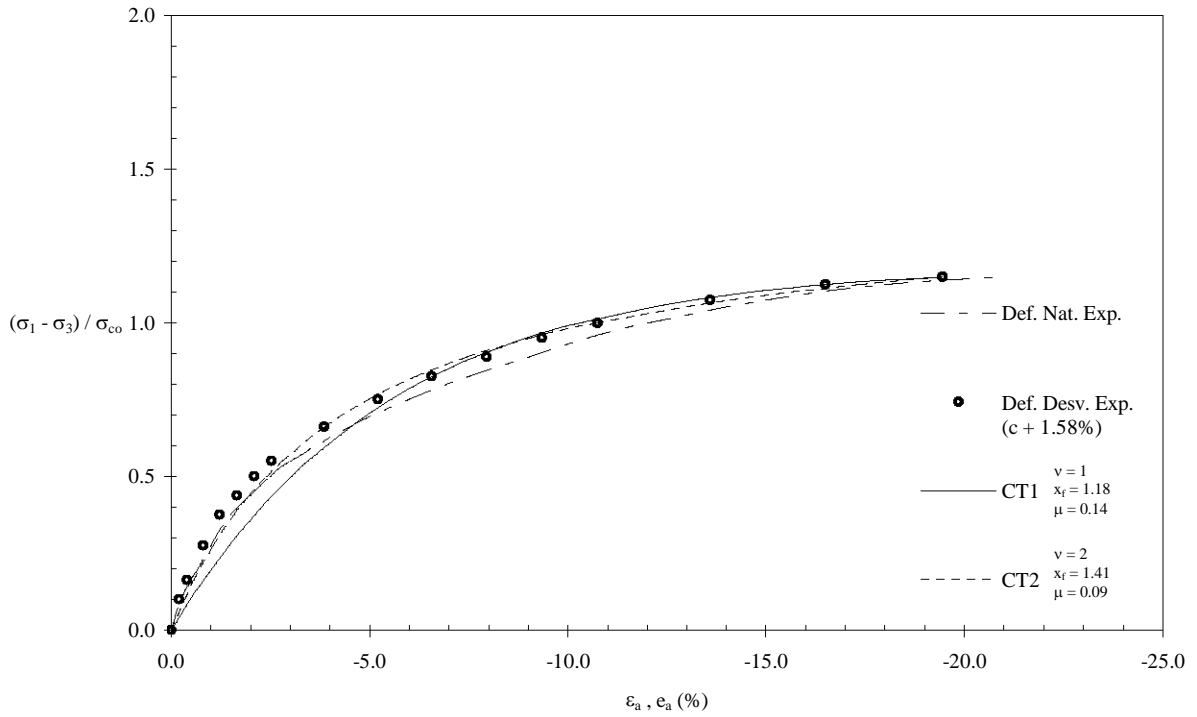
**Tabla 3-10**

Prueba	OCR	OCF	Coeficiente de correlación para las curvas Esfuerzo desviador vs. Deformación desviadora natural		Coeficiente de correlación para las curvas Cambio volumétrico normalizado vs. Deformación desviadora natural	
			v = 1	v = 2	v = 1	v = 2
Radial Incrementado	1.0	1.0	0.999	0.999	1.000	1.000
	1.7	1.4				
	2.0	1.6	0.995	0.999	1.000	0.999
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	0.999	0.998	0.992	0.996
	8.0	4.0	0.999	0.998	0.984	0.957
	12.0	5.2	0.999	0.989	0.997	0.954
	24.0	8.3	0.996	0.987	0.994	0.960
Radial Disminuido	1.0	1.0	0.996	0.998	0.951	0.987
	1.7	1.4	0.992	1.000	0.981	0.999
	2.0	1.6	0.991	0.996	0.995	1.000
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	0.991	0.999	1.000	1.000
	8.0	4.0	0.996	0.998	1.000	1.000
	12.0	5.2	0.994	1.000	1.000	1.000
	24.0	8.3	0.993	0.999	1.000	1.000

**Tabla 3-11**

Prueba	OCR	OCF	Coeficiente de correlación para las curvas Esfuerzo desviador vs. Deformación desviadora natural		Coeficiente de correlación para las curvas Cambio volumétrico normalizado vs. Deformación desviadora natural	
			v = 1	v = 2	v = 1	v = 2
			Compresión J = Cte.	1.0	1.0	0.999
1.7	1.4					
2.0	1.6					
2.7	1.9					
4.0	2.5	0.998		0.998	1.000	1.000
8.0	4.0					
12.0	5.2	0.998		0.992	1.000	1.000
24.0	8.3					
Extensión J = Cte.	1.0	1.0	0.994	0.999		
	1.7	1.4				
	2.0	1.6				
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	0.998	0.999		
	8.0	4.0				
	12.0	5.2	0.999	0.999		
	24.0	8.3				

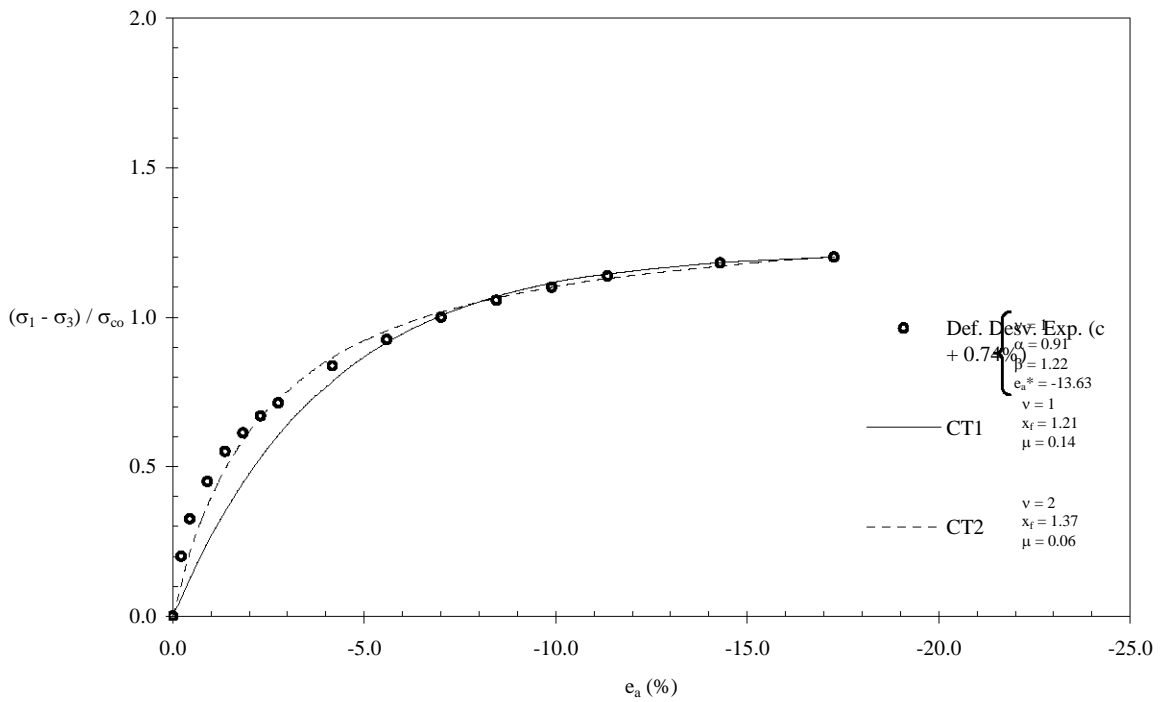




**Fig. 3-41: Curva esfuerzo – deformación (AI) OCR = 1**

¡Error! No se pueden crear objetos modificando códigos de campo.

**Fig. 3-42: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 1**



**Fig. 3-43: Curva esfuerzo – deformación (AI) OCR = 1.7**

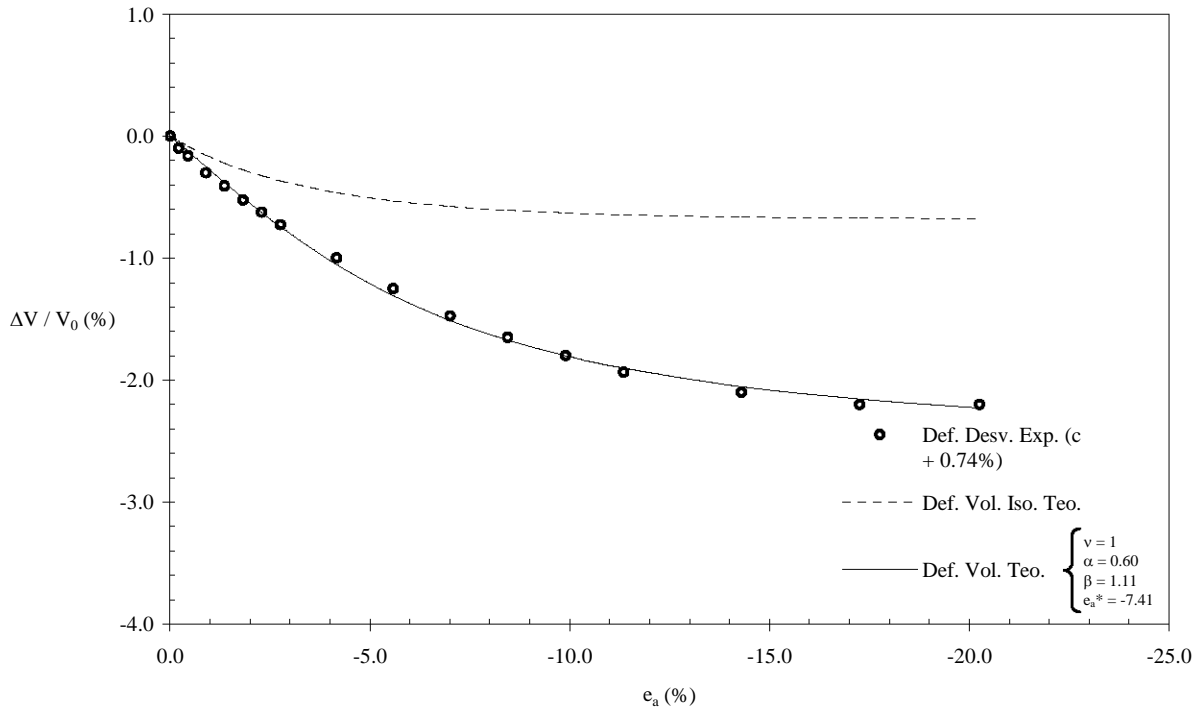


Fig. 3-44: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 1.7

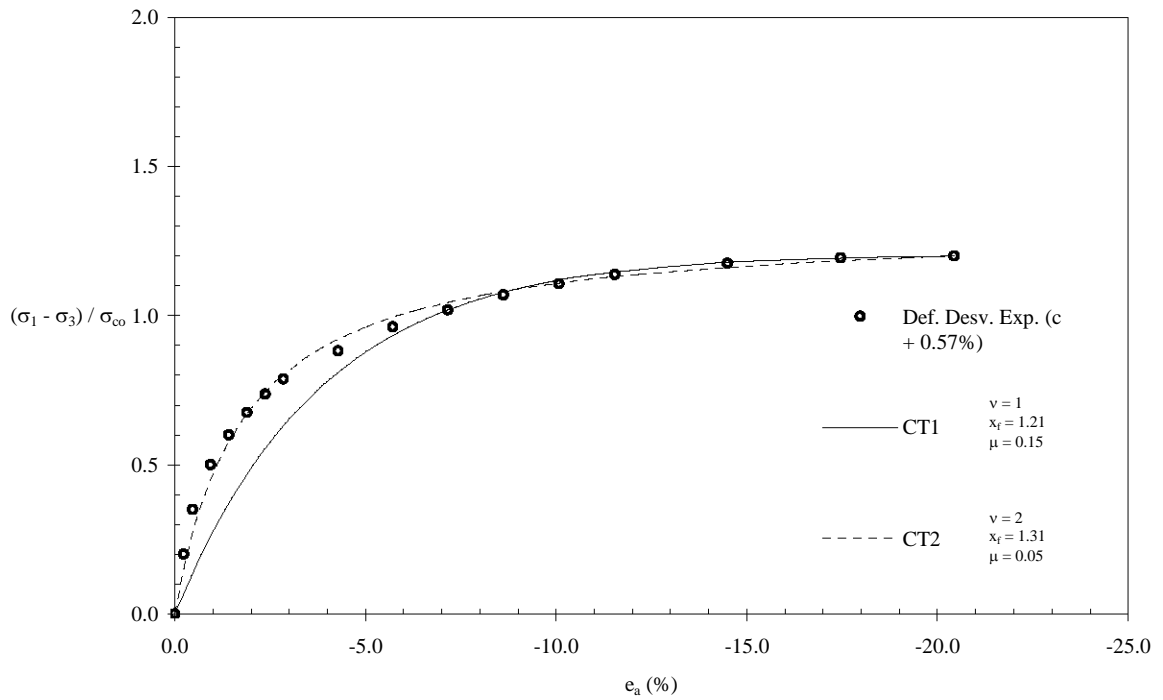
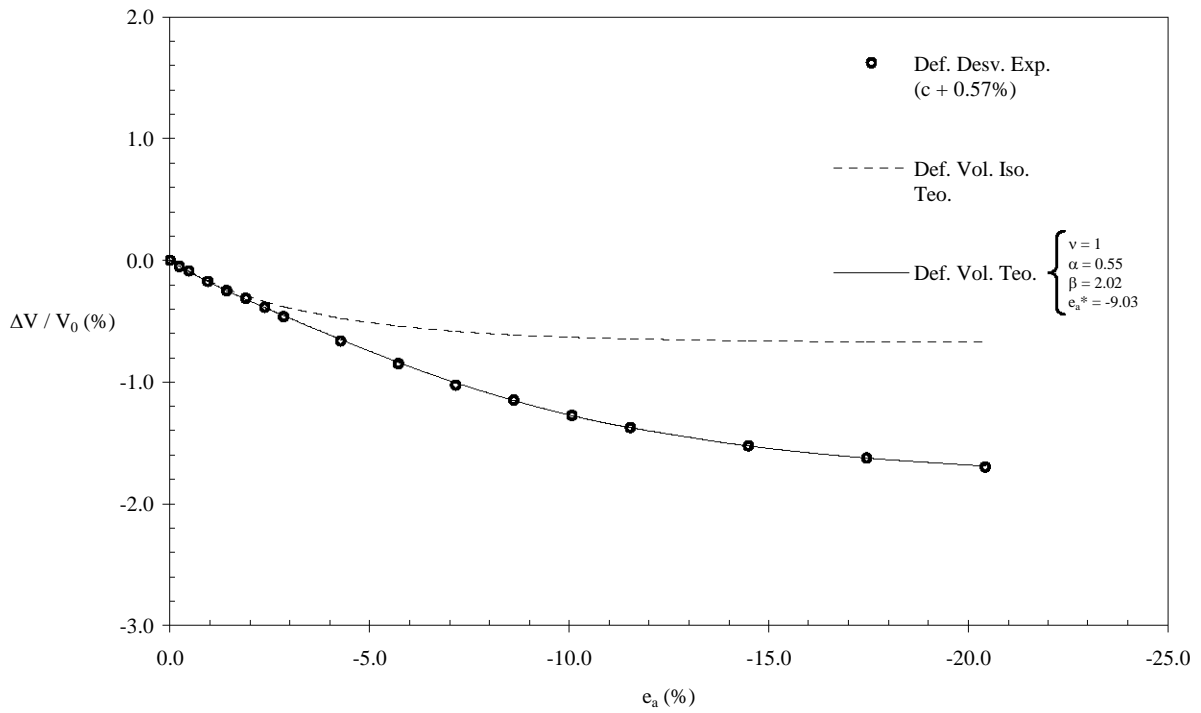
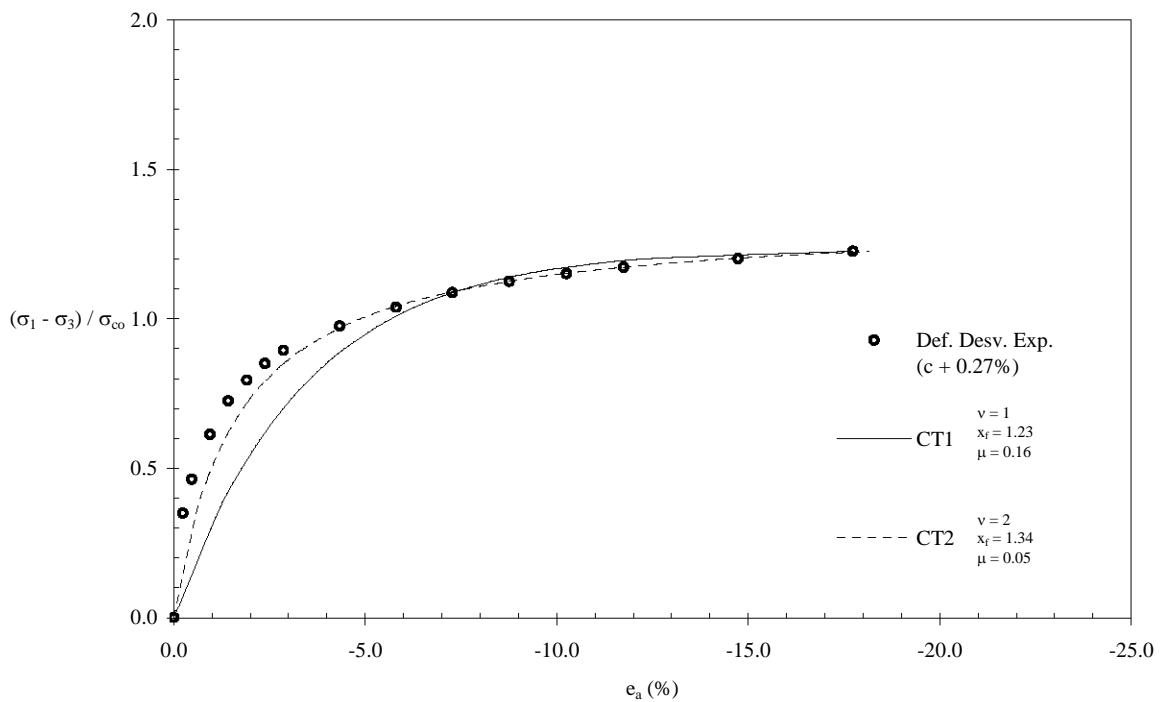


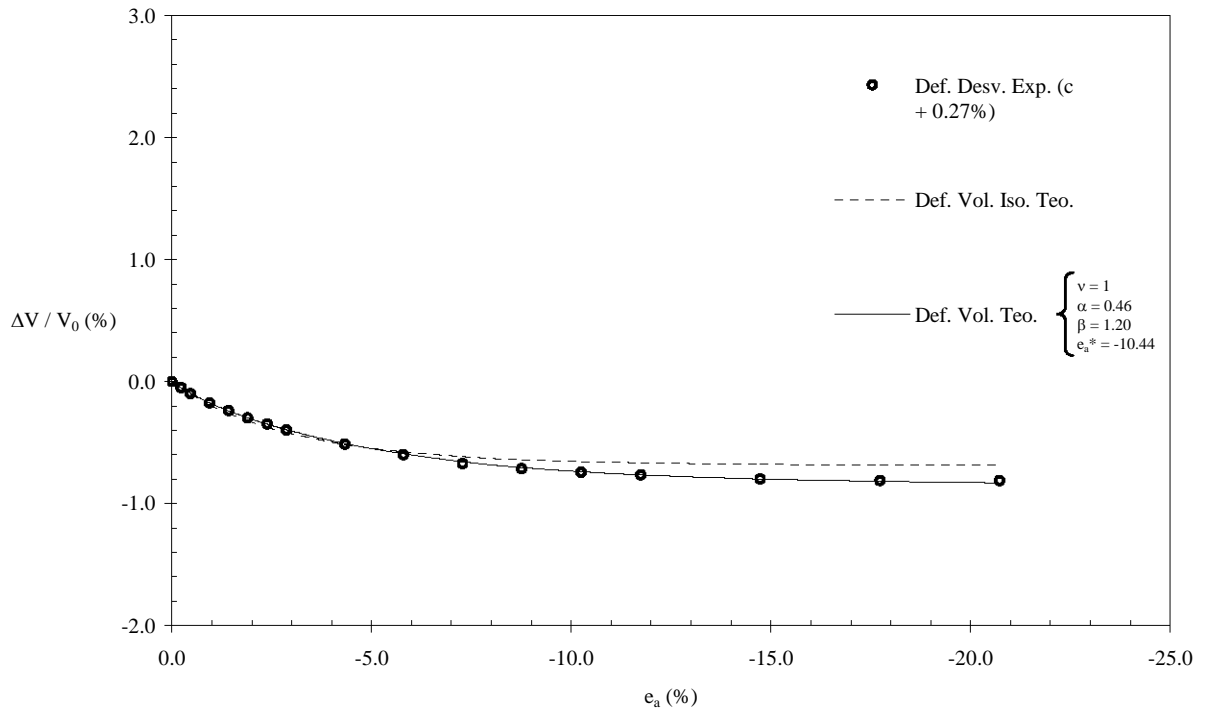
Fig. 3-45: Curva esfuerzo – deformación (AI) OCR = 2.0



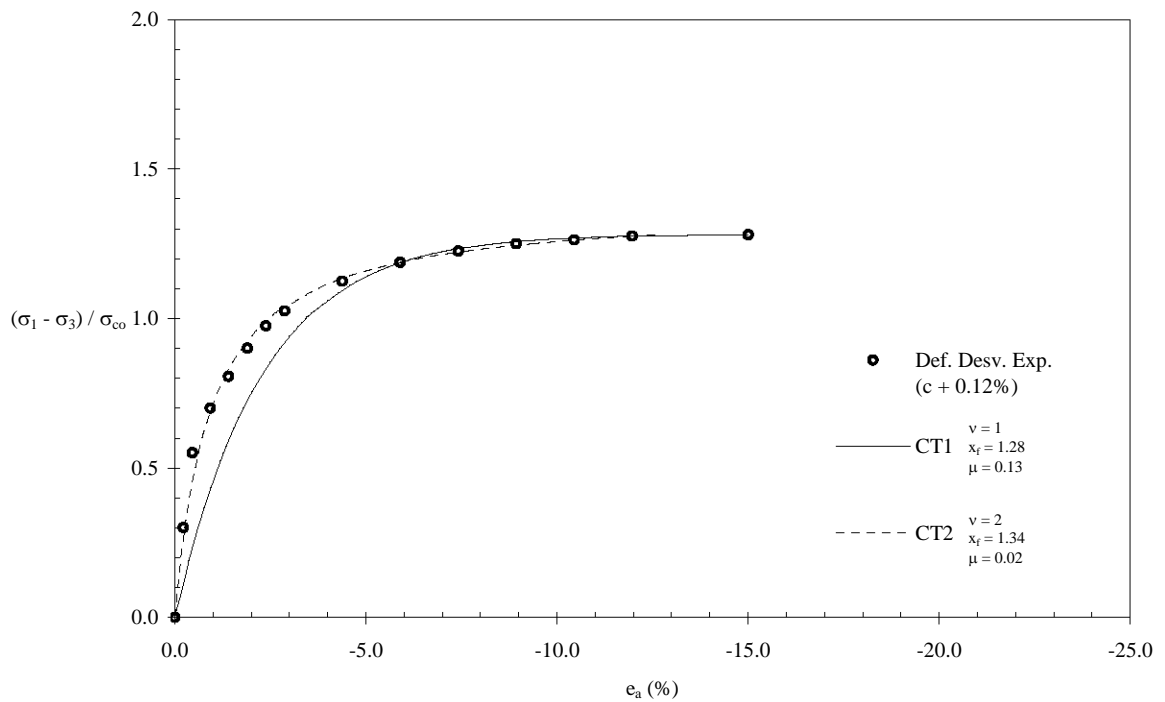
**Fig. 3-46: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 2.0**



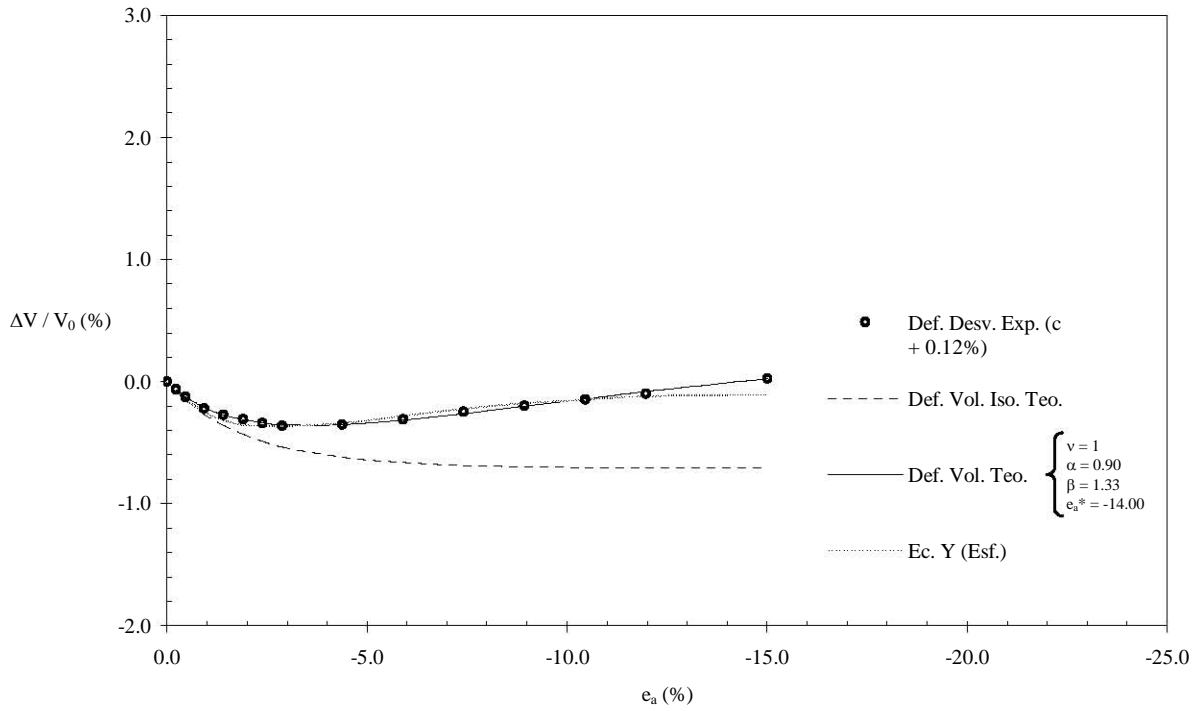
**Fig. 3-47: Curva esfuerzo – deformación (AI) OCR = 2.7**



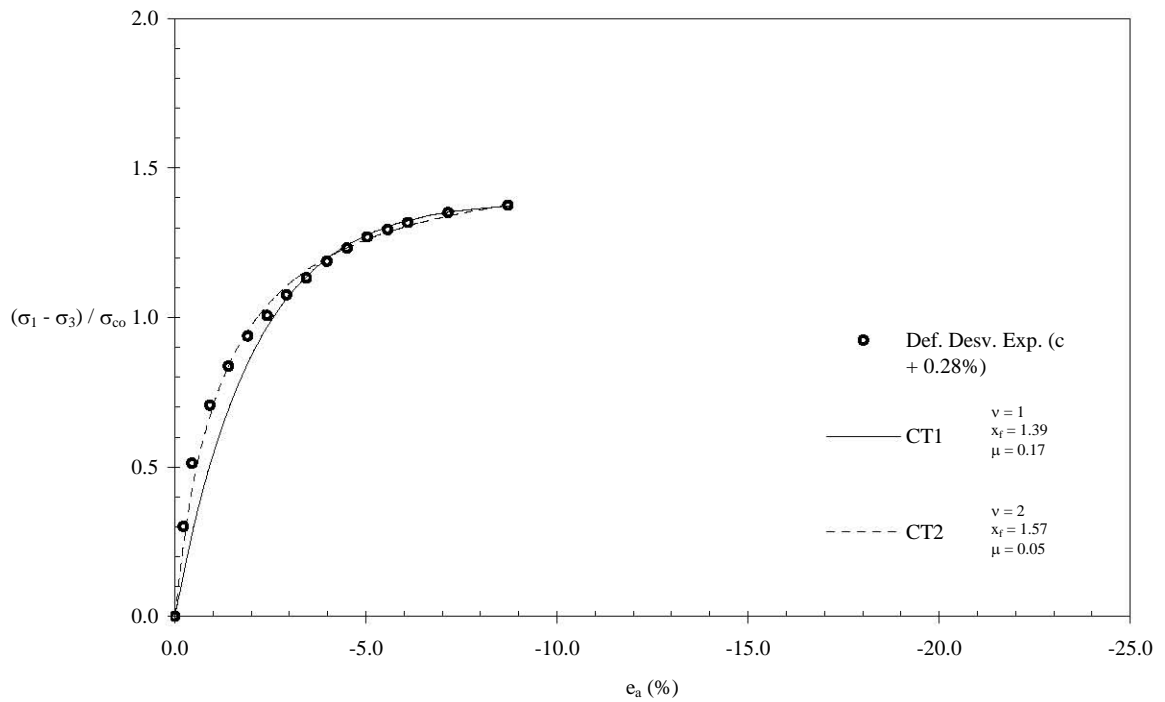
**Fig. 3-48: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 2.7**



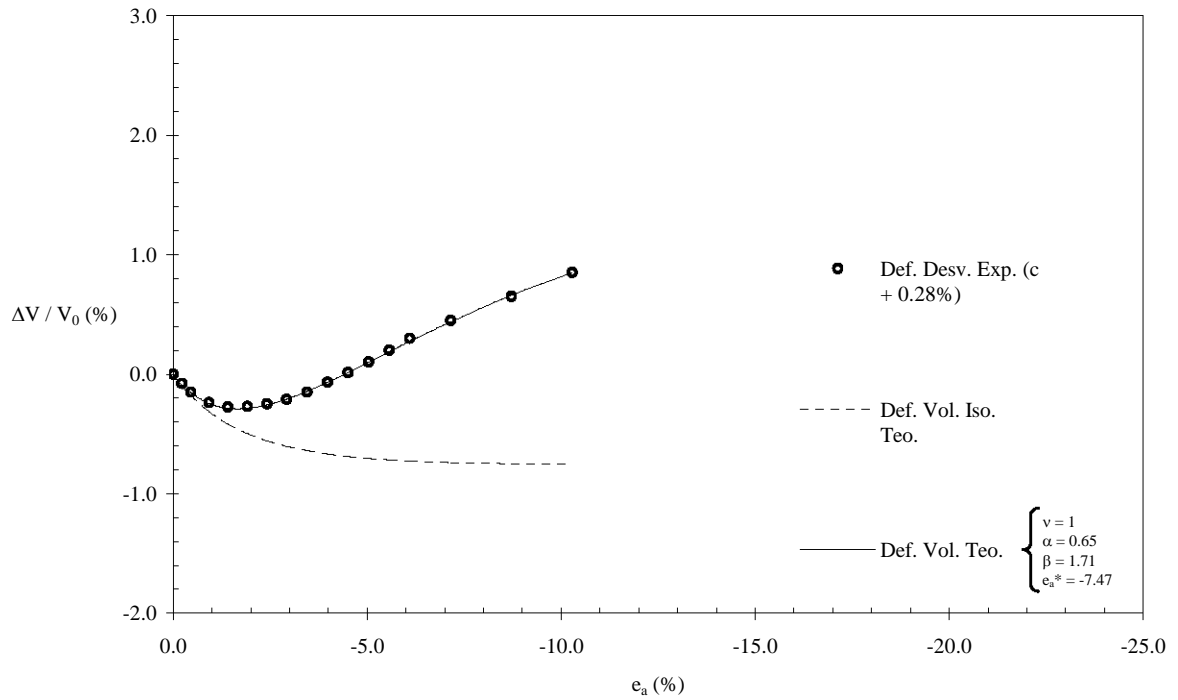
**Fig. 3-49: Curva esfuerzo – deformación (AI) OCR = 4.0**



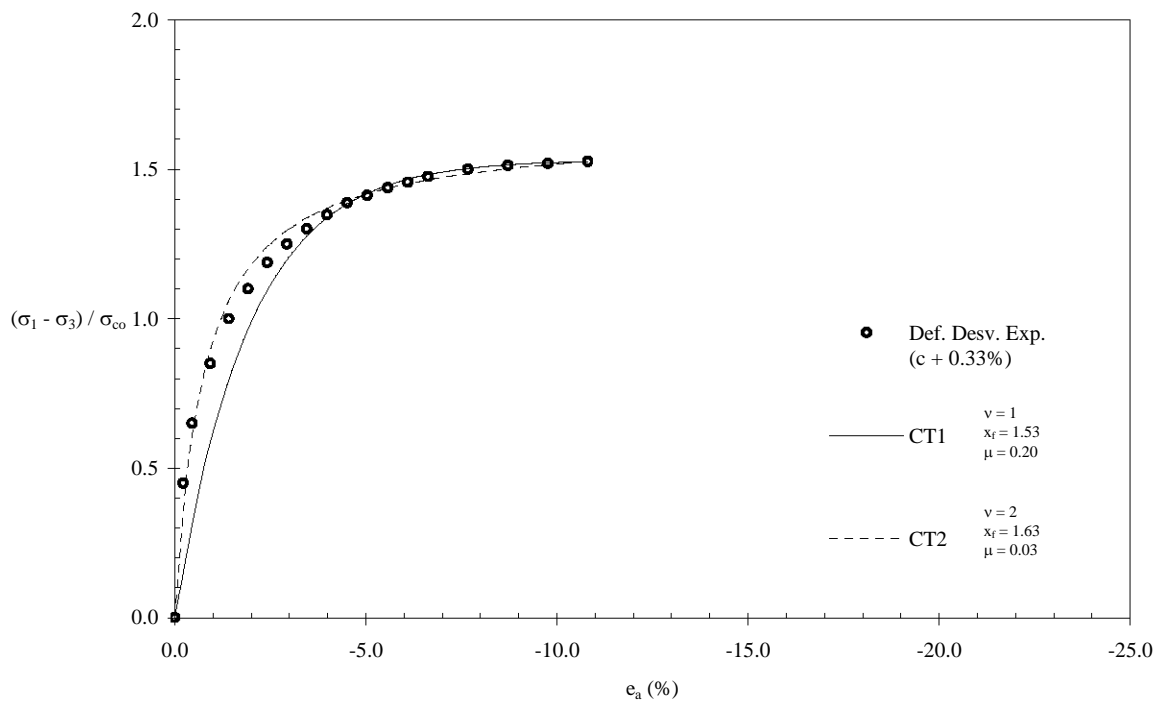
**Fig. 3-50: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 4.0**



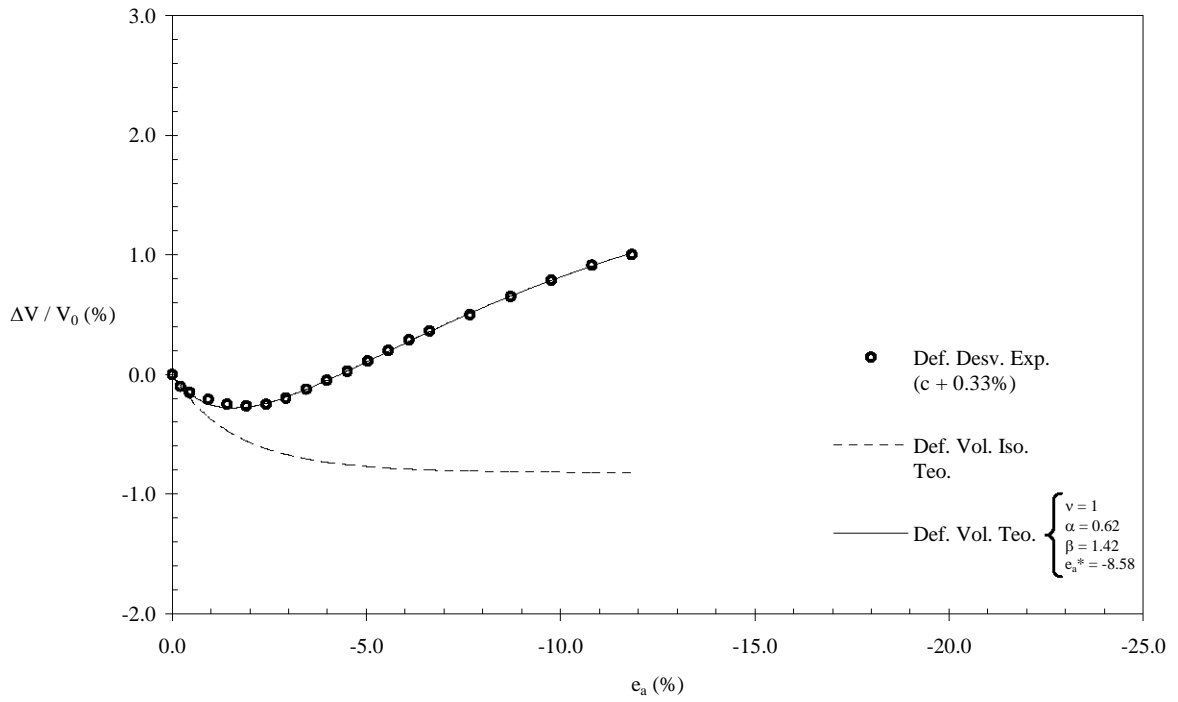
**Fig. 3-51: Curva esfuerzo – deformación (AI) OCR = 8.0**



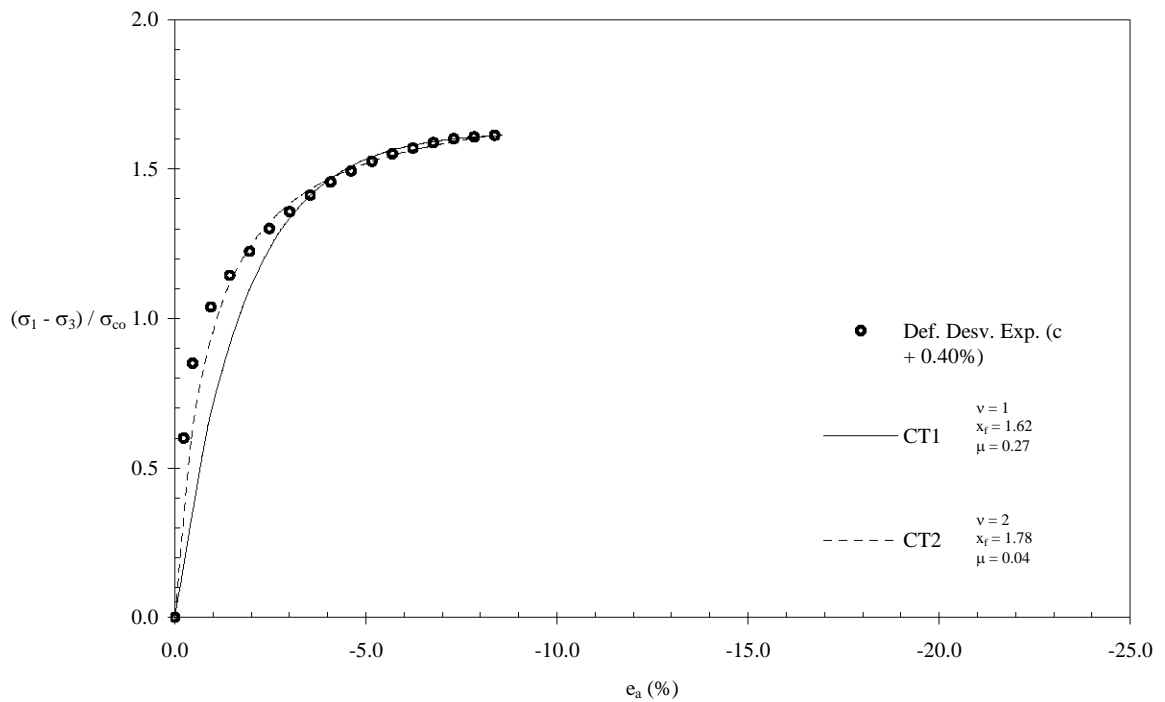
**Fig. 3-52: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 8.0**



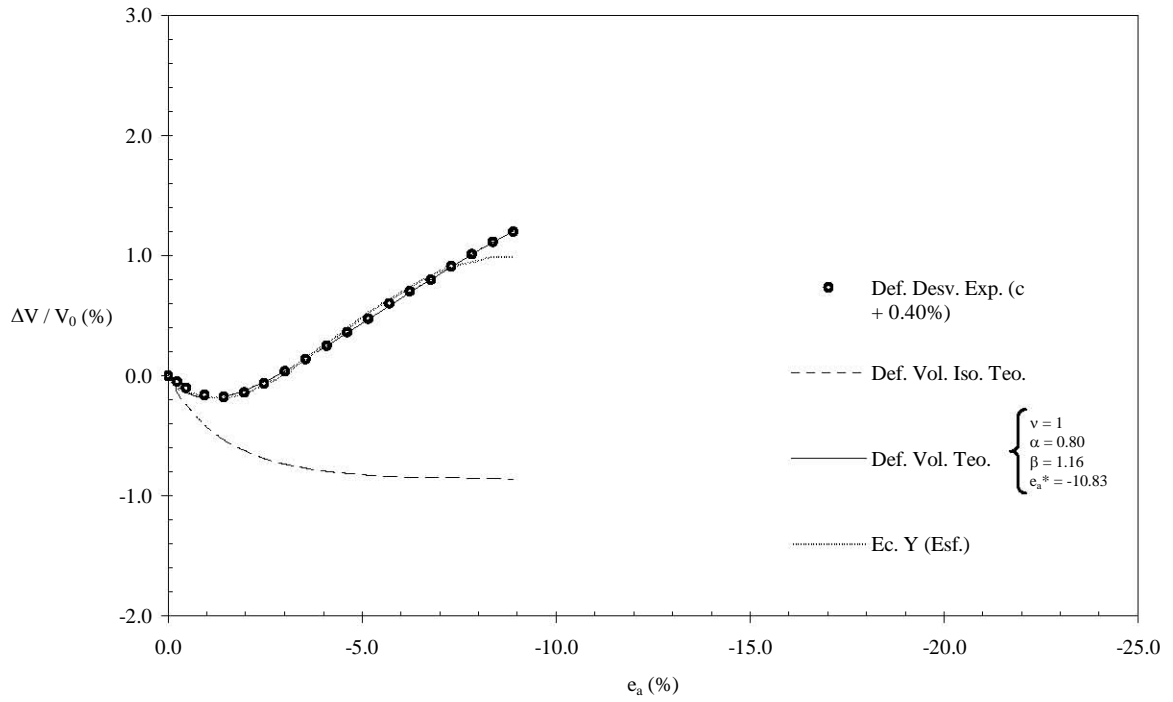
**Fig. 3-53: Curva esfuerzo – deformación (AI) OCR = 12.0**



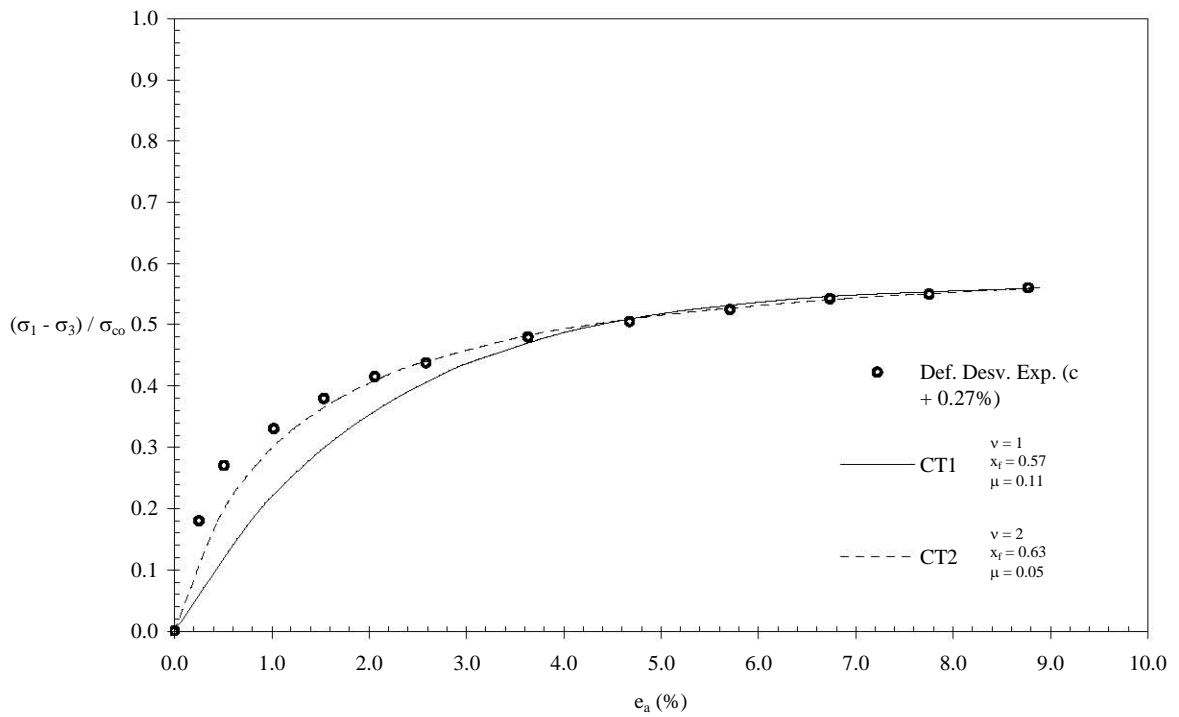
**Fig. 3-54: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 12.0**



**Fig. 3-55: Curva esfuerzo – deformación (AI) OCR = 24.0**



**Fig. 3-56: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 24.0**



**Fig. 3-57: Curva esfuerzo – deformación (AD) OCR = 1.0**



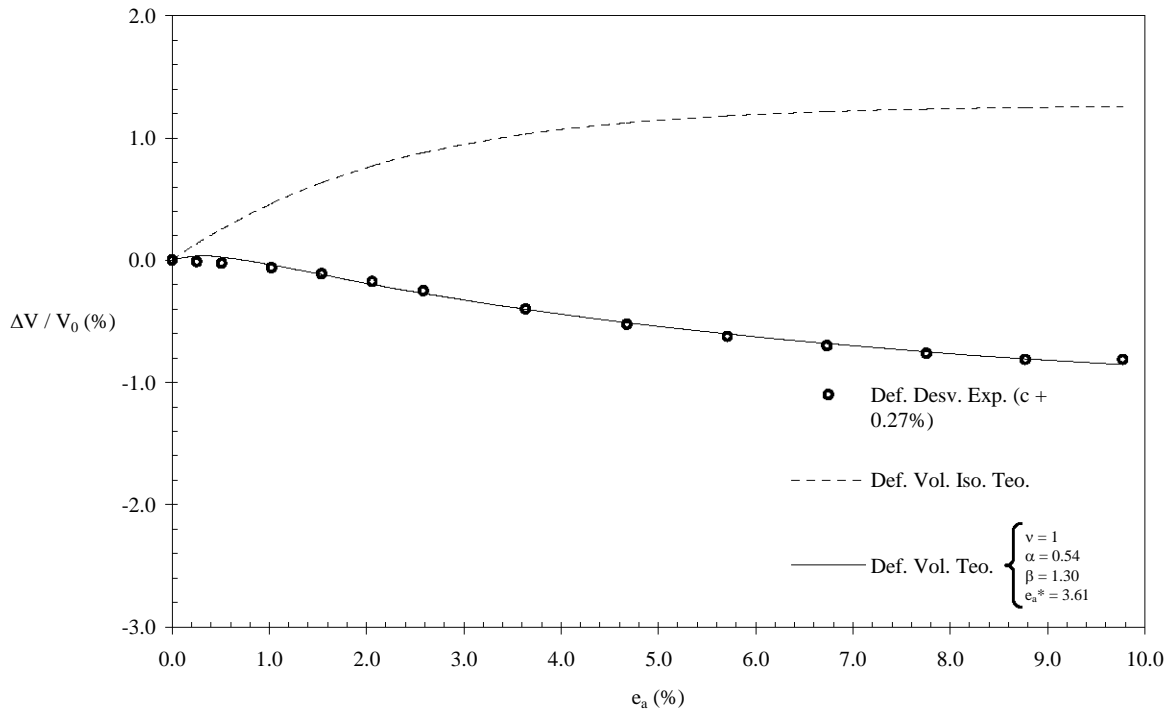


Fig. 3-58: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 1.0

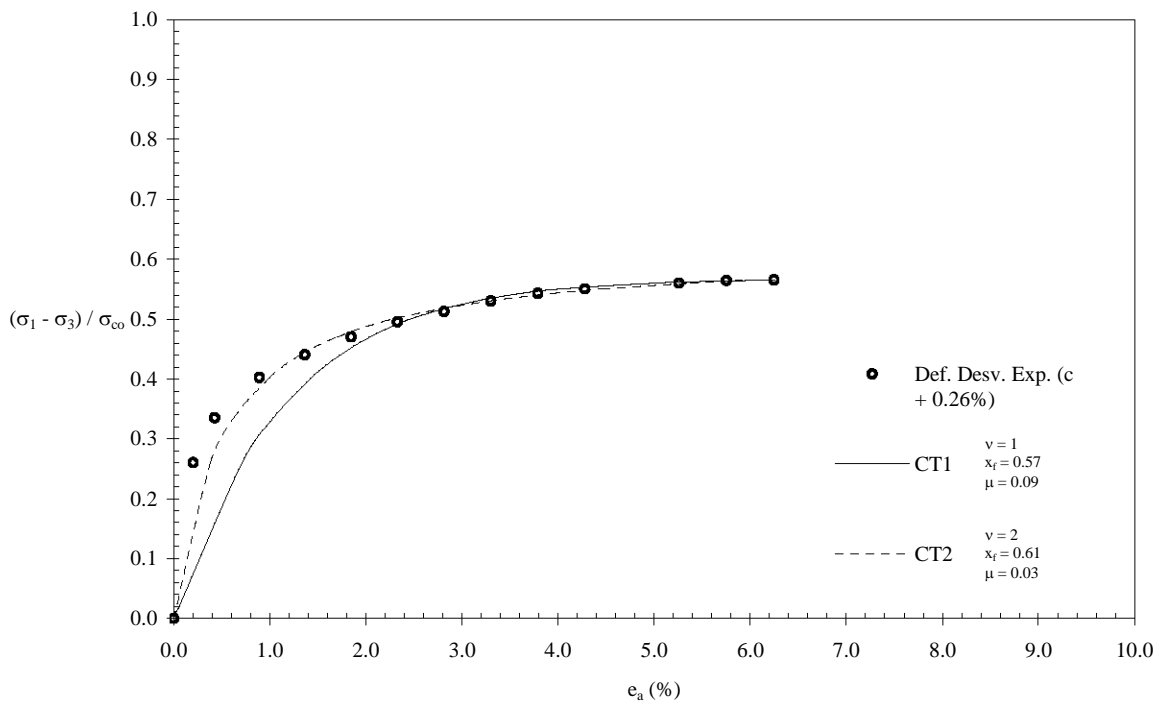
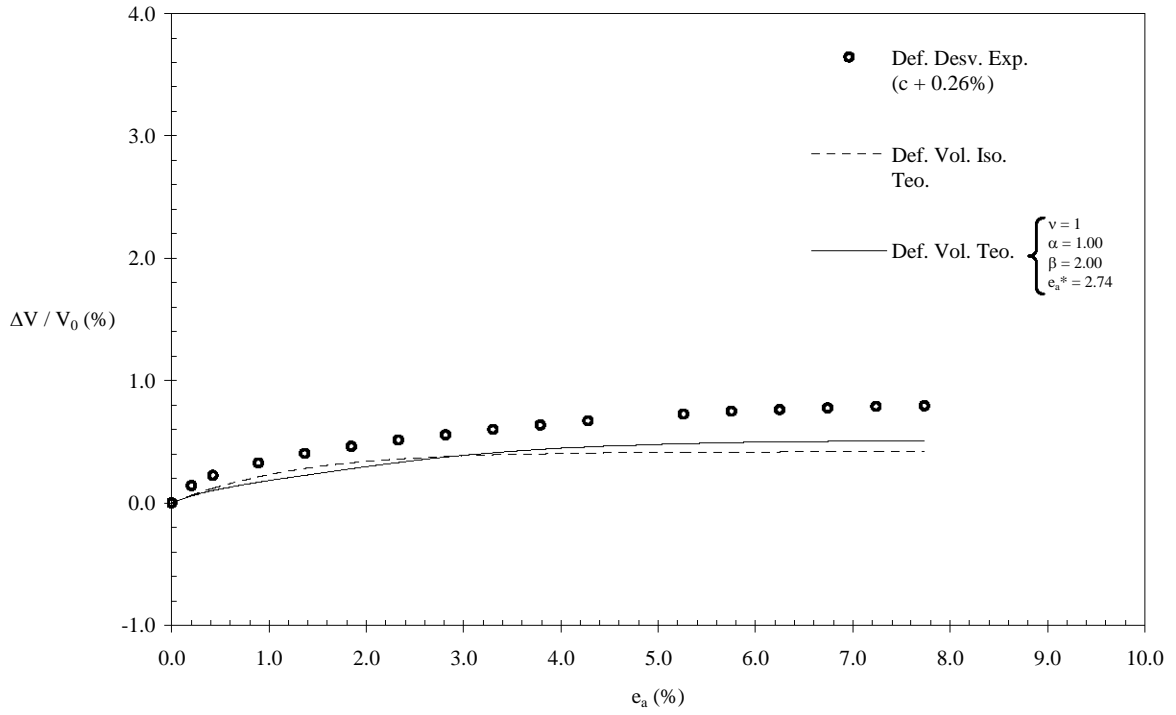
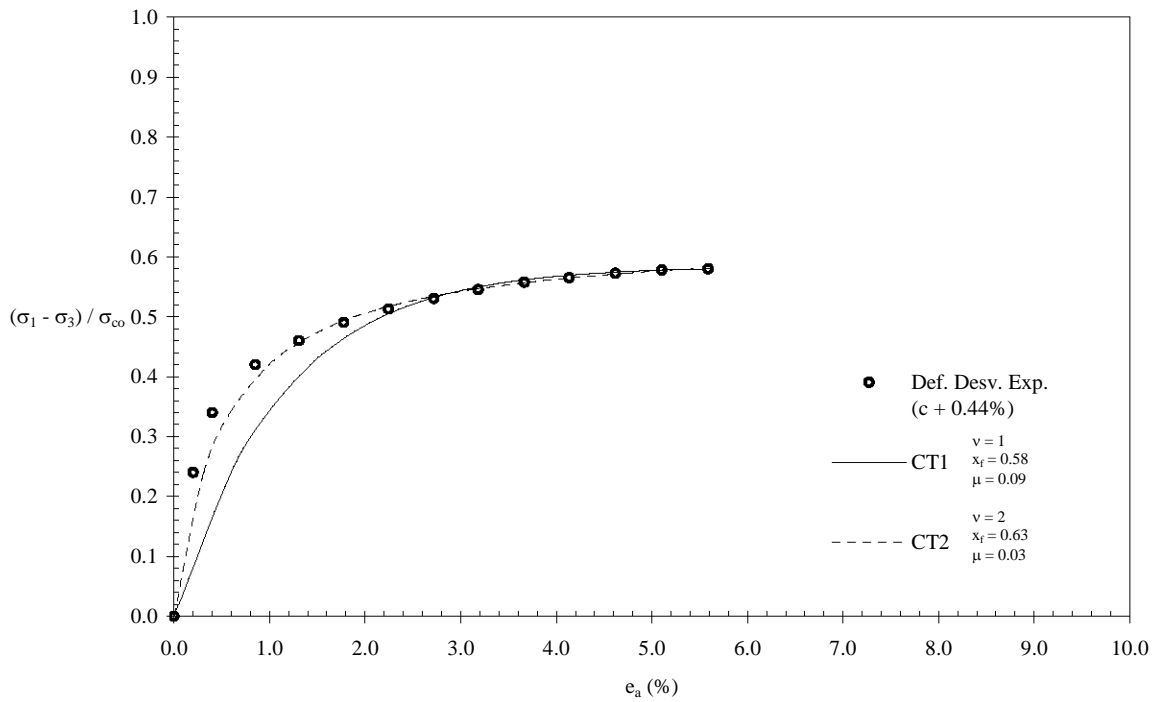


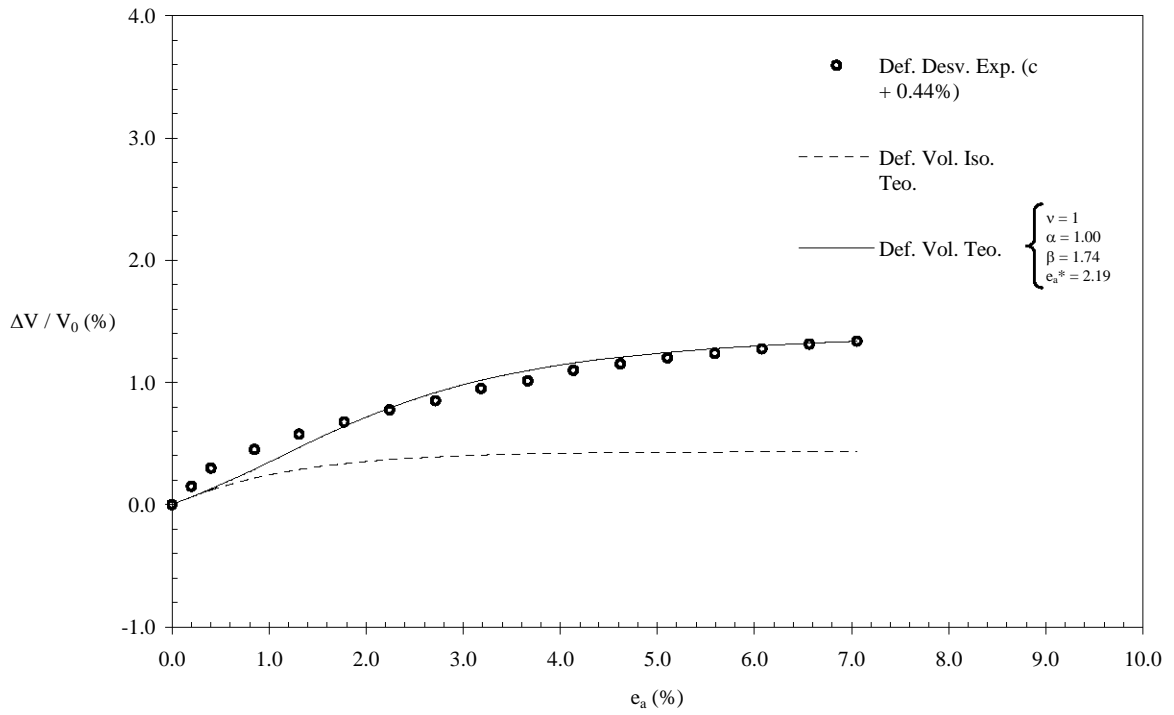
Fig. 3-59: Curva esfuerzo – deformación (AD) OCR = 1.7



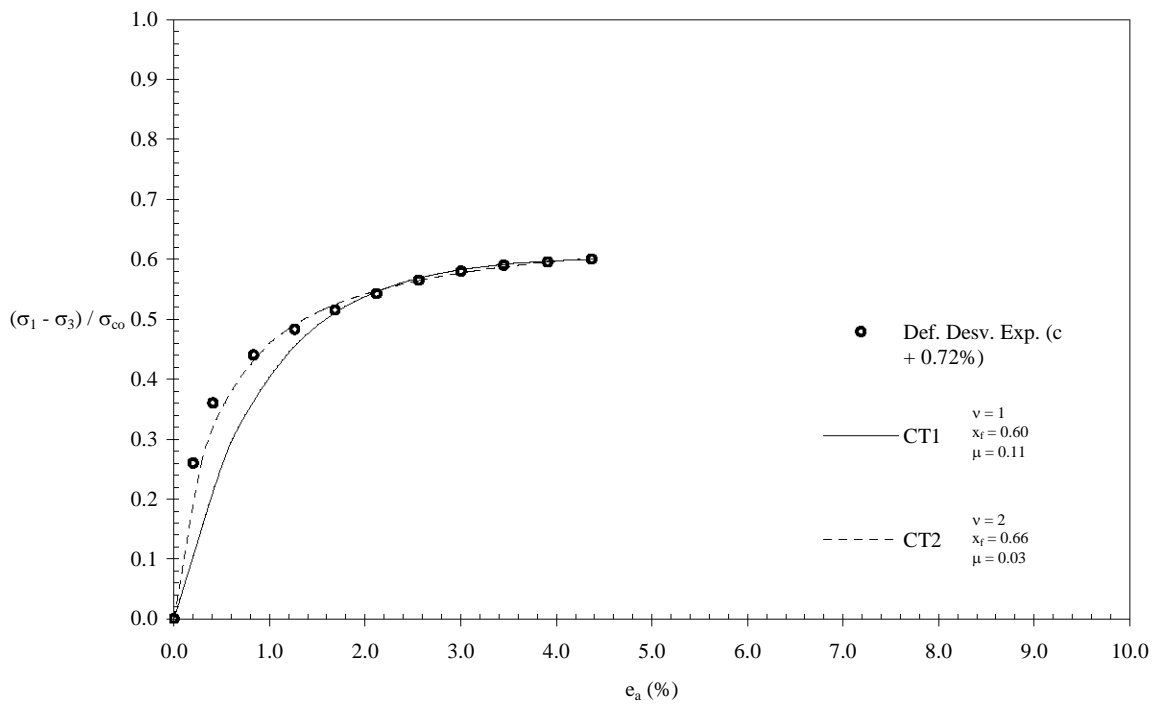
**Fig. 3-60: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 1.7**



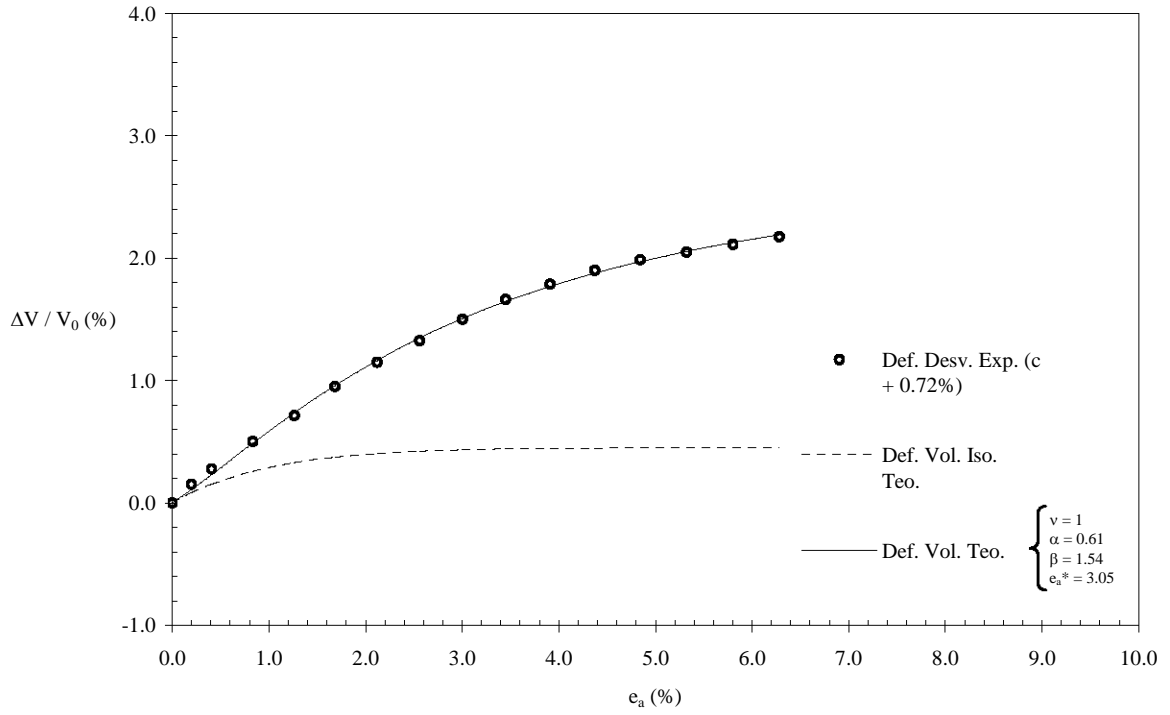
**Fig. 3-61: Curva esfuerzo – deformación (AD) OCR = 2.0**



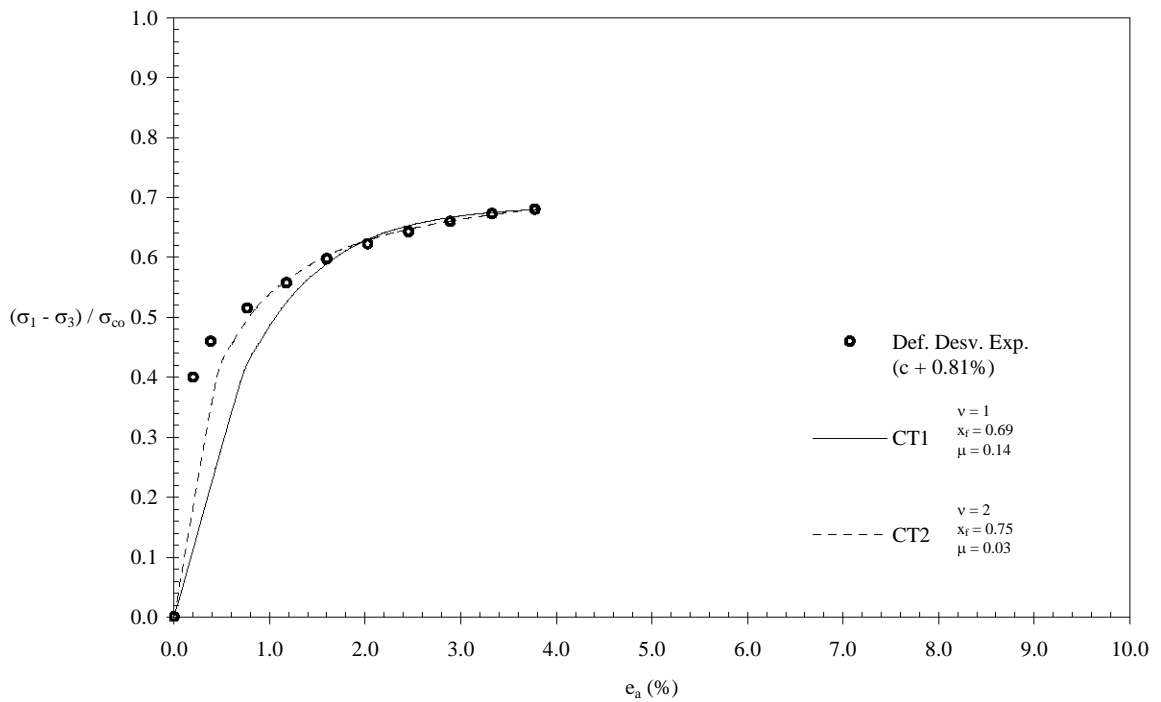
**Fig. 3-62: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 2.0**



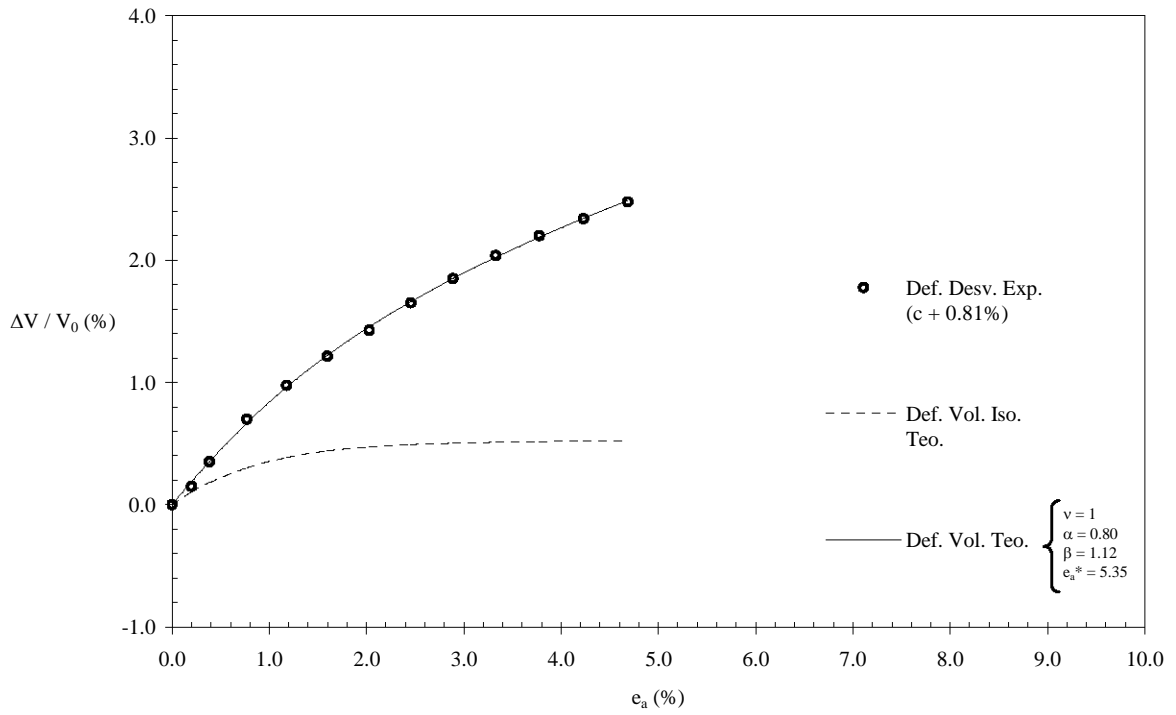
**Fig. 3-63: Curva esfuerzo – deformación (AD) OCR = 4.0**



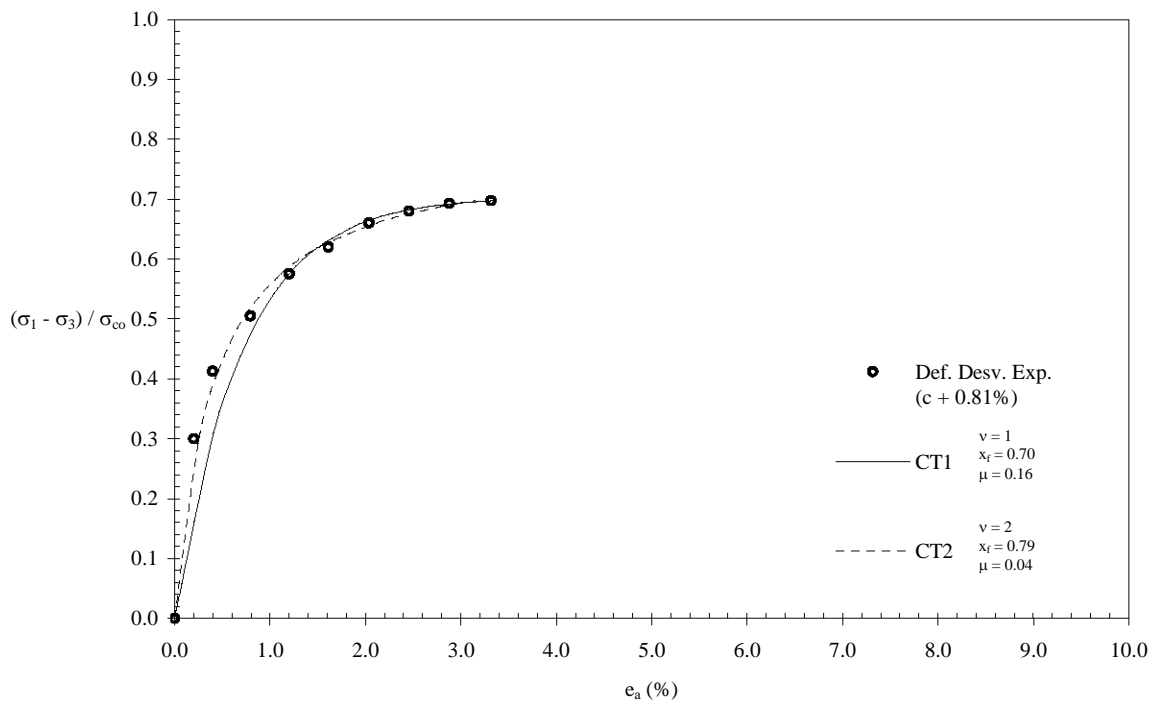
**Fig. 3-64: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 4.0**



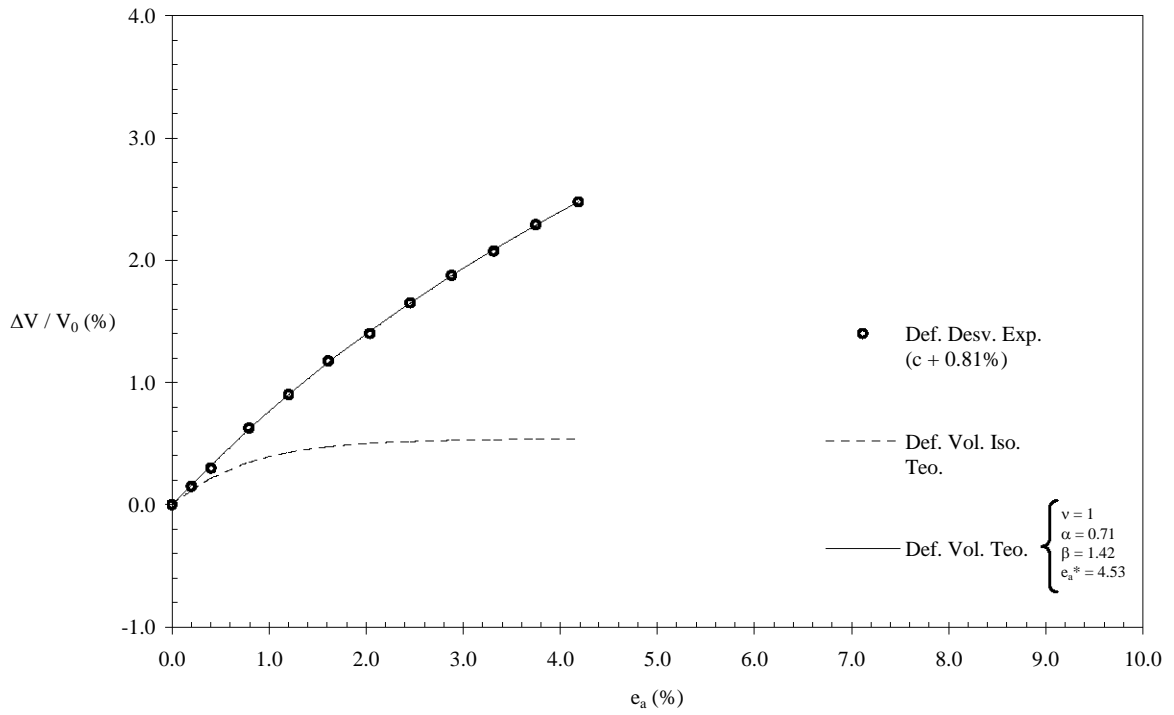
**Fig. 3-65: Curva esfuerzo – deformación (AD) OCR = 8.0**



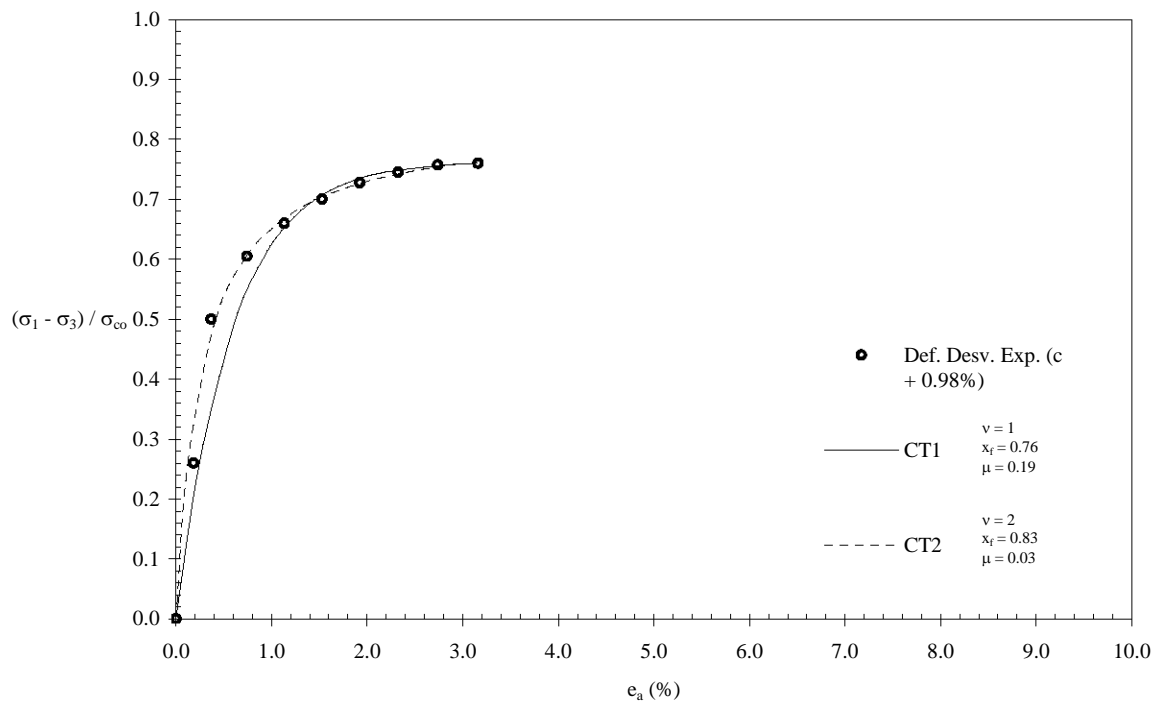
**Fig. 3-66: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 8.0**



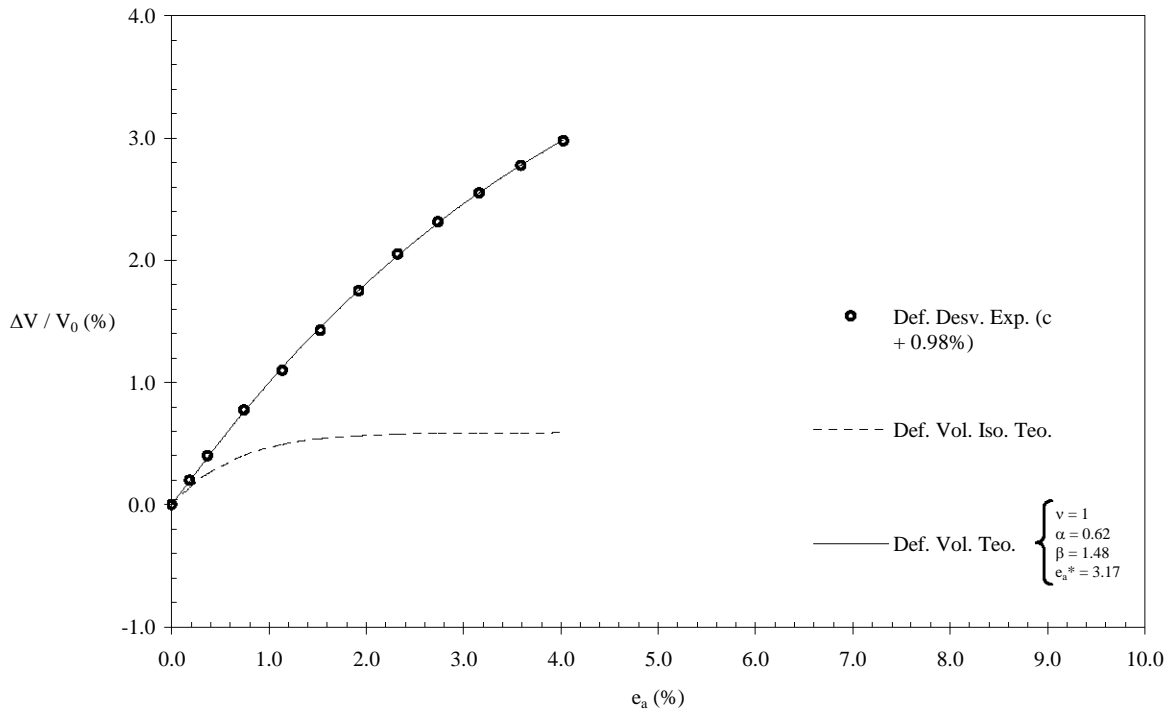
**Fig. 3-67: Curva esfuerzo – deformación (AD) OCR = 12.0**



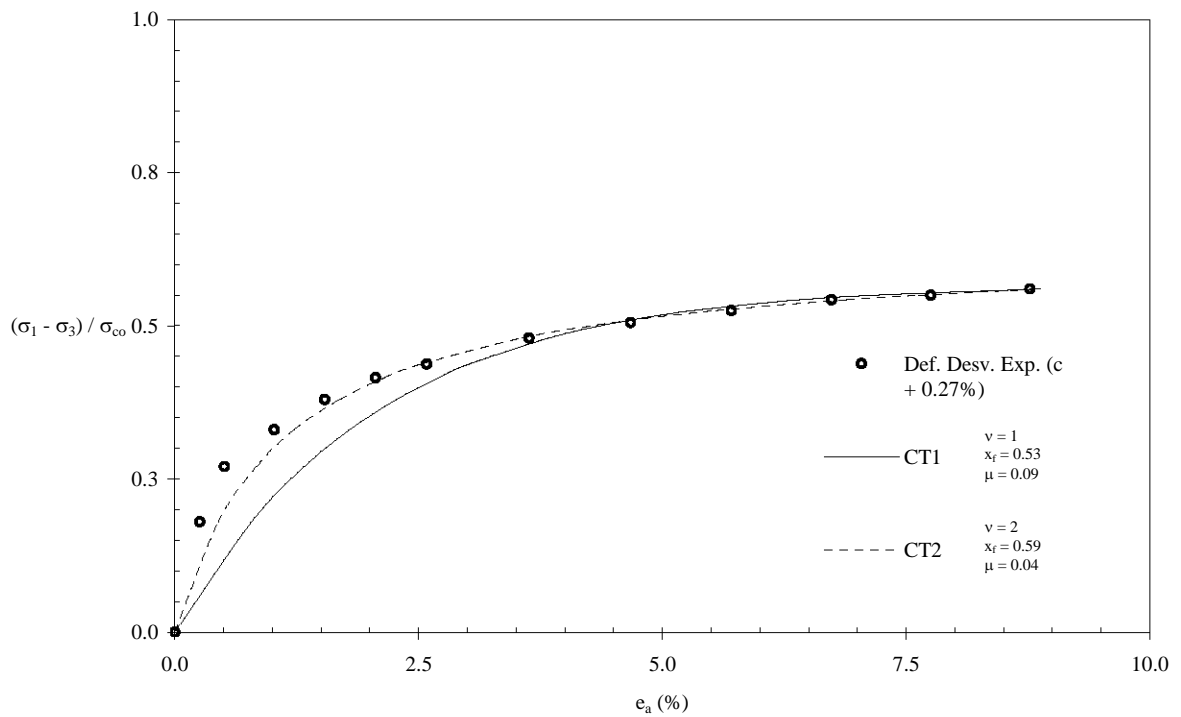
**Fig. 3-68: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 12.0**



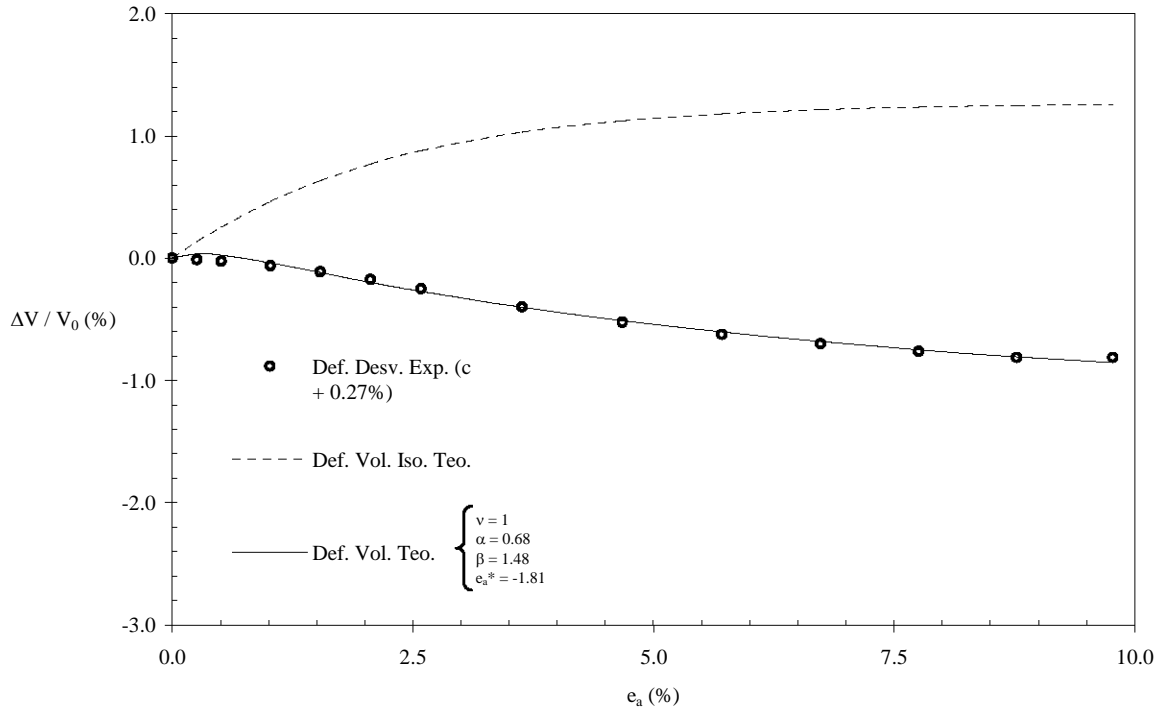
**Fig. 3-69: Curva esfuerzo – deformación (AD) OCR = 24.0**



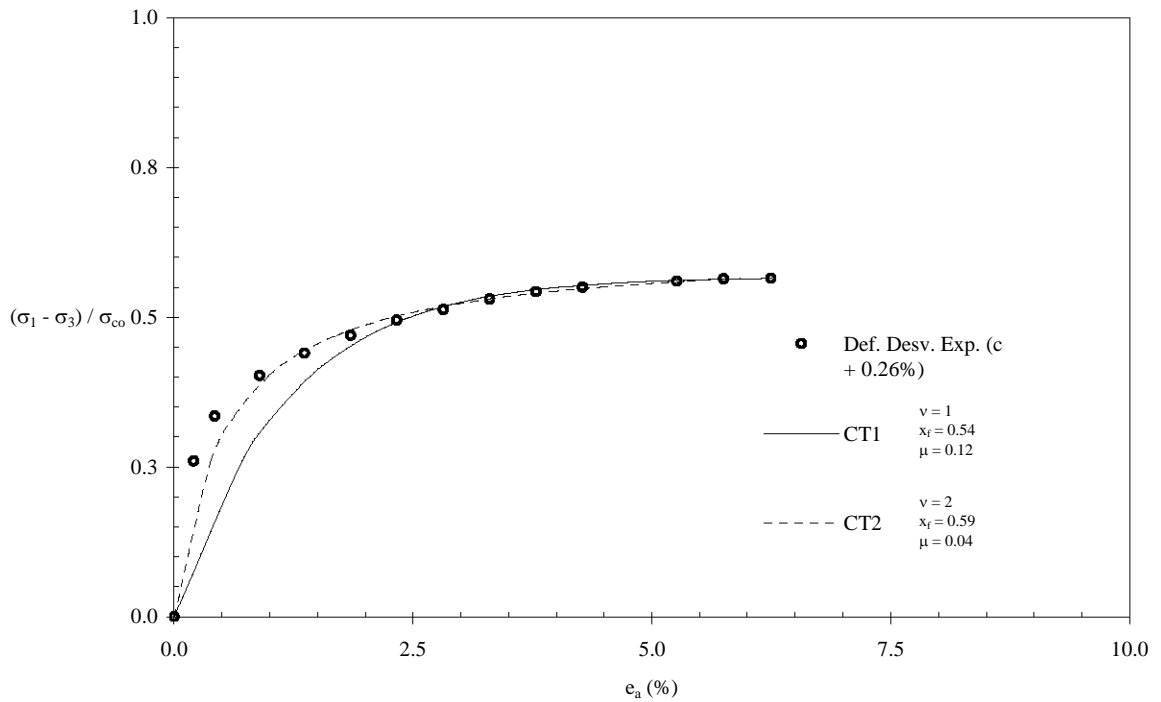
**Fig. 3-70: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 24.0**



**Fig. 3-71: Curva esfuerzo – deformación (RD) OCR = 1.0**

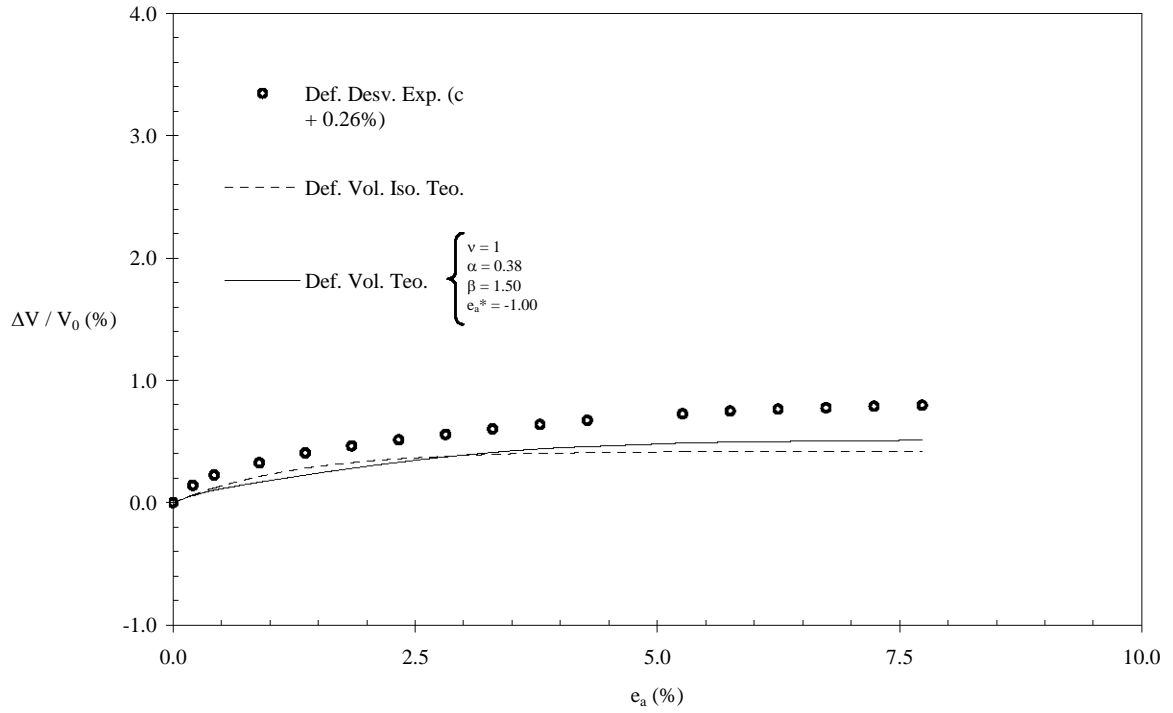


**Fig. 3-72: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 1.0**

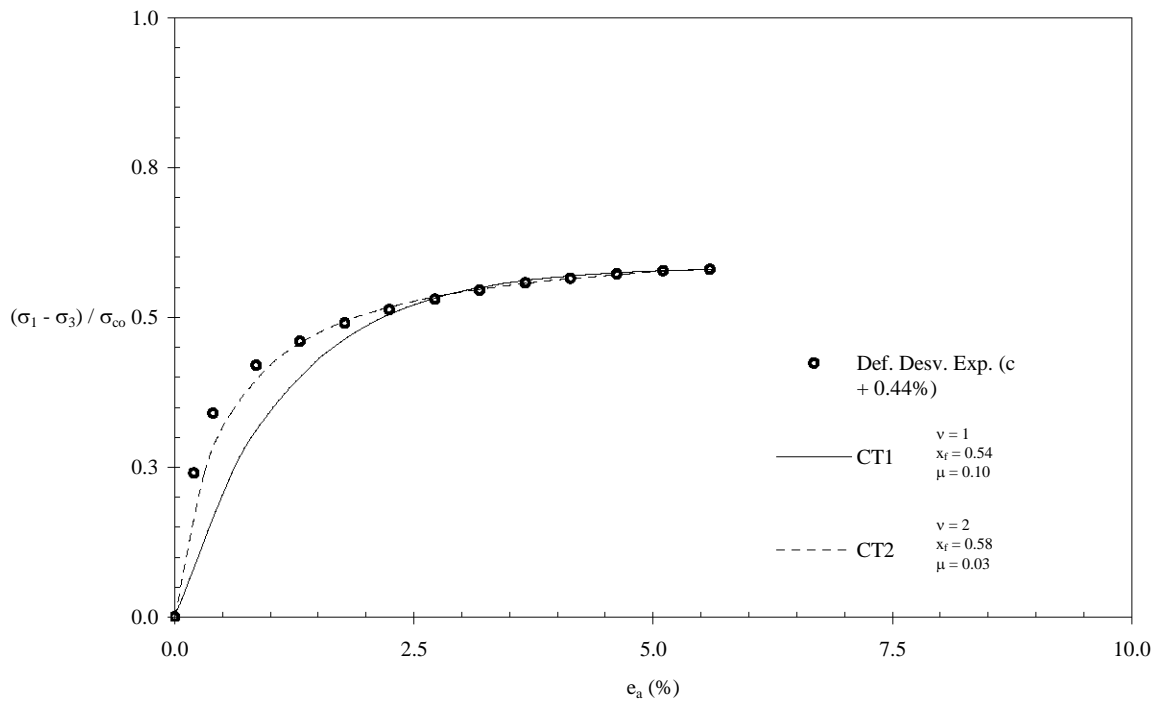


**Fig. 3-73: Curva esfuerzo – deformación (RD) OCR = 1.7**

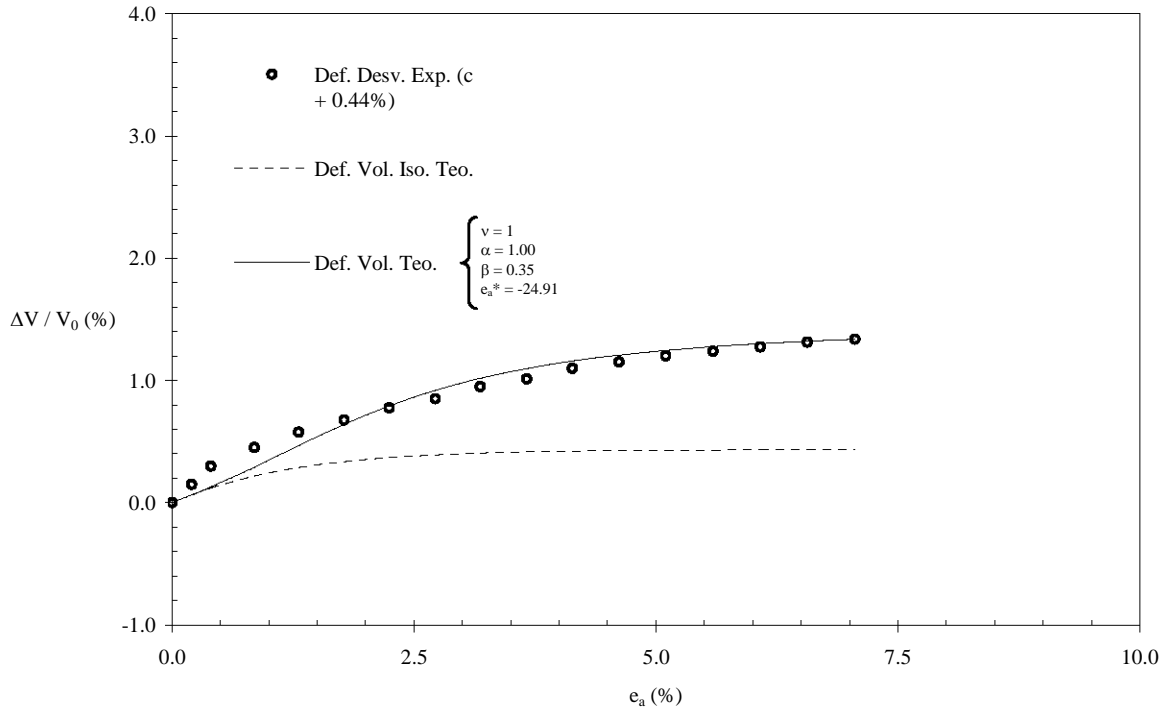




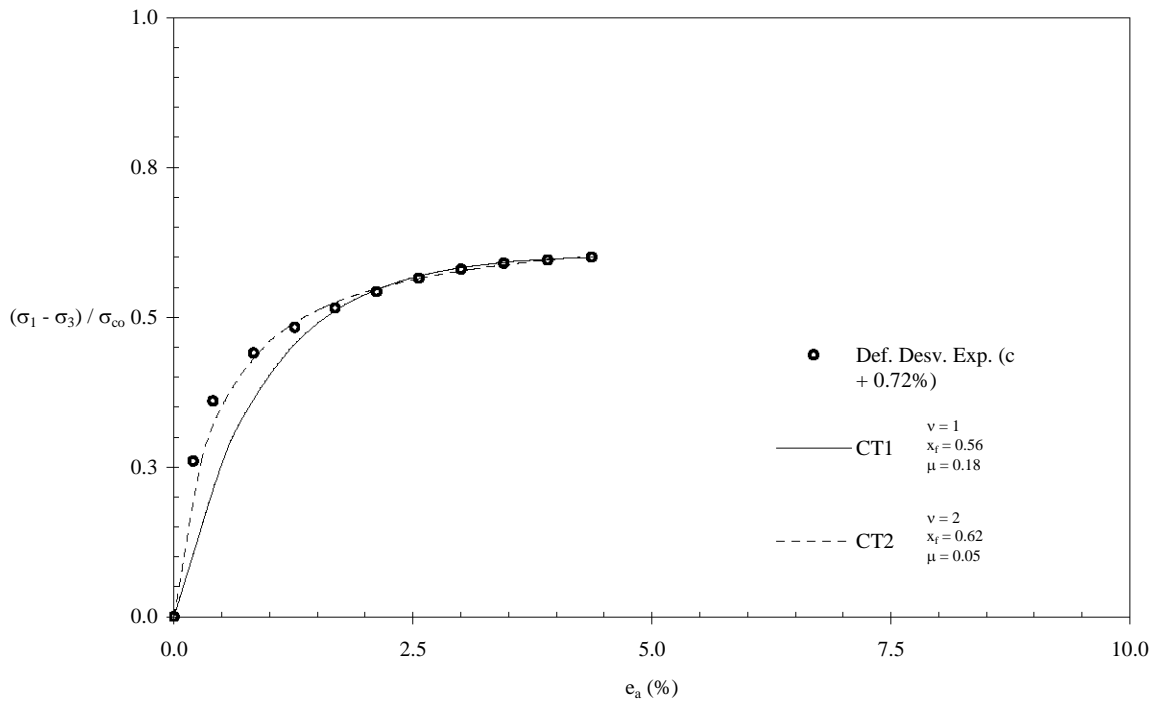
**Fig. 3-74: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 1.7**



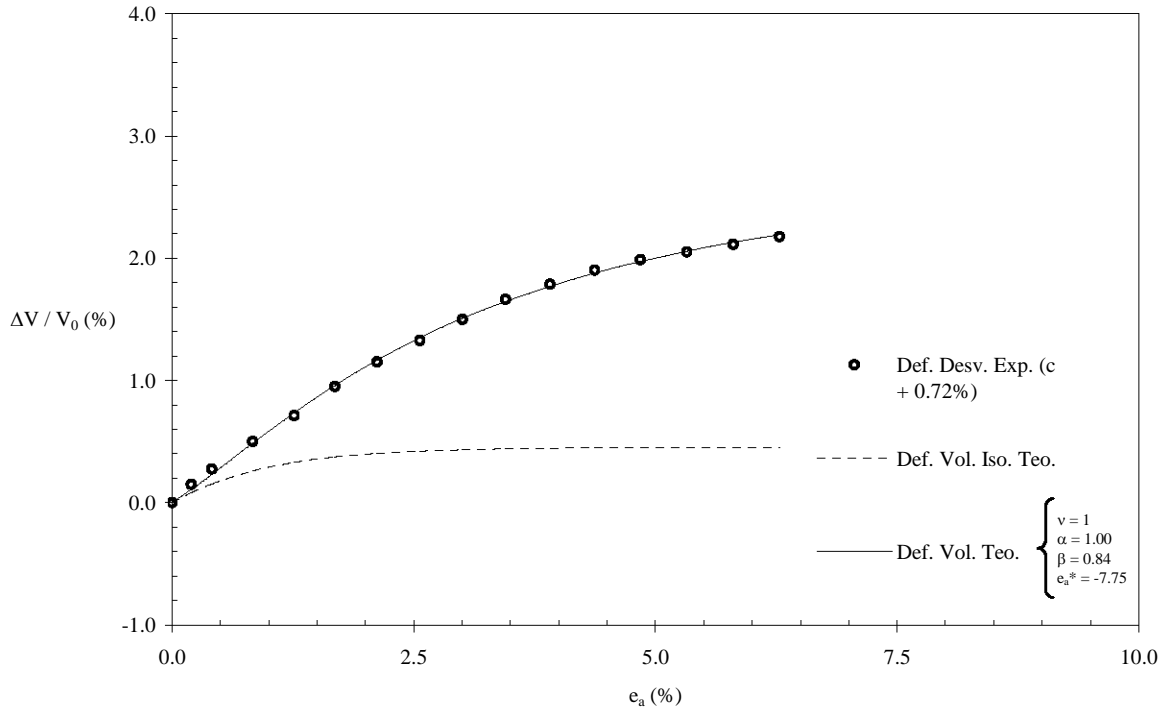
**Fig. 3-75: Curva esfuerzo – deformación (RD) OCR = 2.0**



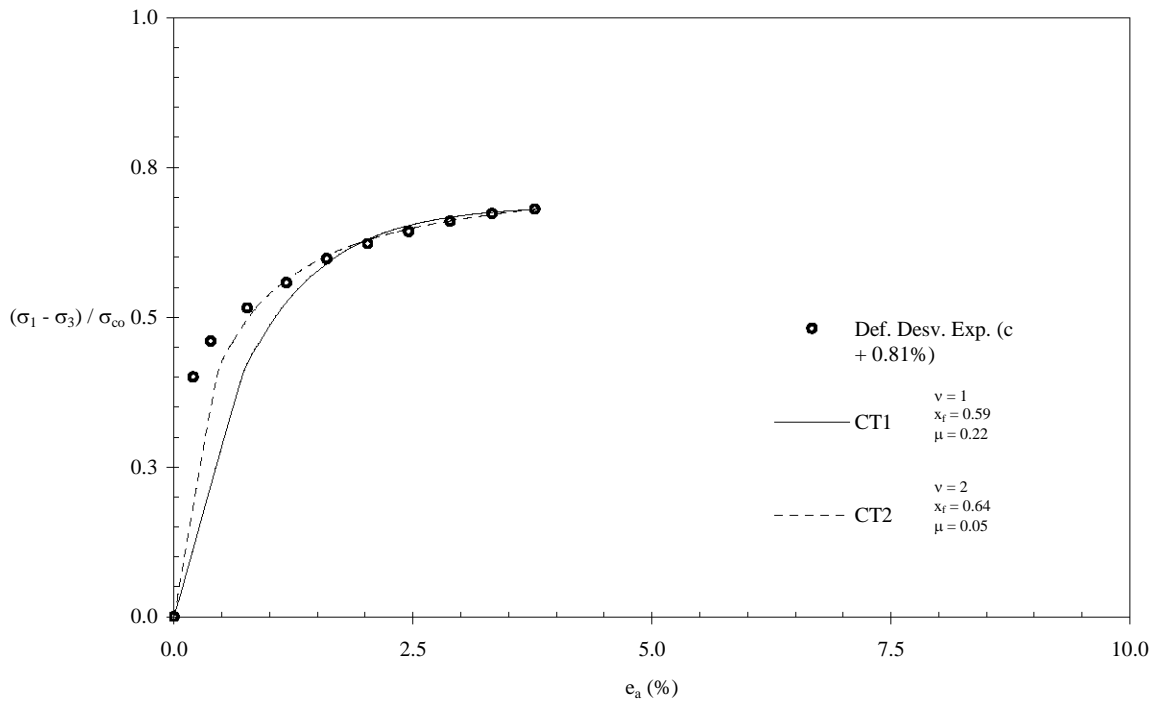
**Fig. 3-76: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 2.0**



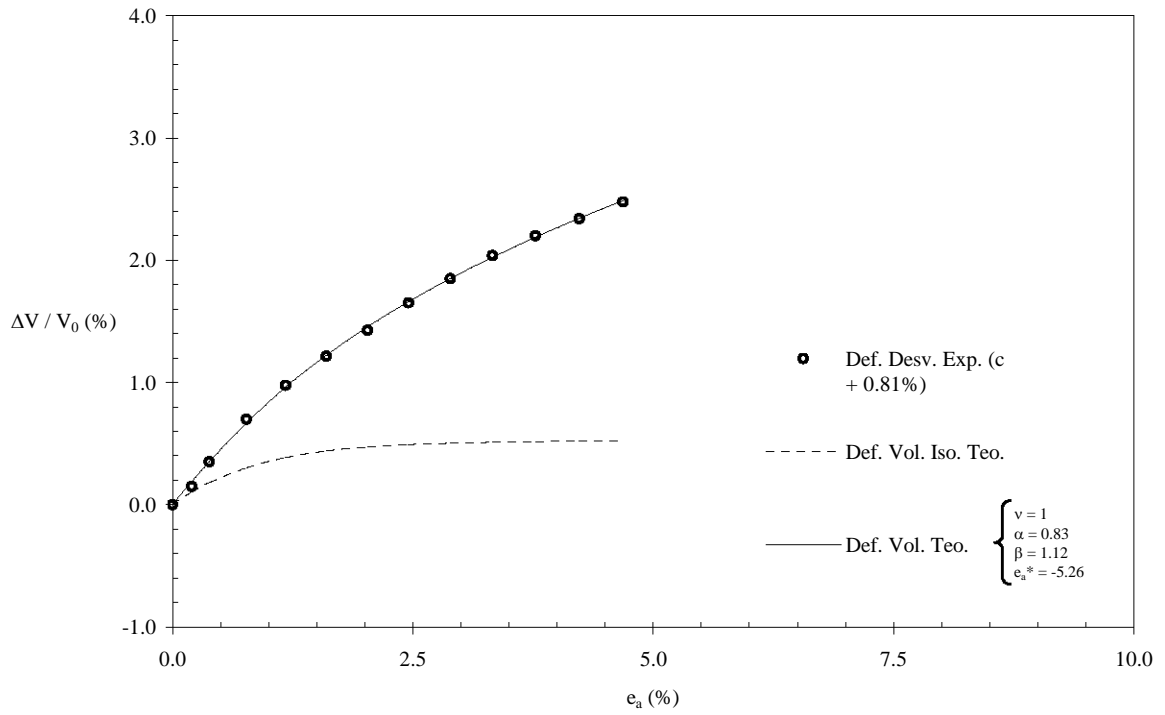
**Fig. 3-77: Curva esfuerzo – deformación (RD) OCR = 4.0**



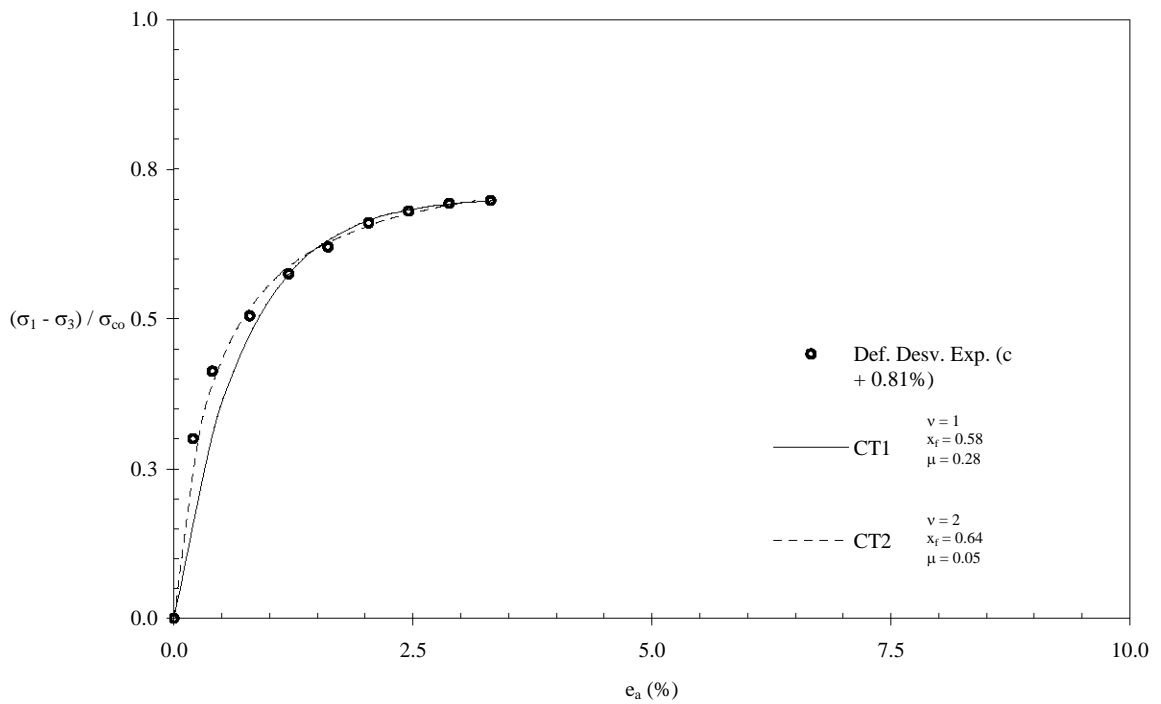
**Fig. 3-78: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 4.0**



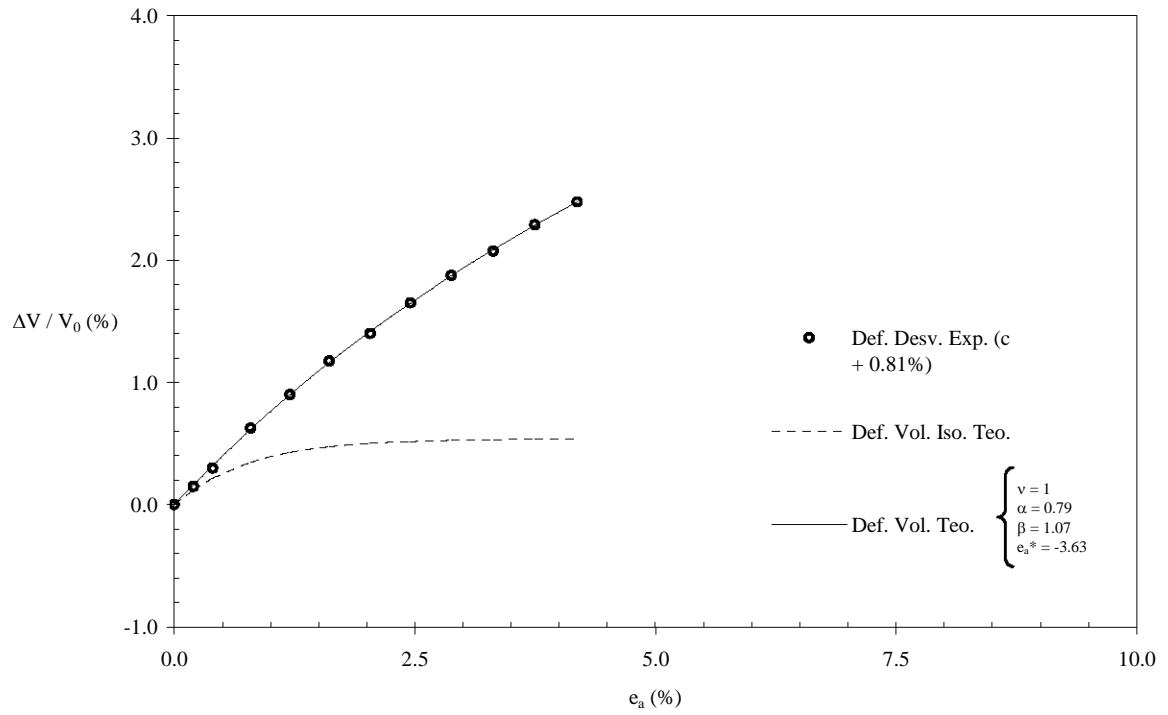
**Fig. 3-79: Curva esfuerzo – deformación (RD) OCR = 8.0**



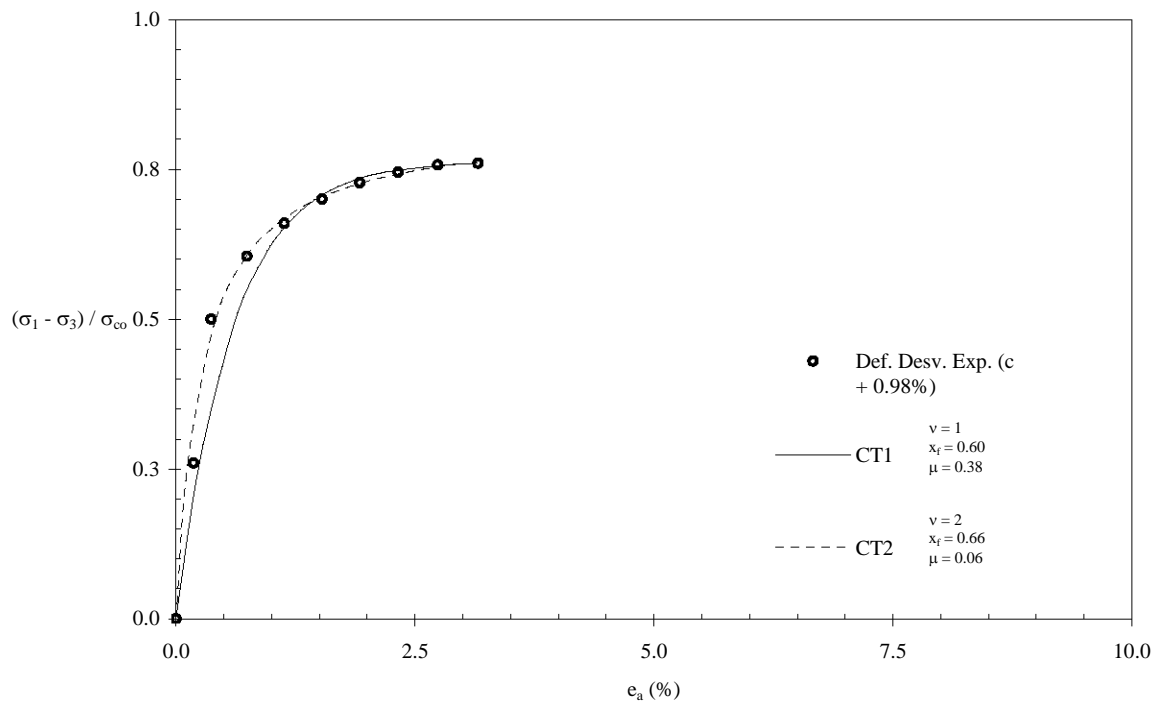
**Fig. 3-80: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 8.0**



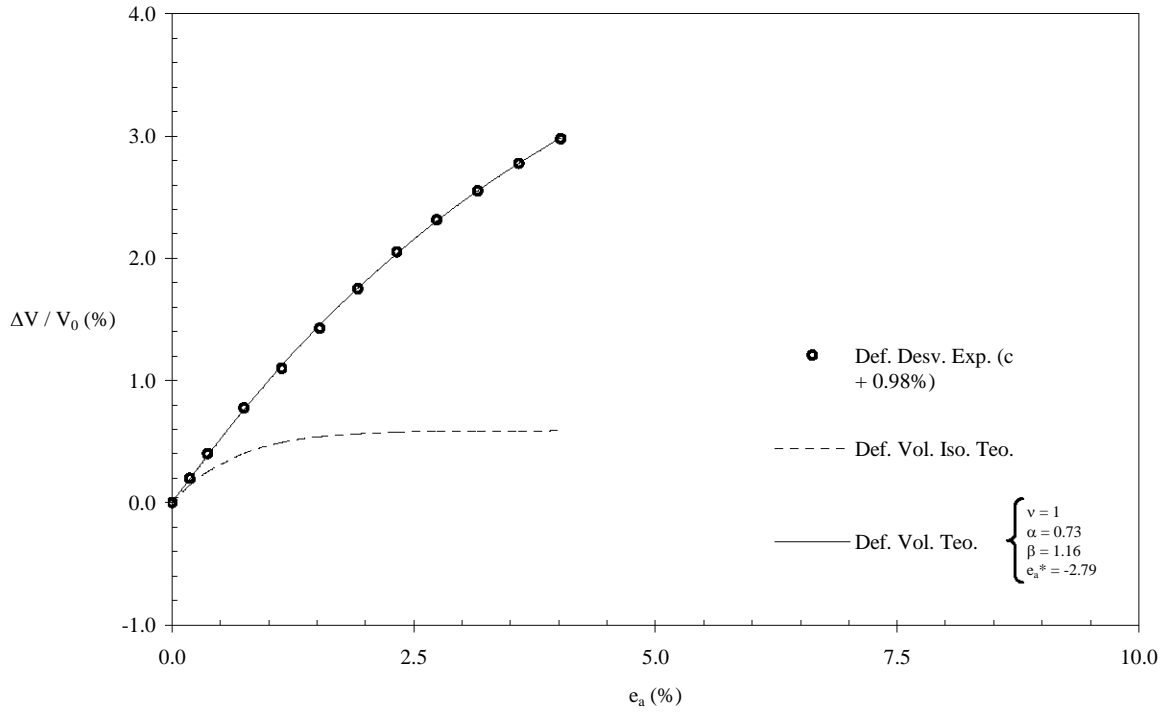
**Fig. 3-81: Curva esfuerzo – deformación (RD) OCR = 12.0**



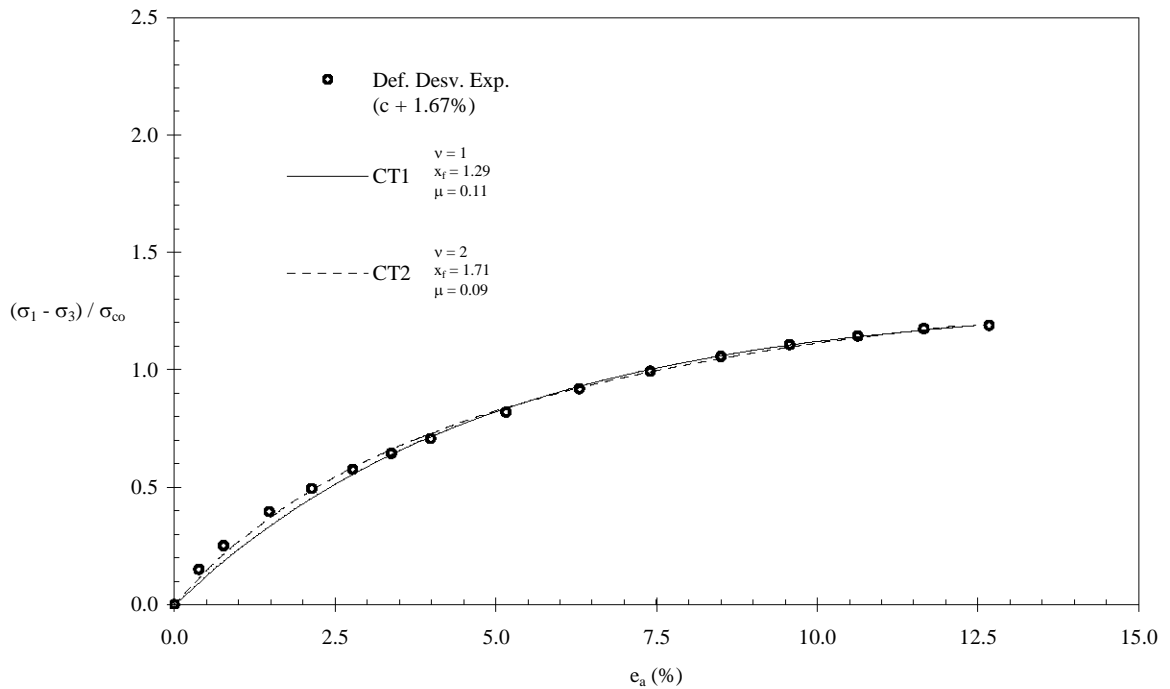
**Fig. 3-82: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 12.0**



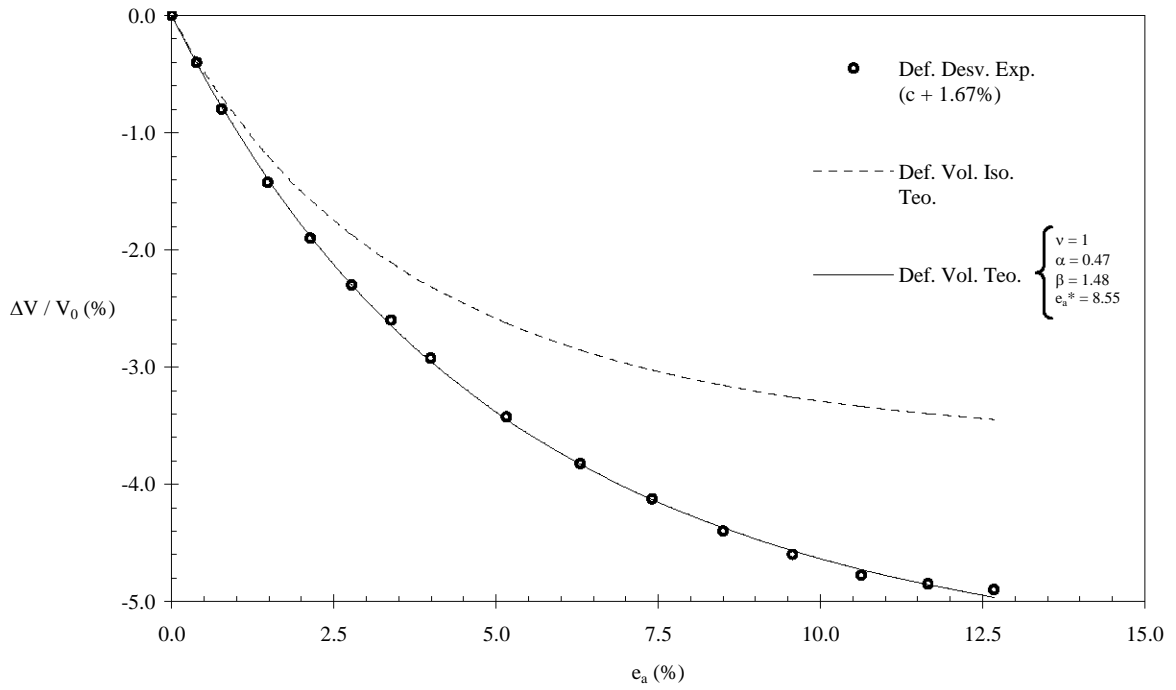
**Fig. 3-83: Curva esfuerzo – deformación (RD) OCR = 24.0**



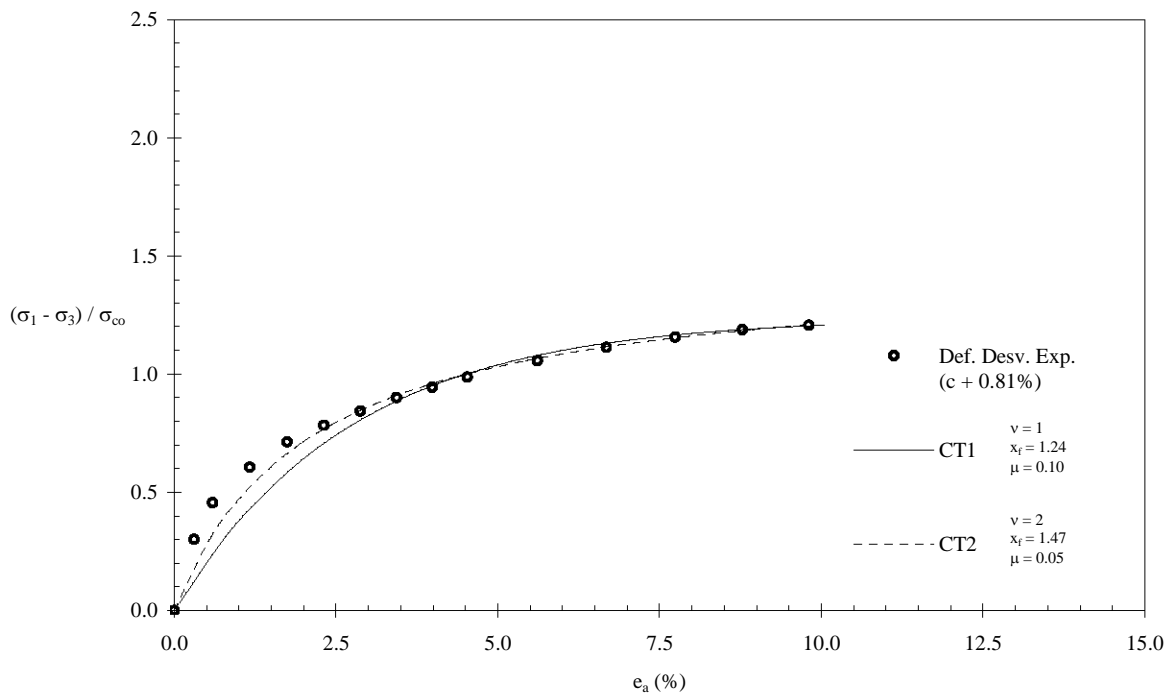
**Fig. 3-84: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 24.0**



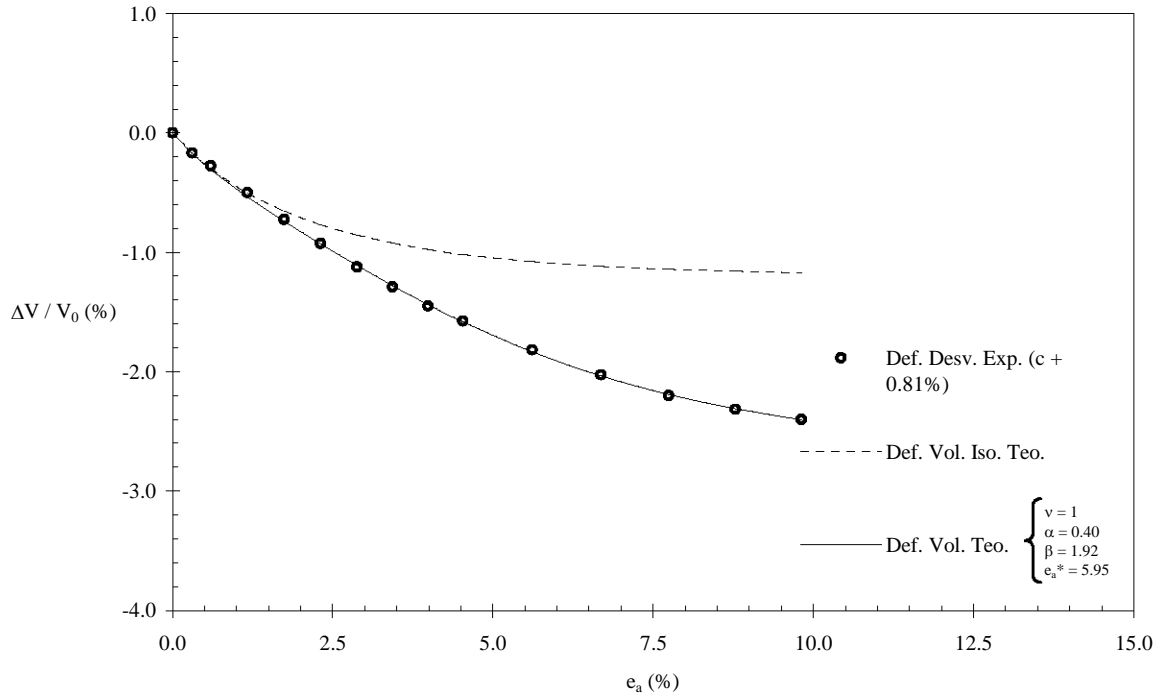
**Fig. 3-85: Curva esfuerzo – deformación (RI) OCR = 1.0**



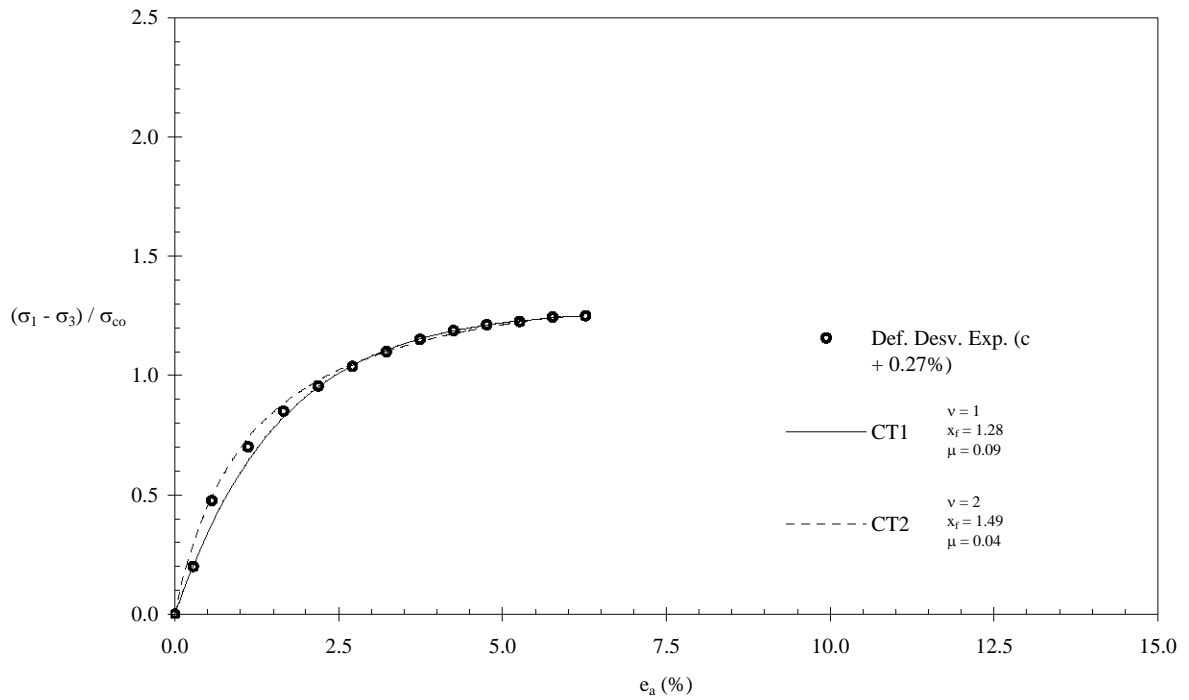
**Fig. 3-86: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 1.0**



**Fig. 3-87: Curva esfuerzo – deformación (RI) OCR = 2.0**

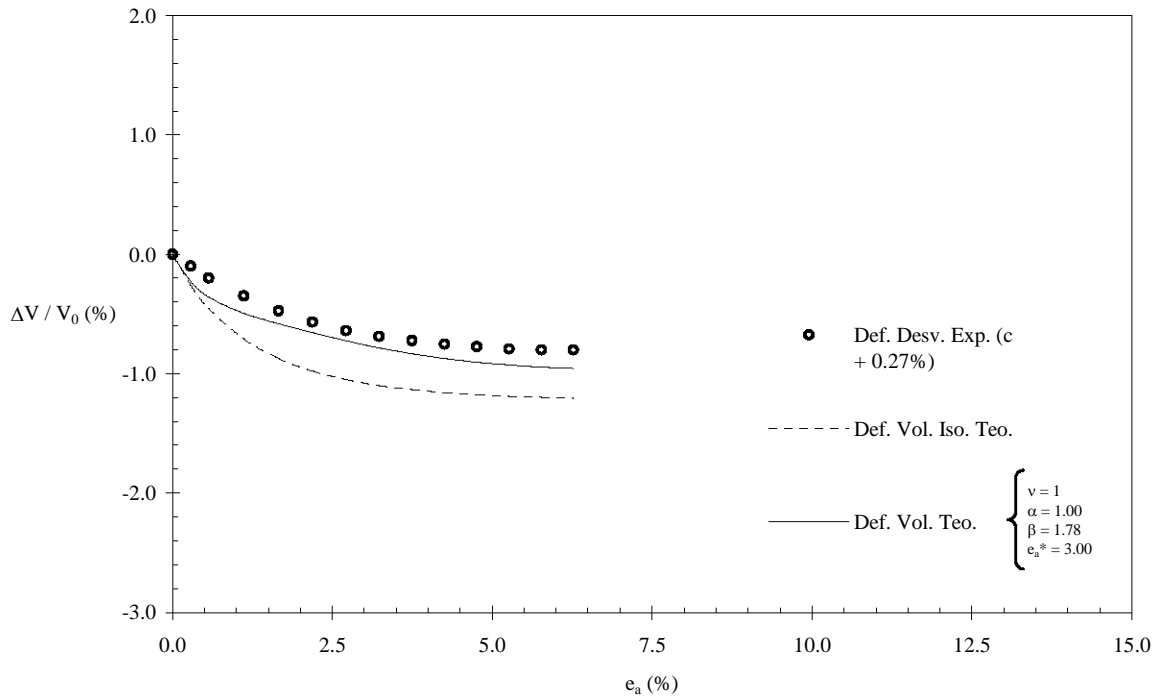


**Fig. 3-88: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 2.0**

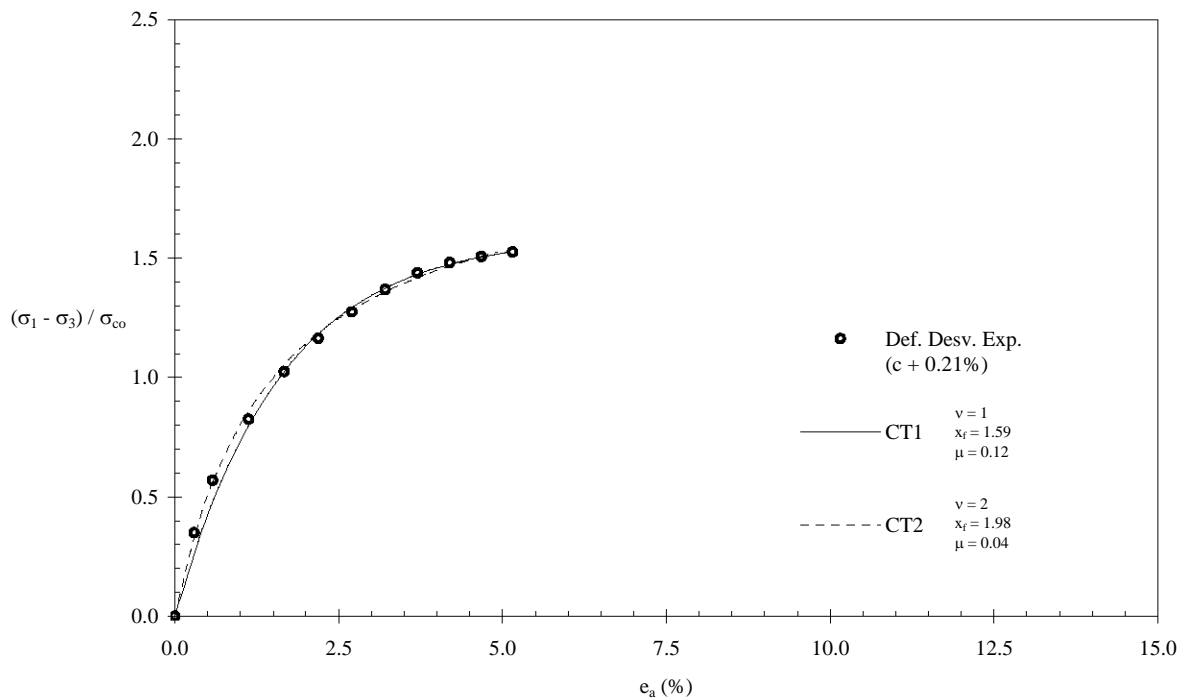


**Fig. 3-89: Curva esfuerzo – deformación (RI) OCR = 4.0**

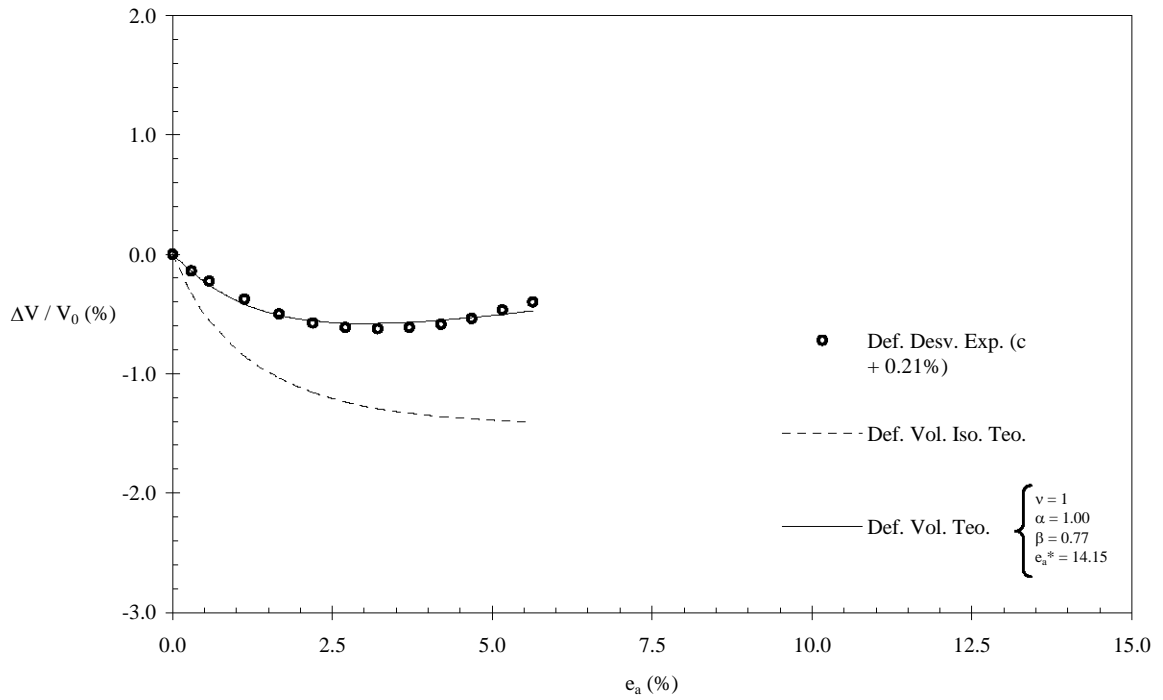




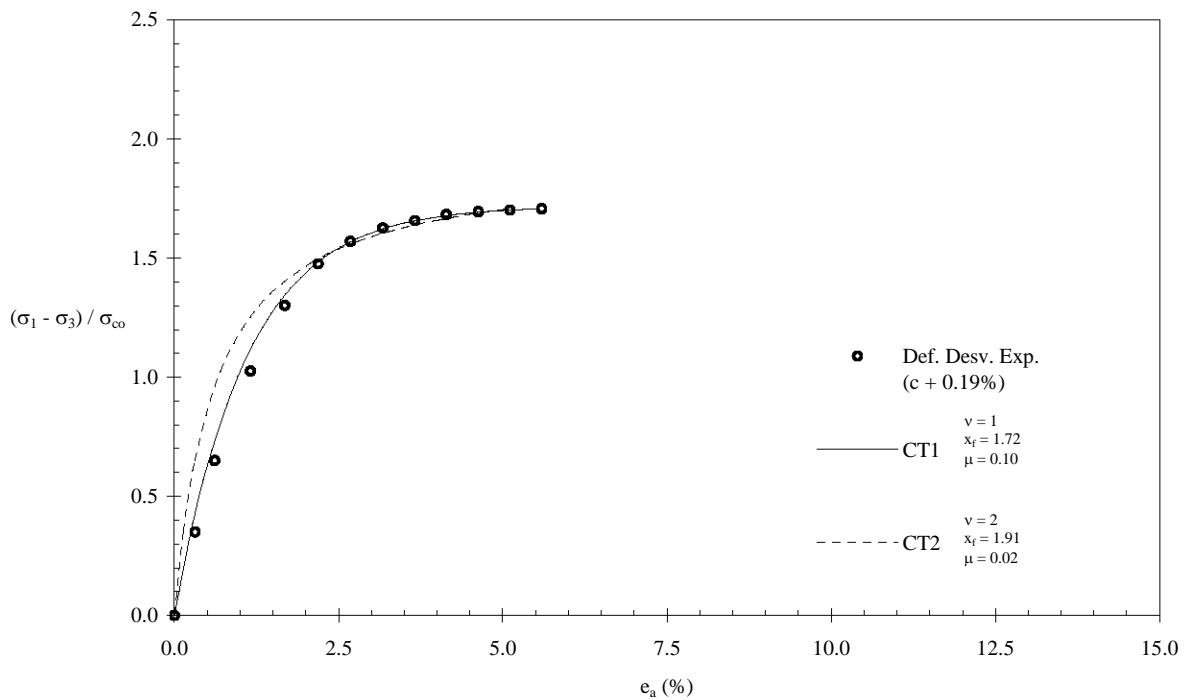
**Fig. 3-90: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 4.0**



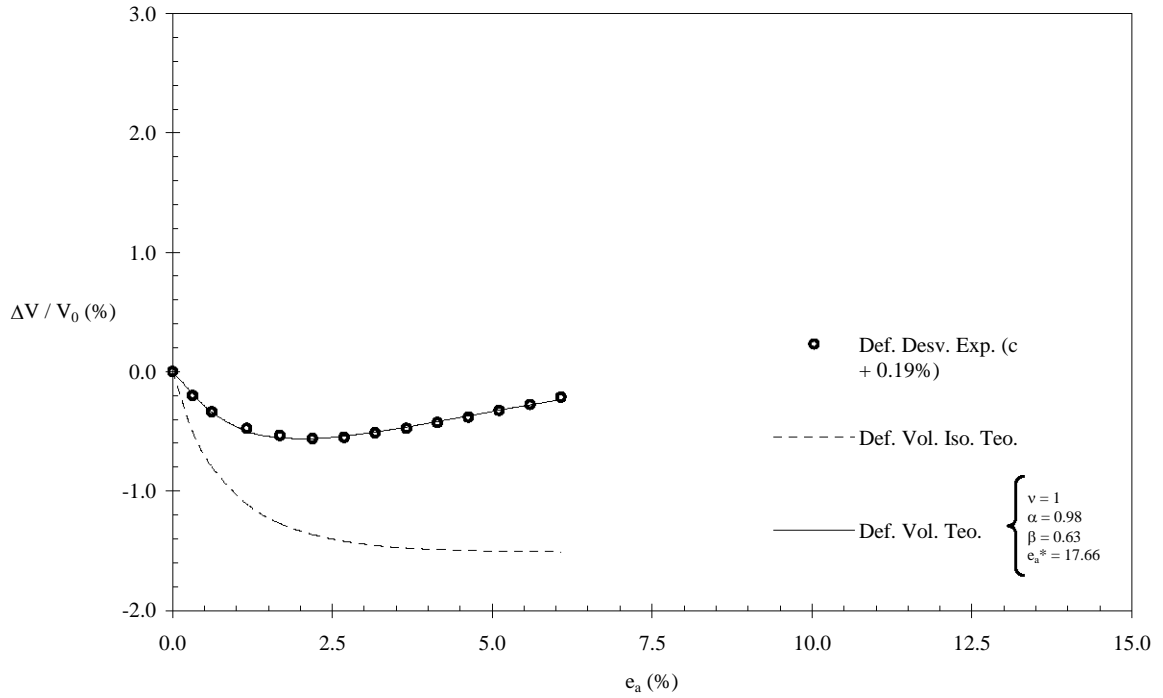
**Fig. 3-91: Curva esfuerzo – deformación (RI) OCR = 8.0**



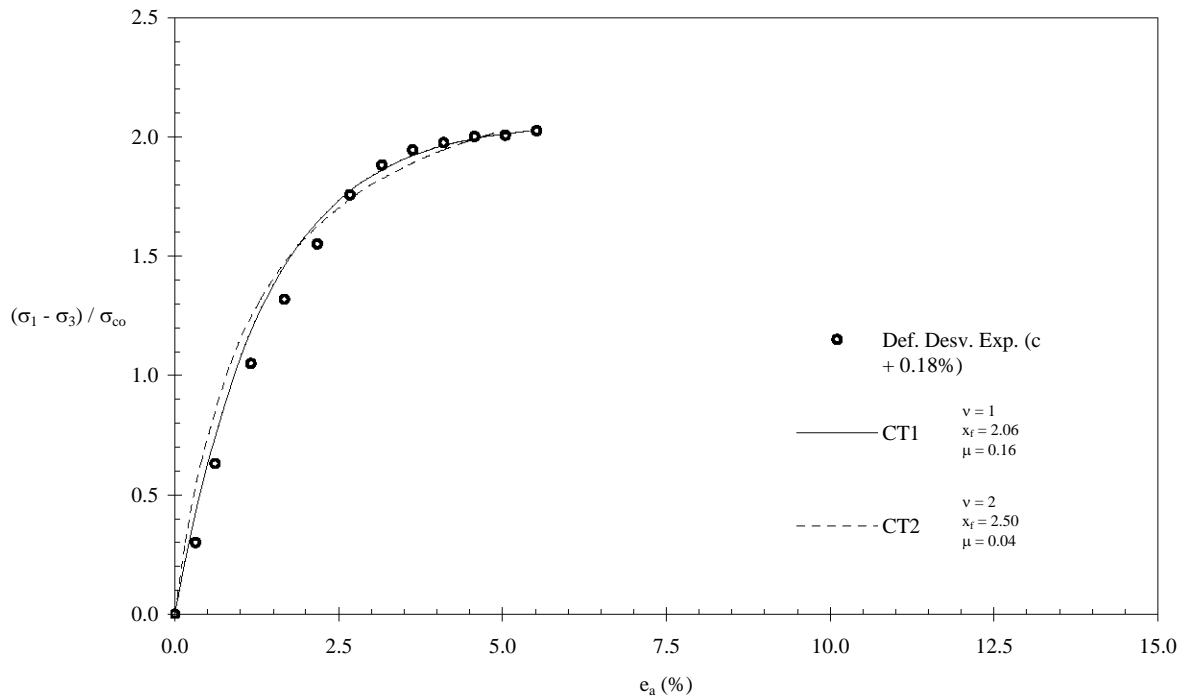
**Fig. 3-92: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 8.0**



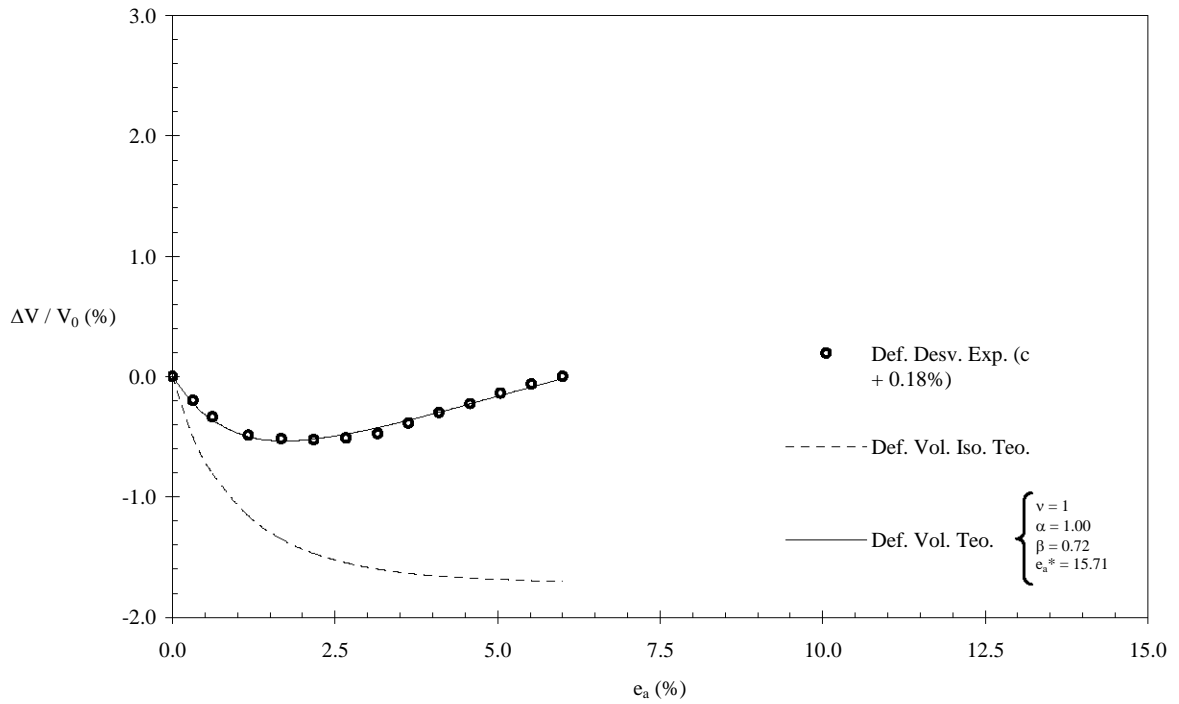
**Fig. 3-93: Curva esfuerzo – deformación (RI) OCR = 12.0**



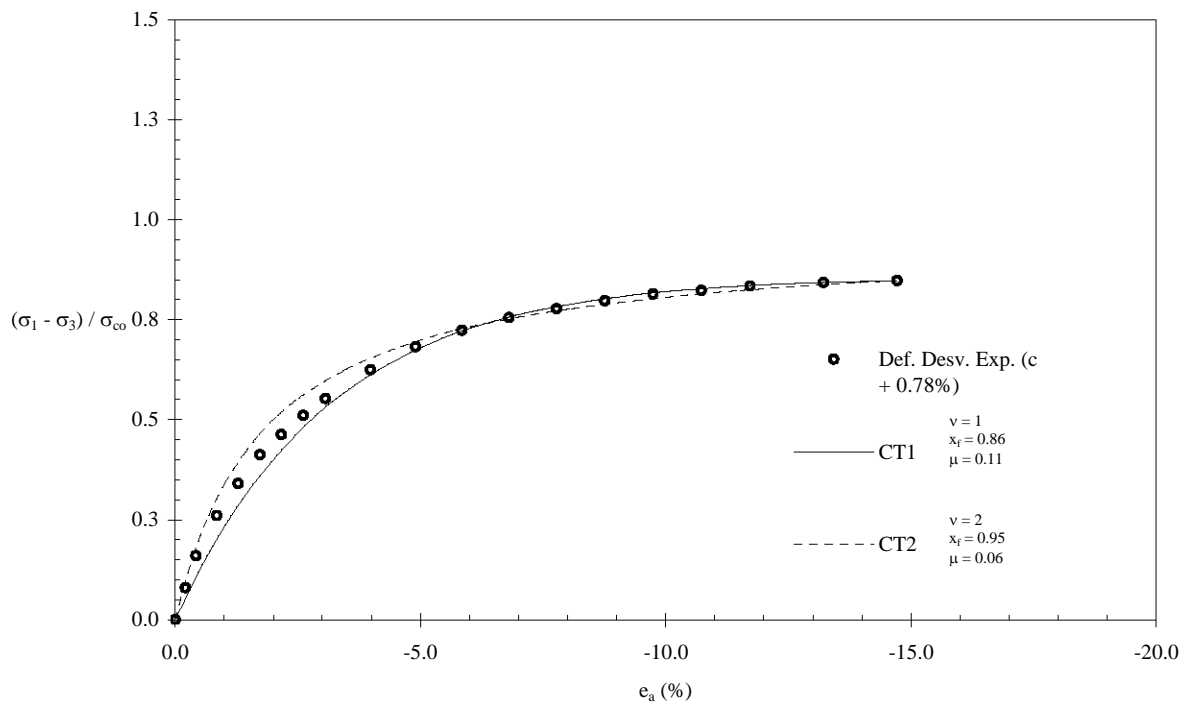
**Fig. 3-94: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 12.0**



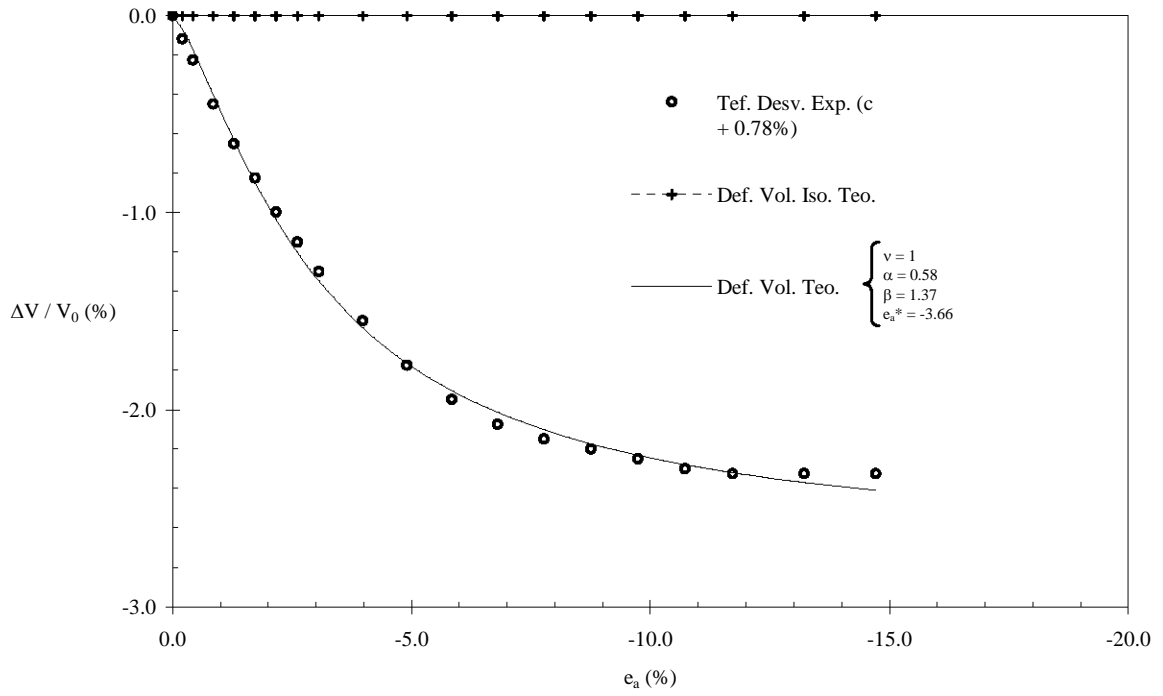
**Fig. 3-95: Curva esfuerzo – deformación (RI) OCR = 24.0**



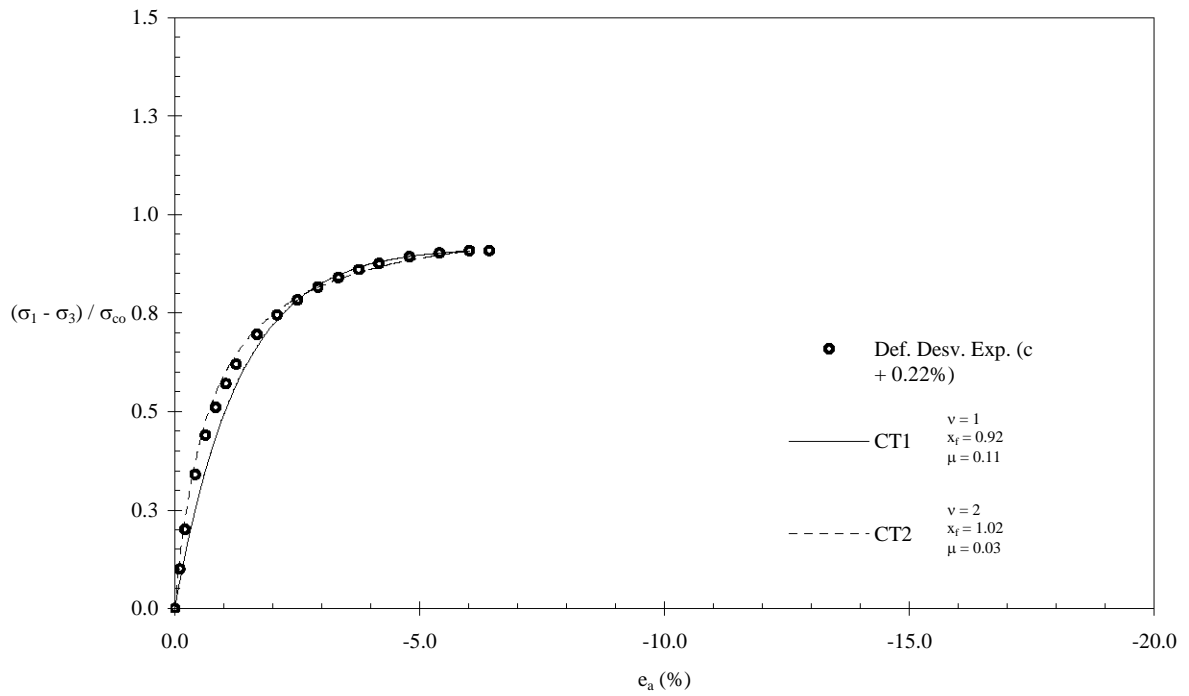
**Fig. 3-96: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 24.0**



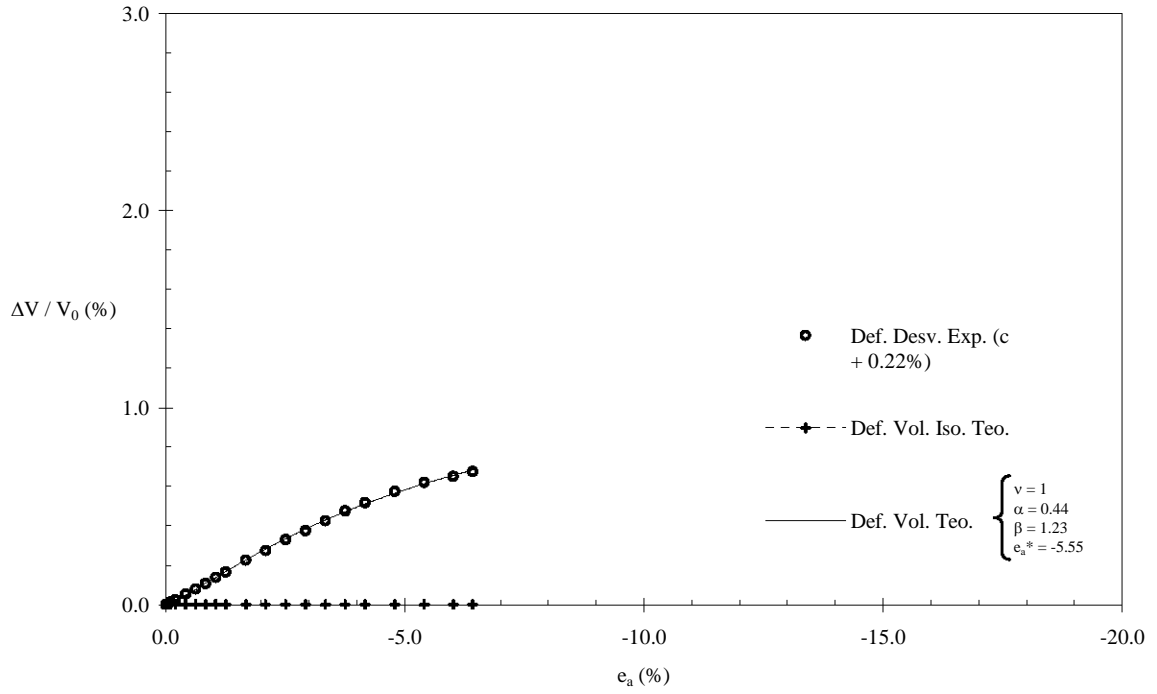
**Fig. 3-97: Curva esfuerzo – deformación (CJC) OCR = 1.0**



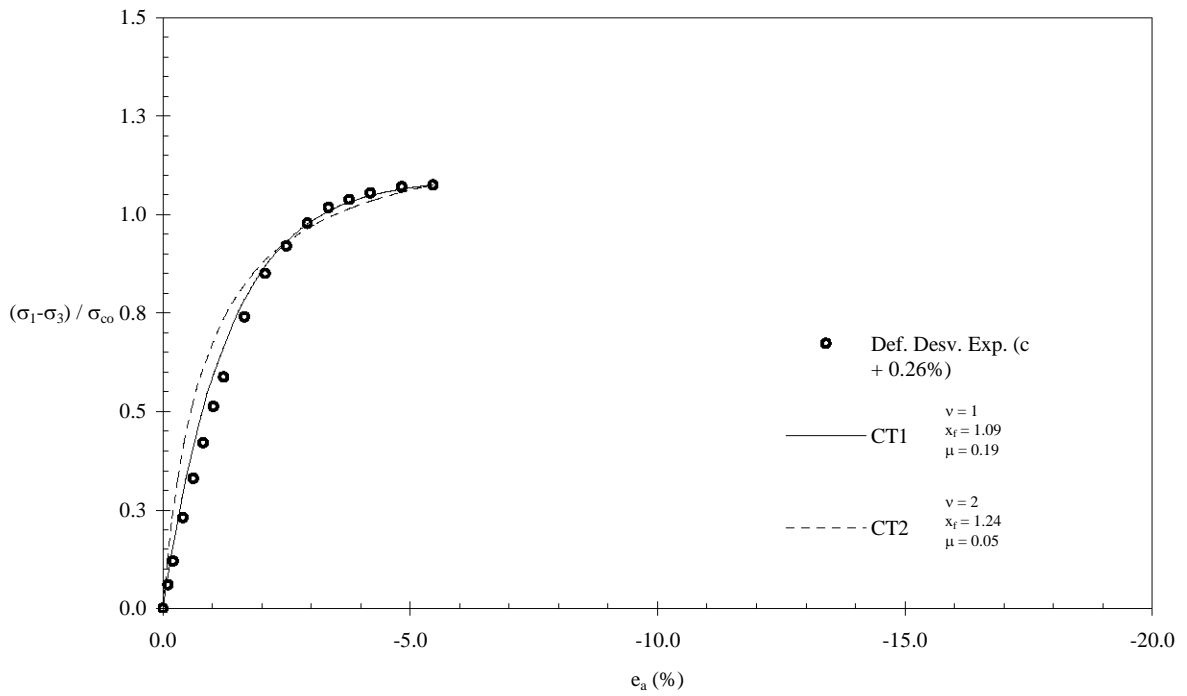
**Fig. 3-98: Curva de cambio volumétrico (CJC) OCR = 1.0**



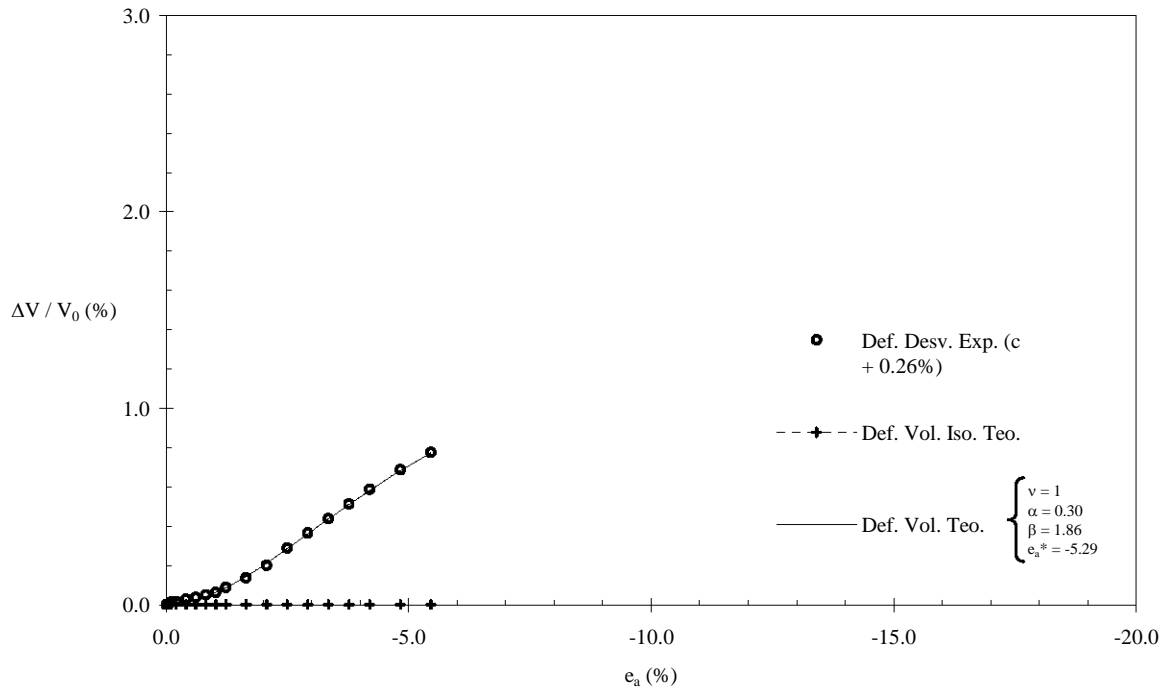
**Fig. 3-99: Curva esfuerzo – deformación (CJC) OCR = 4.0**



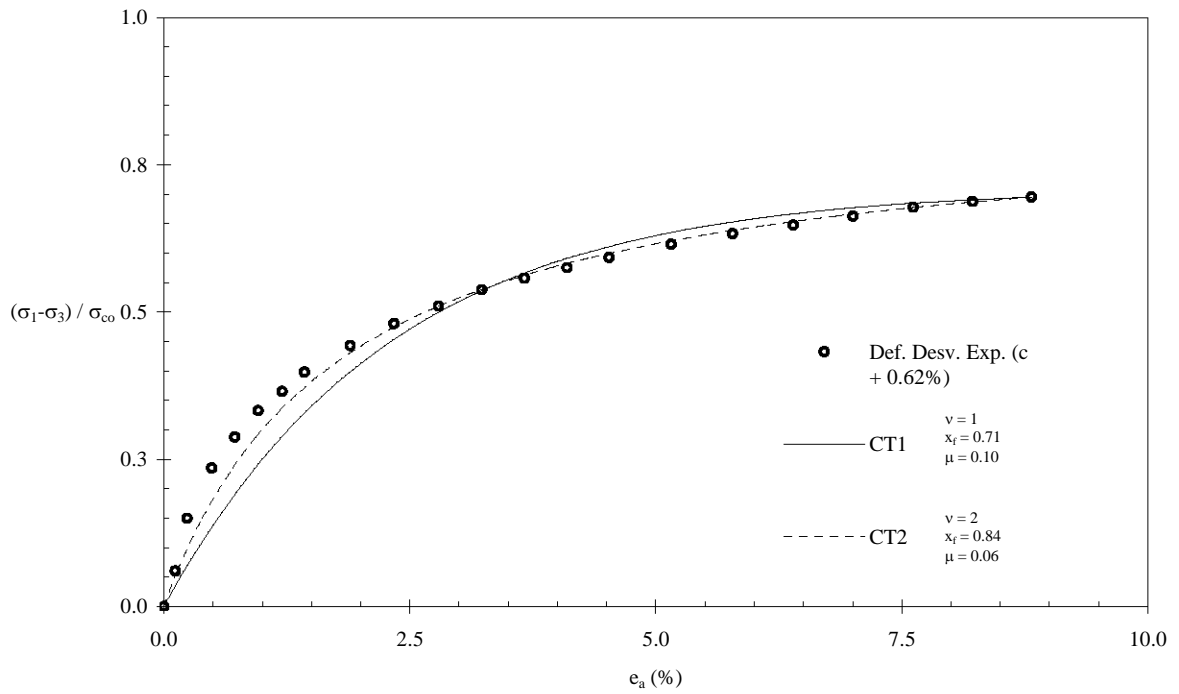
**Fig. 3-100: Curva de cambio volumétrico (CJC) OCR = 4.0**



**Fig. 3-101: Curva esfuerzo – deformación (CJC) OCR = 12.0**



**Fig. 3-102: Curva de cambio volumétrico (CJC) OCR = 12.0**



**Fig. 3-103: Curva esfuerzo – deformación (EJC) OCR = 1.0**

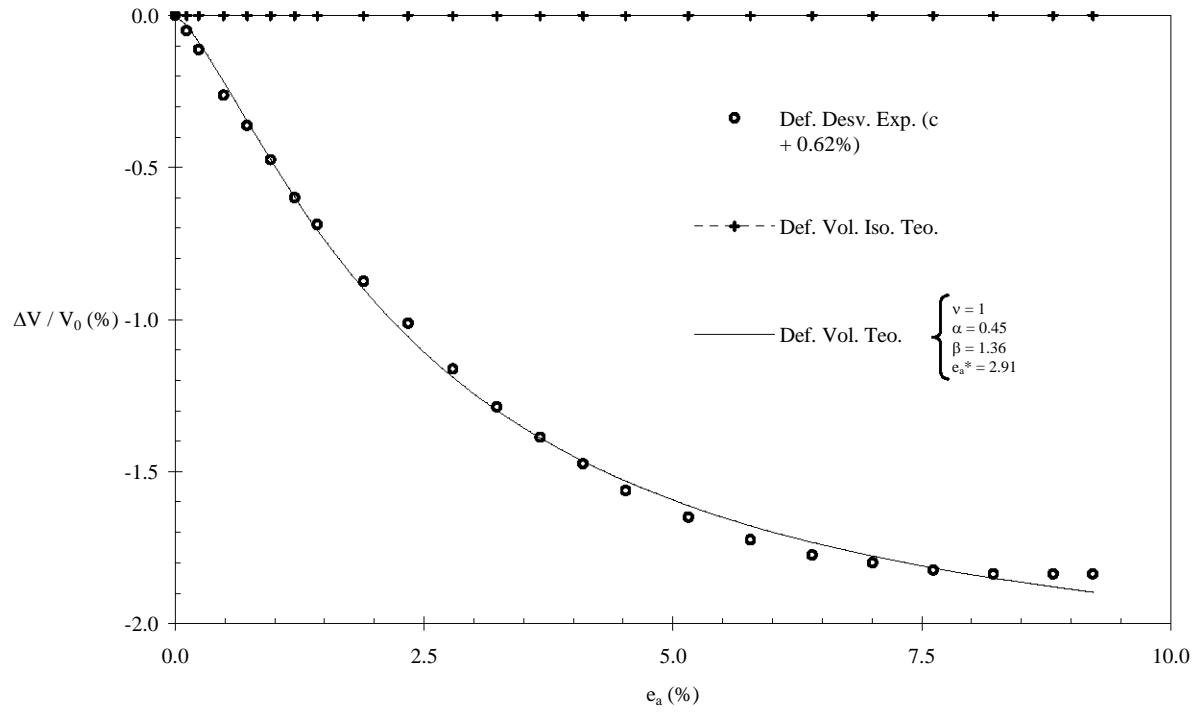


Fig. 3-104: Curva de cambio volumétrico (EJC) OCR = 1.0

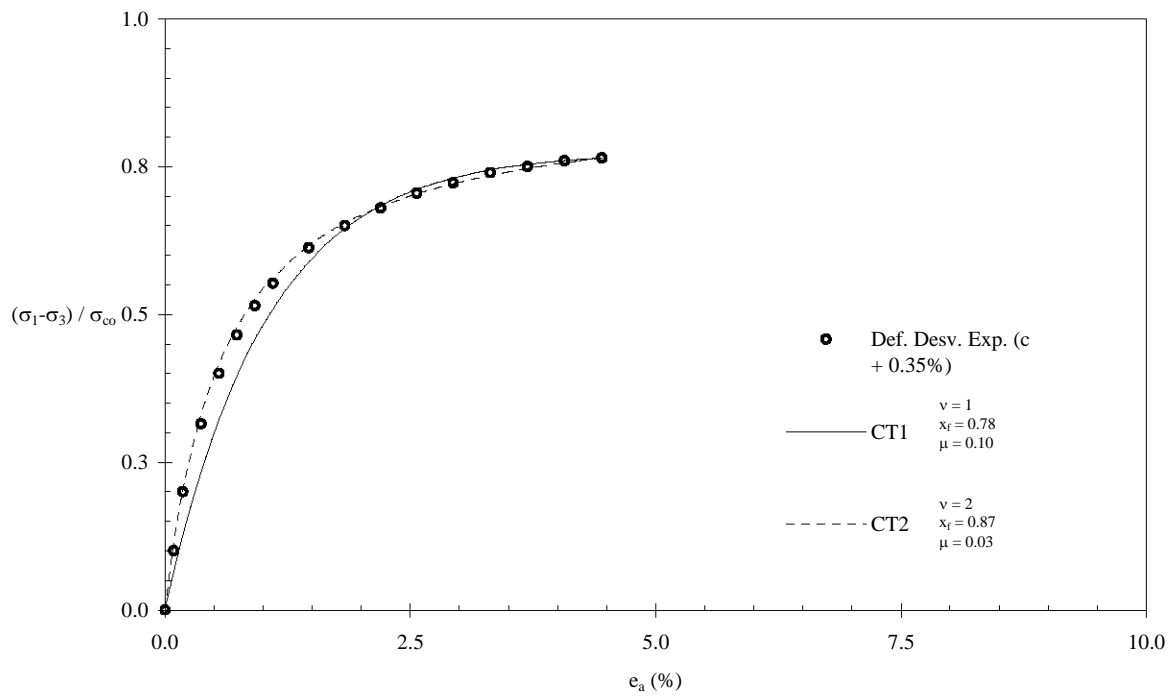
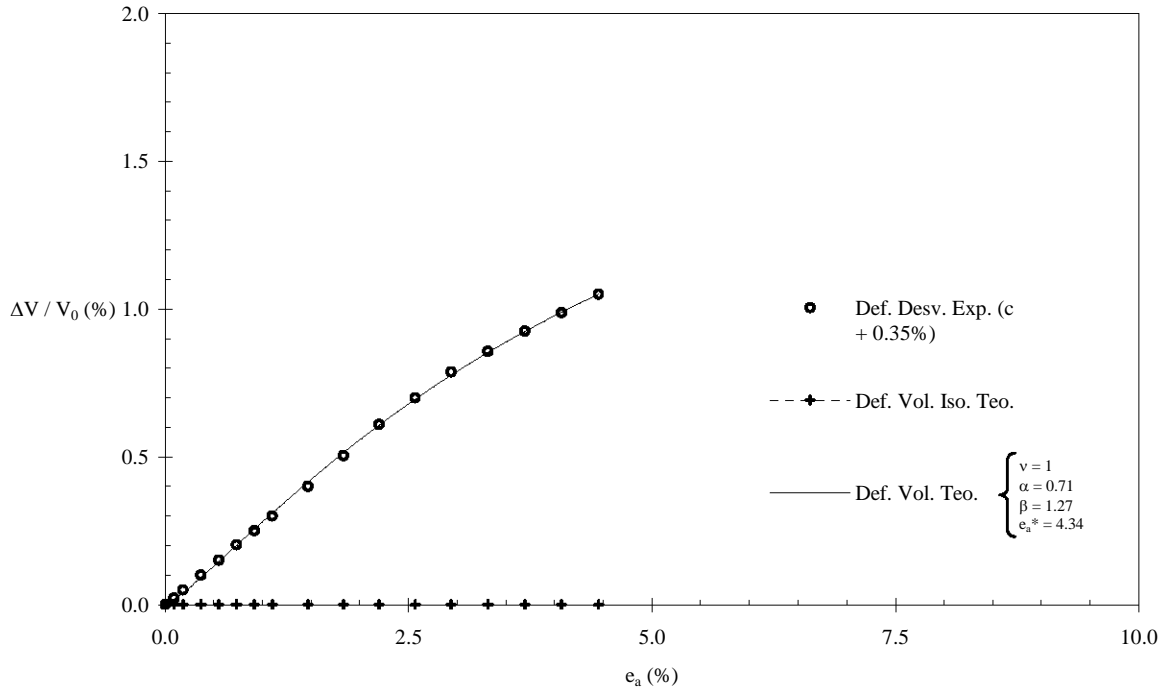
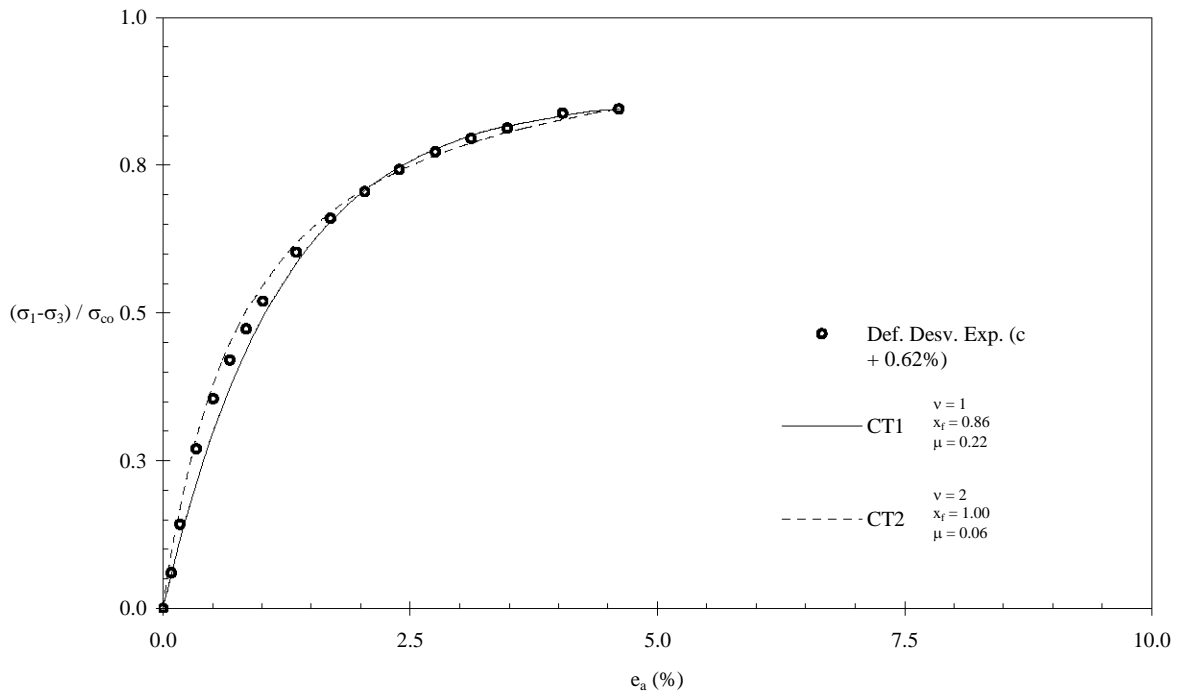


Fig. 3-105: Curva esfuerzo – deformación (EJC) OCR = 4.0





**Fig. 3-106: Curva de cambio volumétrico (EJC) OCR = 4.0**



**Fig. 3-107: Curva esfuerzo – deformación (EJC) OCR = 12.0**

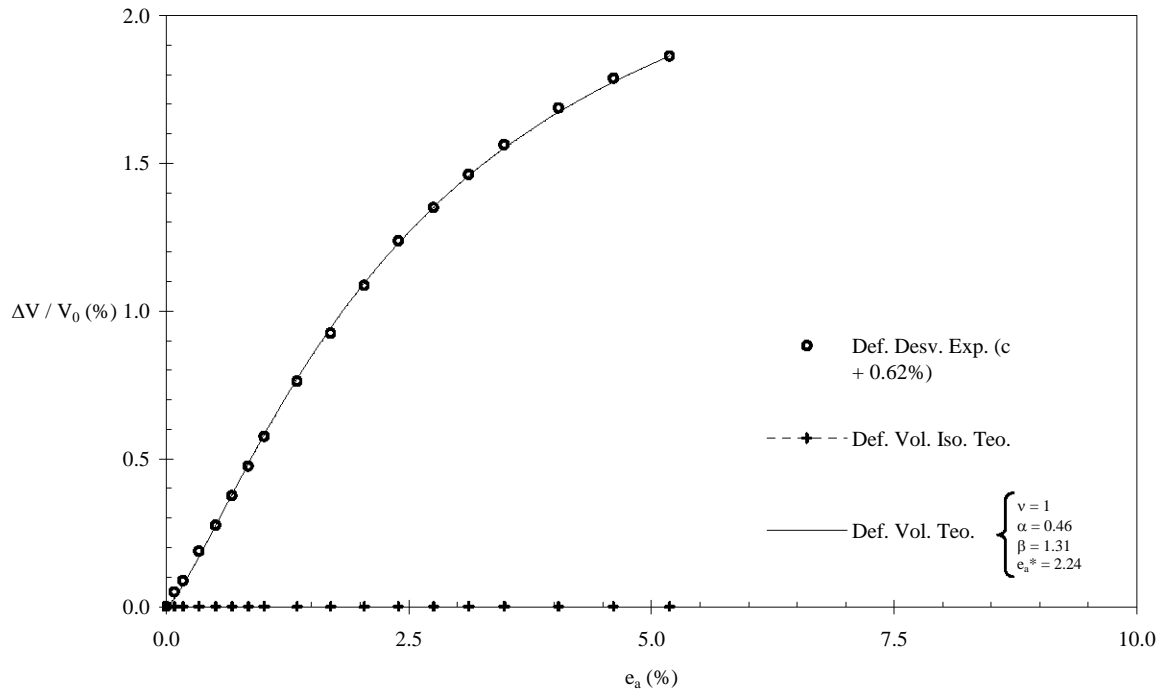


Fig. 3-108: Curva de cambio volumétrico (EJC) OCR = 12.0

### 3.2.2 Arcilla de Valle de México.

#### 3.2.2.1 Reconstituida (Pruebas CU).

Las pruebas triaxiales consolidadas no drenadas con medición de presión de poro realizadas en arcilla del Valle de México reconstituida fueron efectuadas por Víctor M. Hernández Cruz en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Hernández C. V. 1992).

Las muestras utilizadas para los ensayos se formaron en el laboratorio, por medio de un proceso artificial de sedimentación y consolidación a partir de una suspensión arcillosa, posteriormente sus curvas esfuerzo – deformación – presión de poro se compararon con las del material natural (Mendoza et al 1990).

El material arcilloso empleado en la formación artificial de las muestras utilizadas se obtuvo de un sondeo continuo de tipo inalterado, realizado en el cruce de las calles Fco. Del Paso y Troncoso y Avena, cuya localización, de acuerdo con la zonificación geotécnica de la ciudad de México, corresponde a la zona del Lago.

El remoldeo de las muestras se realizó sobre un vidrio y con espátula de abanico, agregándole pequeñas cantidades de agua. El contenido de agua del suelo ya remoldeado fue de 370%.

A continuación se procedió a llevar el suelo remoldeado a la condición de suspensión, para lo cual se tomaron porciones de 1800 gr del mismo y se le agregaron aproximadamente 2.0 lts de agua destilada para someterlo a un batido intenso durante 30 minutos, para posteriormente vaciarlo en un recipiente en el cual se homogeneizó la mezcla. La cantidad de agua destilada agregada fue de 4.5 lt, lo que permitió tamizar el material utilizando la malla 40. Con la adición de agua, la mezcla se llevó a un contenido de agua de 929%; es decir 2.5 veces el contenido inicial de agua. En el proceso de reconstitución, se trato también de reproducir las condiciones salinas del agua en el sitio de extracción del material por lo que una vez concluida la adición de sales, se procedió a vaciar la mezcla en el odómetro.

Una vez en él, el material tuvo que pasar por dos etapas. Sedimentación y consolidación. Ambas etapas se llevaron a cabo en un cilindro de lucita con diámetro interior de 18 cm, con un espesor de paredes de ¼ de pulgada y altura de 60 cm; que permitió obtener 13 muestras de 3.6 cm de diámetro y 8.5 cm de altura. El tubo se adosa a una base del mismo material, la cual cuenta con una perforación al centro, con objeto de proporcionar drenaje a la muestra. Para someter a la muestra a un gradiente controlado se conectó a ésta una manguera de ¼ de pulgada.

Los esfuerzos aplicados a la muestra arcillosa durante su etapa de consolidación se presentan en la tabla 3-12.

**Tabla 3-12**

$\sigma$ (kg / cm <sup>2</sup> )	0.003	0.005	0.010	0.020	0.040	0.082	0.160	0.256
$e$	19.21	18.94	15.95	13.47	12.40	10.65	9.17	8.80

La altura de la muestra reconstituida fue de 11.0 cm, obteniéndose 13 probetas de 3.6 cm de diámetro y 8.5 cm de altura. Las propiedades índices del material extraído fueron:

$$w = 377\%$$

$$LL = 421\%$$

$$LP = 140\%$$

$$IP = 281\%$$

$$G_s = 2.35$$

$$e = 8.86$$

SUCS: MH

Consistencia relativa: blanda

Las pruebas estáticas realizadas constaron de dos series de tres ensayos, una serie bajo consolidación isotrópica y la otra anisotrópicamente, hasta alcanzar el esfuerzo octaédrico confinante efectivo programado, previo a la etapa de falla. Solo se usaron las curvas experimentales bajo consolidación isotrópica para ajustarlas mediante el principio de proporcionalidad natural. Con los datos obtenidos en la etapa de consolidación para cada

incremento de esfuerzo confinante se calculó la relación de vacíos y se graficaron las curvas de compresibilidad que se muestran en la figuras 3-80 a 84, la carga de preconsolidación estimada por el método de A. Casagrande, es de 0.13 kg / cm<sup>2</sup>; valor muy semejante al máximo esfuerzo octaédrico aplicado durante la formación de los especímenes y que fue de 0.16 kg / cm<sup>2</sup>. En la tabla 3-13 se muestran los valores del contenido inicial ( $w_i$ ), relación de vacíos inicial ( $e_i$ ), relación de vacíos al final de la etapa de consolidación ( $e_f$ ), índice de recompresión ( $C_r$ ), e índice de compresibilidad ( $C_c$ ).

**Tabla 3-13**

Serie	Ensaye	$w_i$	$e_i$	$e_f$	$C_r$	$C_c$	$\gamma$
D	D1	374	8.78	6.32	0.48	4.03	0.222
	D2	372	8.75	5.12	0.52	3.78	0.224
	D3	376	8.84	4.45	0.43	4.09	0.228

Durante toda la etapa de consolidación y en cada uno de los incrementos de carga, el tiempo en que se presentó la consolidación primaria fue de aproximadamente 24 horas. Los valores del coeficiente de consolidación  $C_v$  para el último incremento de carga se muestran en la tabla 3-14, así como los correspondientes valores del coeficiente de permeabilidad y en las figuras 3-109 a 3-113, se muestran las curvas de compresibilidad y las curvas End Of Primary (EOP), las cuales muestran los valores al final de la consolidación primaria.

**Tabla 3-14**

Serie	Ensaye	$t_{100}$	$C_v$	$k$
D	D1	500	$1.20 \times 10^{-5}$	$7.746 \times 10^{-9}$
	D2	410	$1.29 \times 10^{-5}$	$4.067 \times 10^{-9}$
	D3	700	$6.79 \times 10^{-6}$	$1.532 \times 10^{-9}$

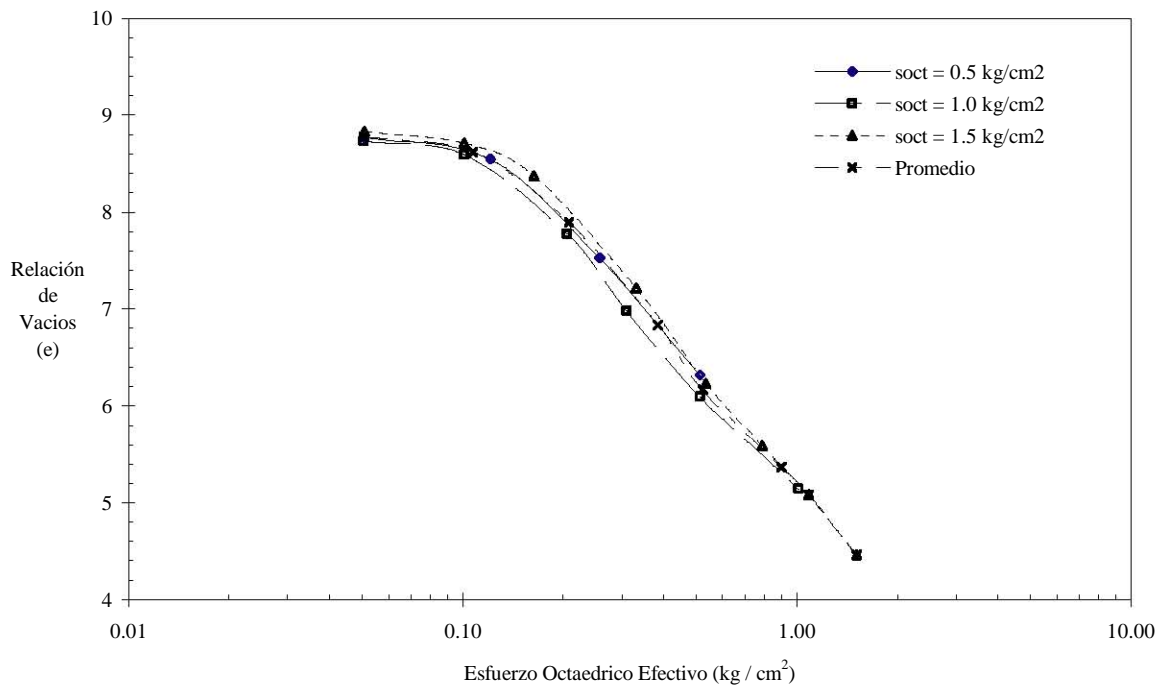


Fig. 3-109: Curvas de compresibilidad Isotrópicas.

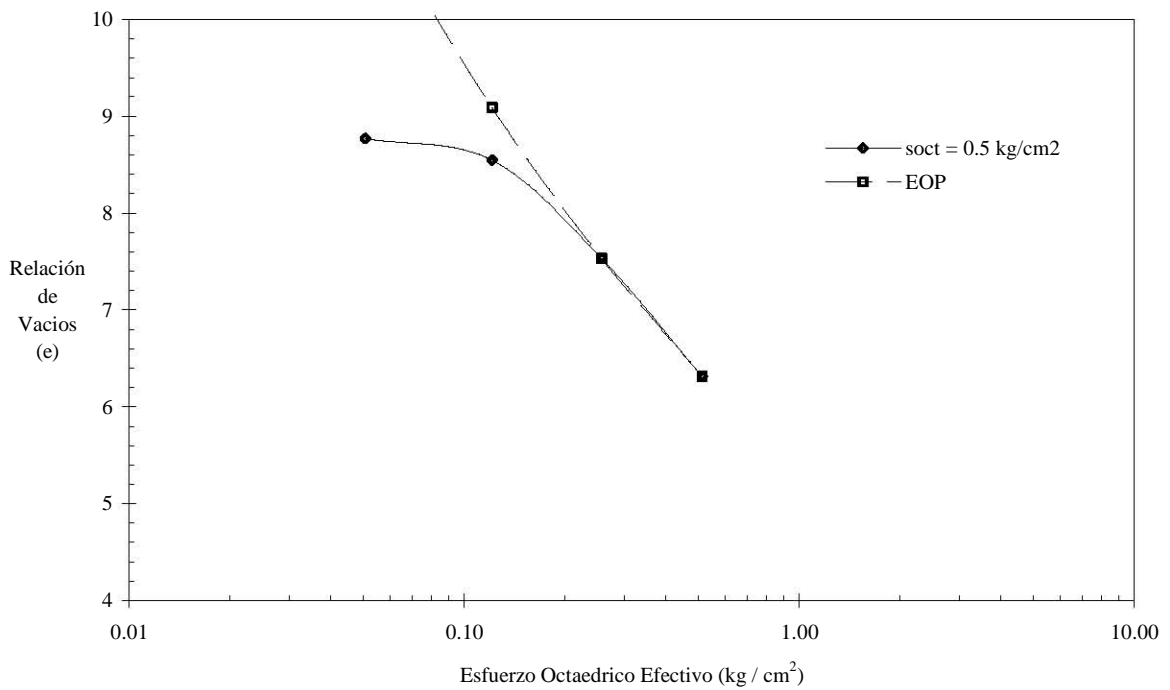
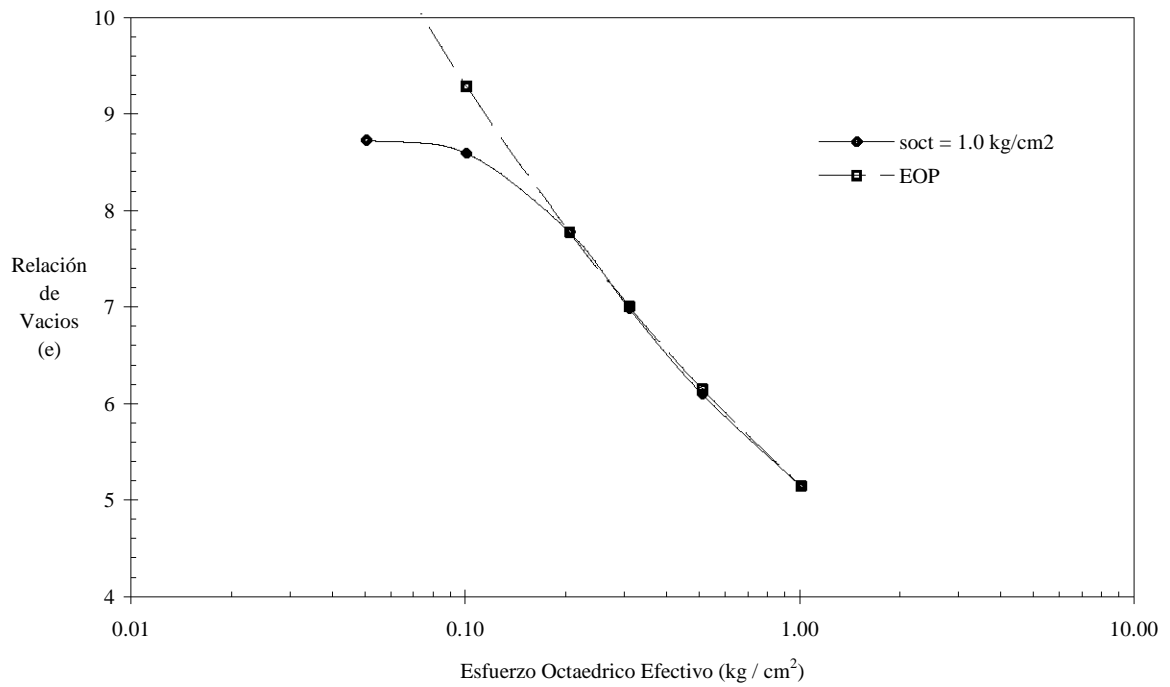
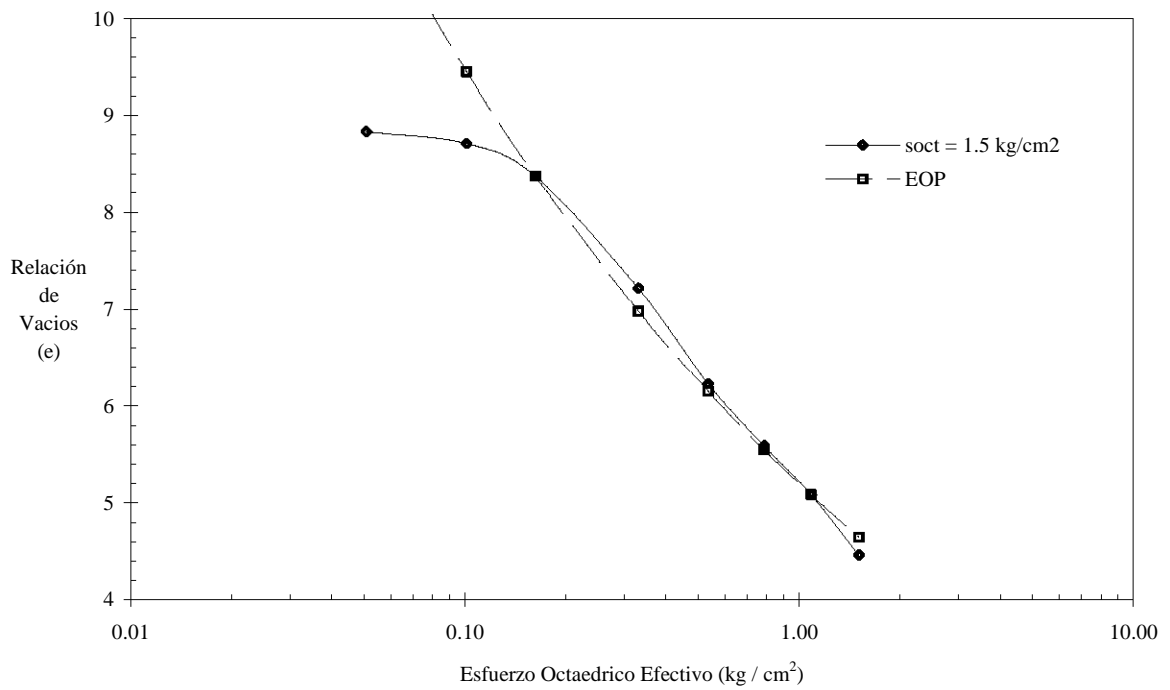


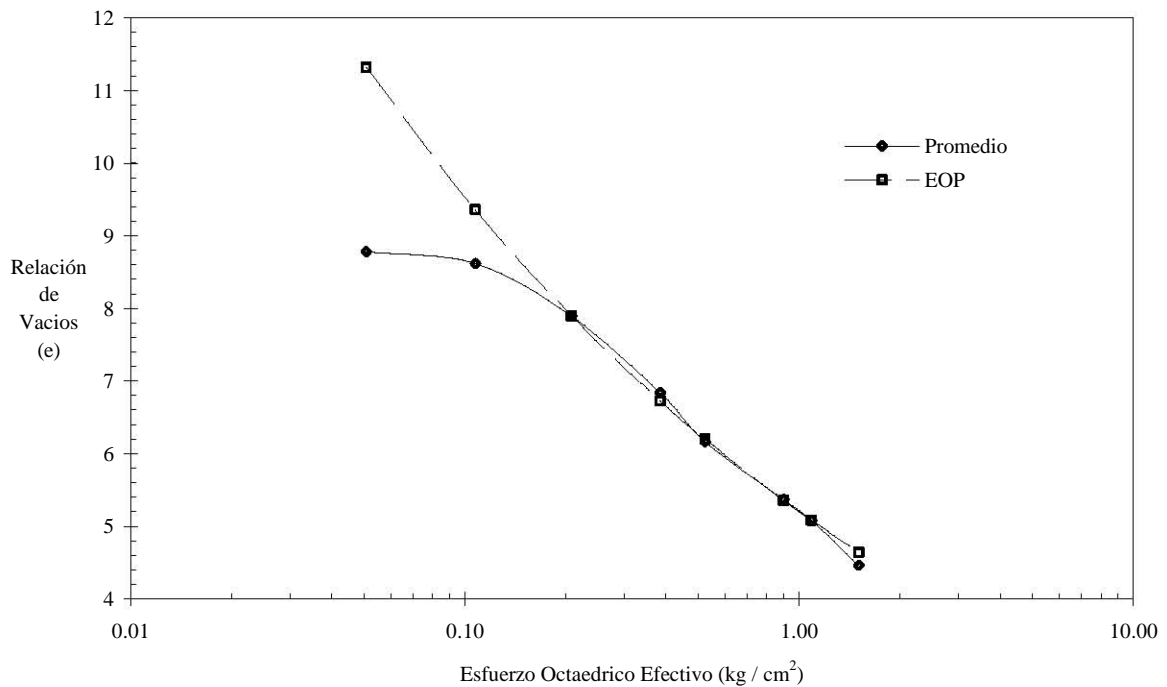
Fig. 3-110: Curva de compresibilidad  $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$



**Fig. 3-111: Curva de compresibilidad  $\sigma_{oct} = 1.0 \text{ kg/cm}^2$**



**Fig. 3-112: Curva de compresibilidad  $\sigma_{oct} = 1.5 \text{ kg/cm}^2$**



**Fig. 3-113: Curva de compresibilidad promedio.**

De igual forma que en las pruebas anteriores, se ajustaron las curvas esfuerzo desviador vs. deformación desviadora natural ( $e_a$ ) y presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ ), para las curvas de compresión con esfuerzo axial aumentado.

En las figuras 3-114 a 3-122 se presentan las curvas experimentales y teóricas del comportamiento esfuerzo desviador vs. ( $e_a$ ) y presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ ), donde las curvas teóricas para un valor de  $\nu = 2$  se aproximan más al comportamiento real. El valor de los parámetros  $\mu$  y  $x_f$  que se encontraron se muestra en las tablas 3-15 y en la tabla 3-16 se muestran los valores encontrados para las curvas de presión de poro normalizado vs. ( $e_a$ ), tanto para  $\nu = 1$  y  $\nu = 2$ .

**Tabla 3-15: Parámetros para obtener las curvas Esfuerzo desviador axial vs. ( $e_a$ )**

Prueba	OCR	OCF	$\sigma_{oct}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\nu$	$\mu$	$x_f$	$\nu$	$\mu$	$x_f$
Axial Incrementado	1.0	1.0	0.5	1	0.053	1.304	2	0.022	1.416
	1.0	1.0	1.0	1	0.052	1.049	2	0.022	1.138
	1.0	1.0	1.5	1	0.060	0.995	2	0.029	1.068

**Tabla 3-16: Parámetros para obtener las curvas Presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ )**

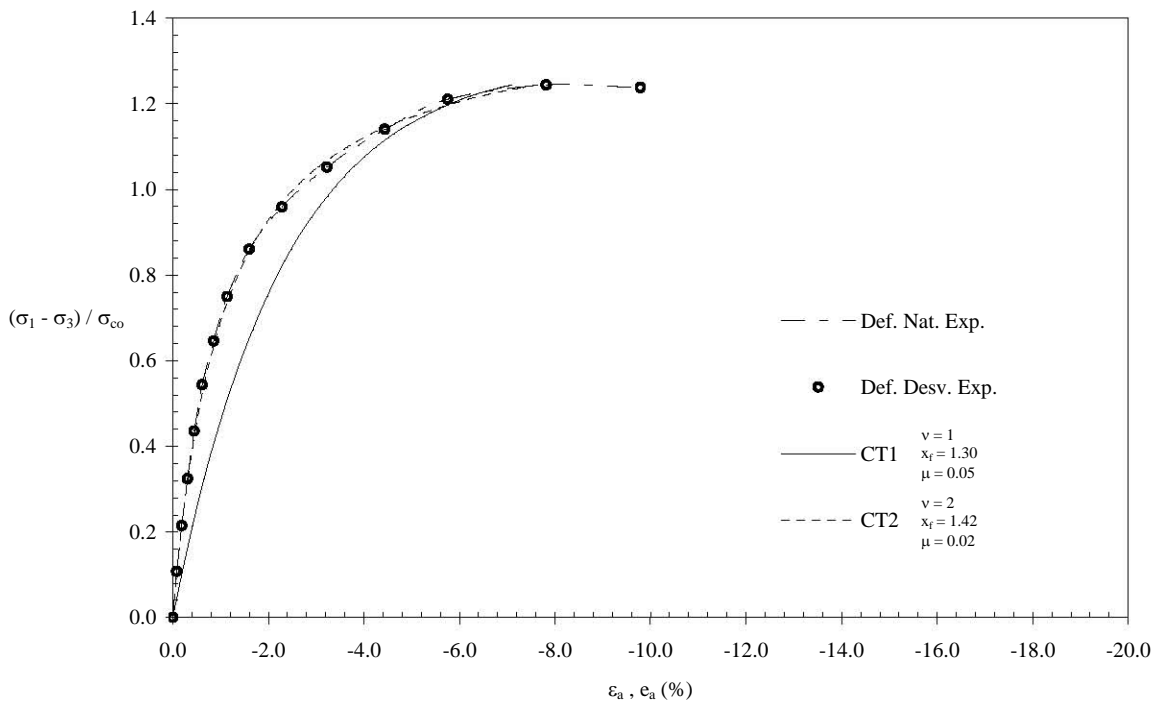
Prueba	OCR	OCF	$\sigma_{oct}$	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$e^*$	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$e^*$
--------	-----	-----	----------------	-------	----------	---------	-------	-------	----------	---------	-------

			kg/cm <sup>2</sup>								
Axial Incrementado	1.0	1.0	0.5	1	0.48	0.60	-3.68	2	0.42	1.12	-3.65
	1.0	1.0	1.0	1	0.56	0.75	-3.49	2	0.52	1.17	-3.54
	1.0	1.0	1.5	1	0.59	0.74	-3.41	2	0.55	1.08	-3.64

Las correlaciones obtenidas para los diferentes valores de  $\nu$  se muestran en las tablas 3-17.

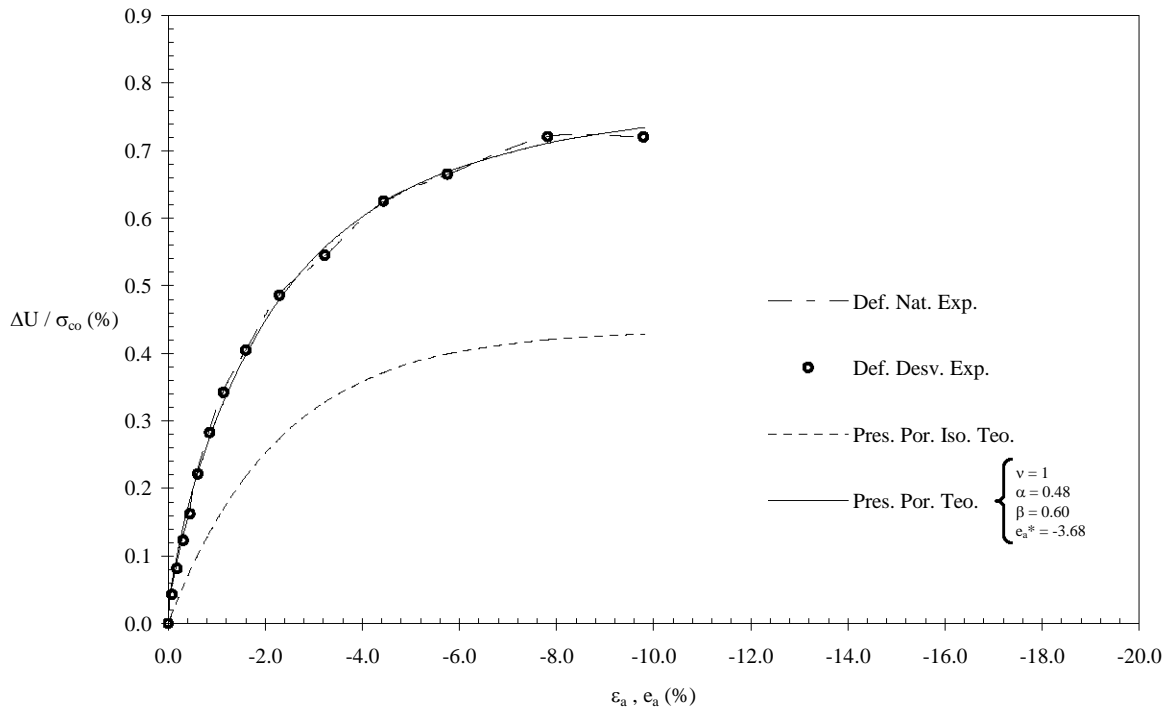
**Tabla 3-17: Valores de correlación.**

Prueba	OCR	OCF	$\sigma_{oct}$ kg/cm <sup>2</sup>	Coeficiente de correlación para las curvas Esfuerzo desviador vs. Deformación desviadora natural		Coeficiente de correlación para las curvas Cambio volumétrico normalizado vs. Deformación desviadora natural	
				$\nu = 1$	$\nu = 2$	$\nu = 1$	$\nu = 2$
				Axial Incrementado	1.0	1.0	0.5
	1.7	1.4	1.0	0.995	0.997	0.999	0.999
	2.0	1.6	1.5	0.948	0.997	1.000	0.999

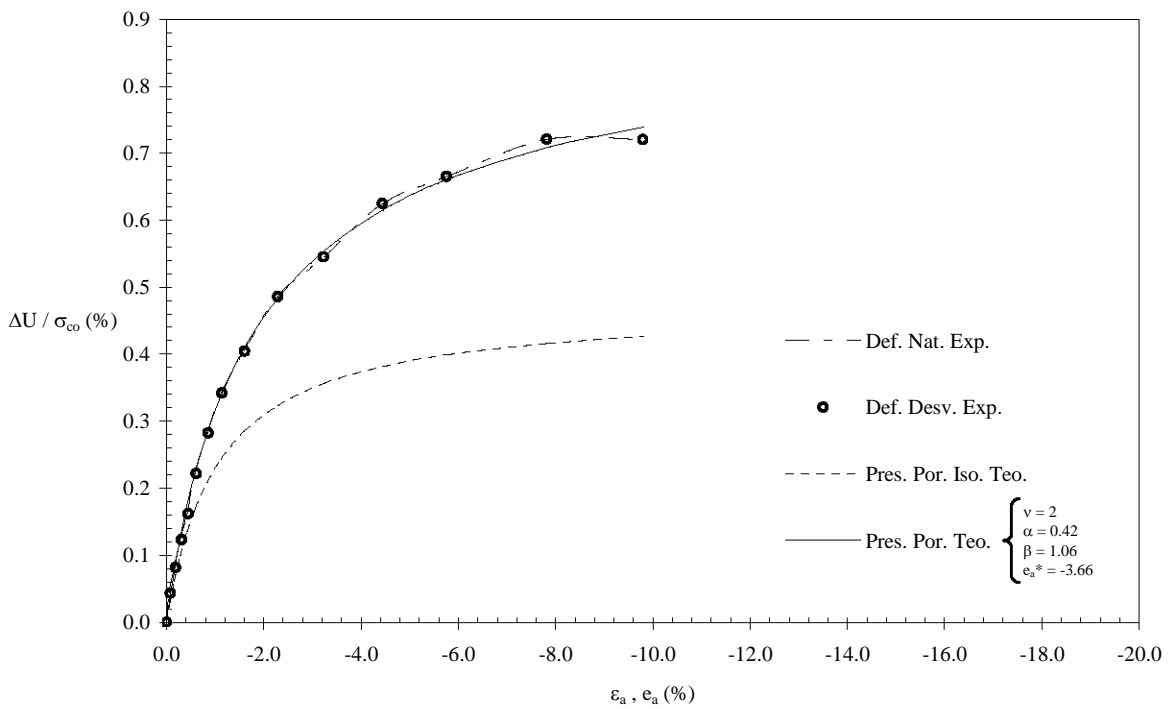


**Fig. 3-114: Curva esfuerzo – deformación (AI)  $\sigma_{oct} = 0.5$  kg/cm<sup>2</sup>**





**Fig. 3-115: Curva Presión de poro (AI)  $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$   $\nu = 1$**



**Fig. 3-116: Curva Presión de poro (AI)  $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$   $\nu = 2$**

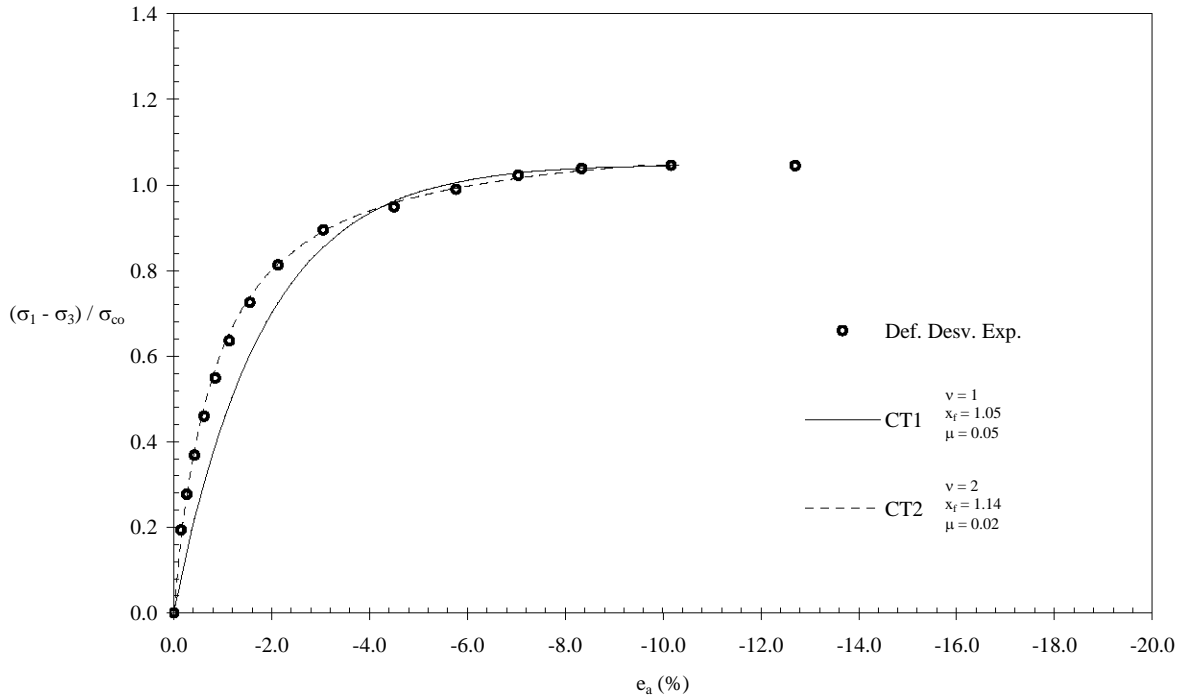


Fig. 3-117: Curva esfuerzo – deformación (AI)  $\sigma_{oct} = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

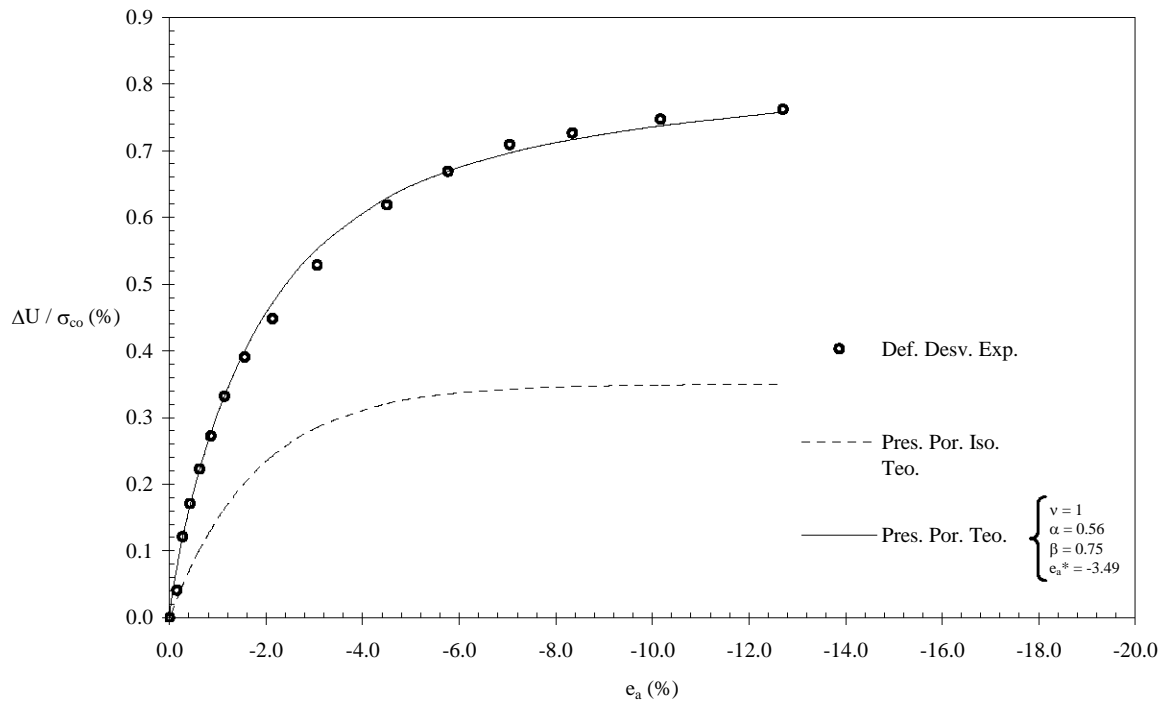


Fig. 3-118: Curva Presión de poro (AI)  $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$   $\nu = 1$

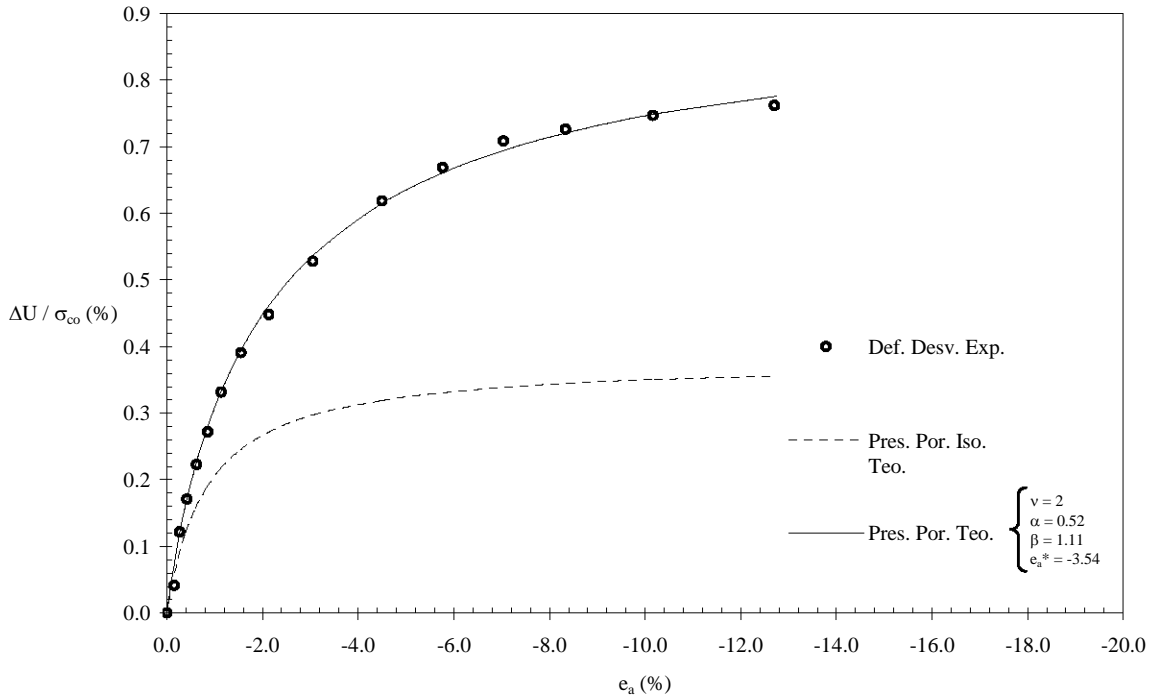


Fig. 3-119: Curva Presión de poro (AI)  $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$   $\nu = 2$

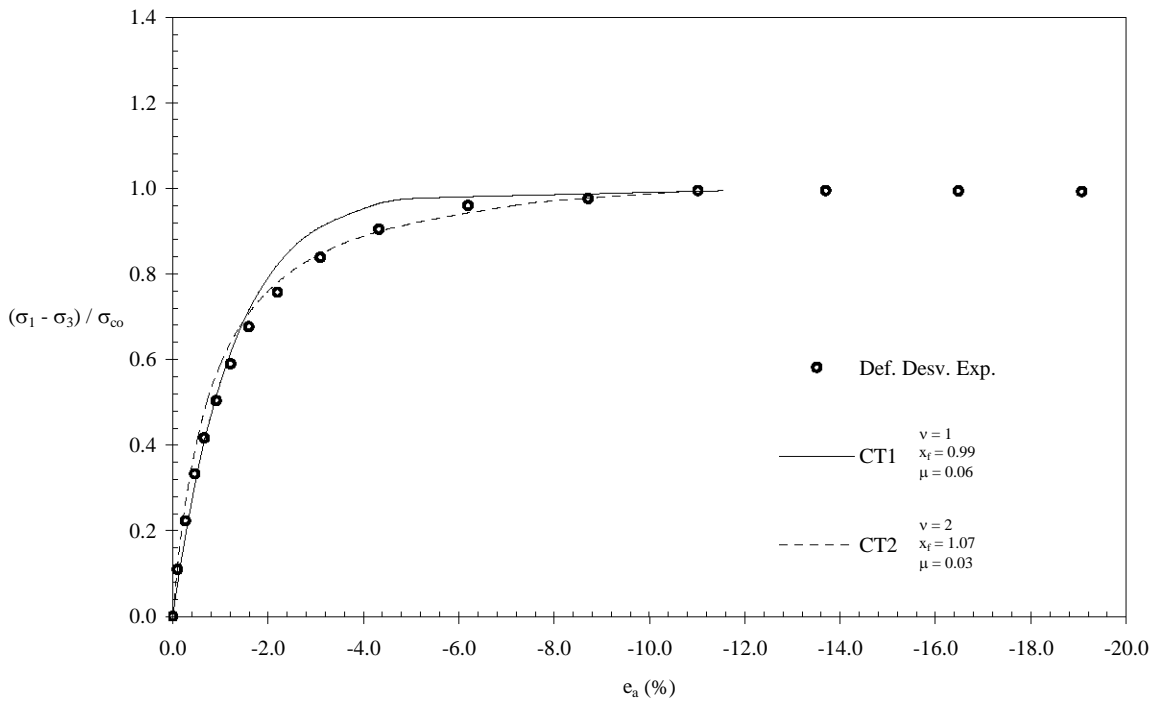


Fig. 3-120: Curva esfuerzo – deformación (AI)  $\sigma_{oct} = 1.5 \text{ kg/cm}^2$

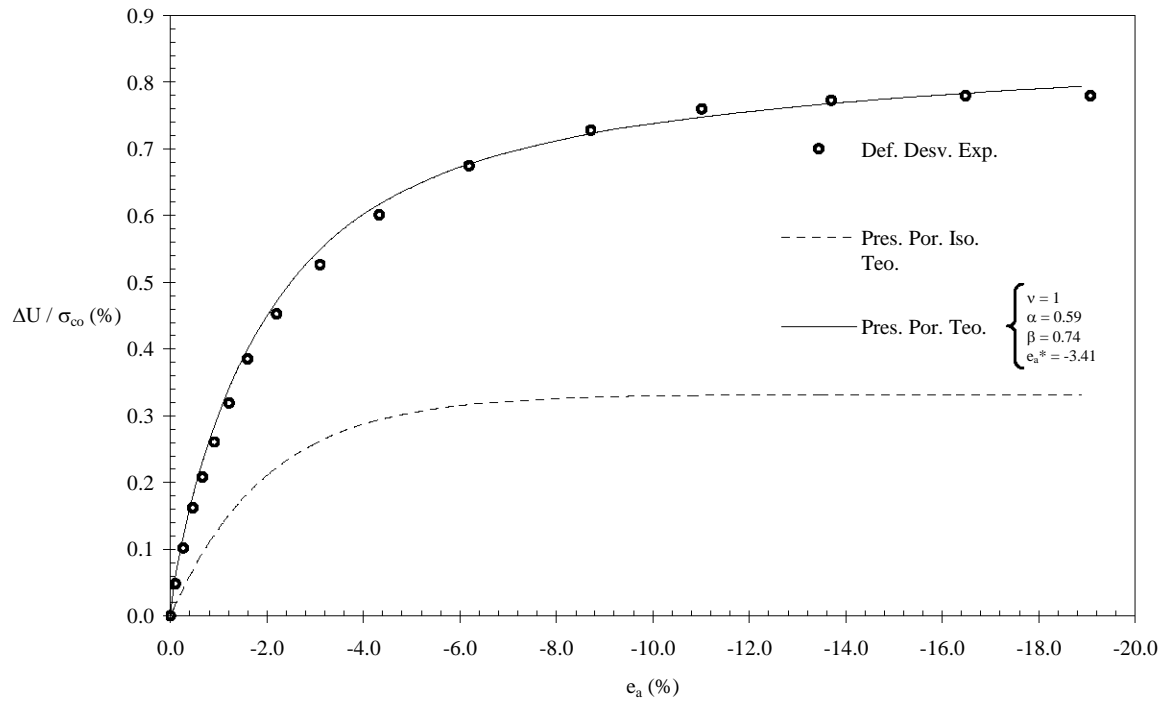


Fig. 3-121: Curva Presión de poro (AI)  $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$   $\nu = 1$

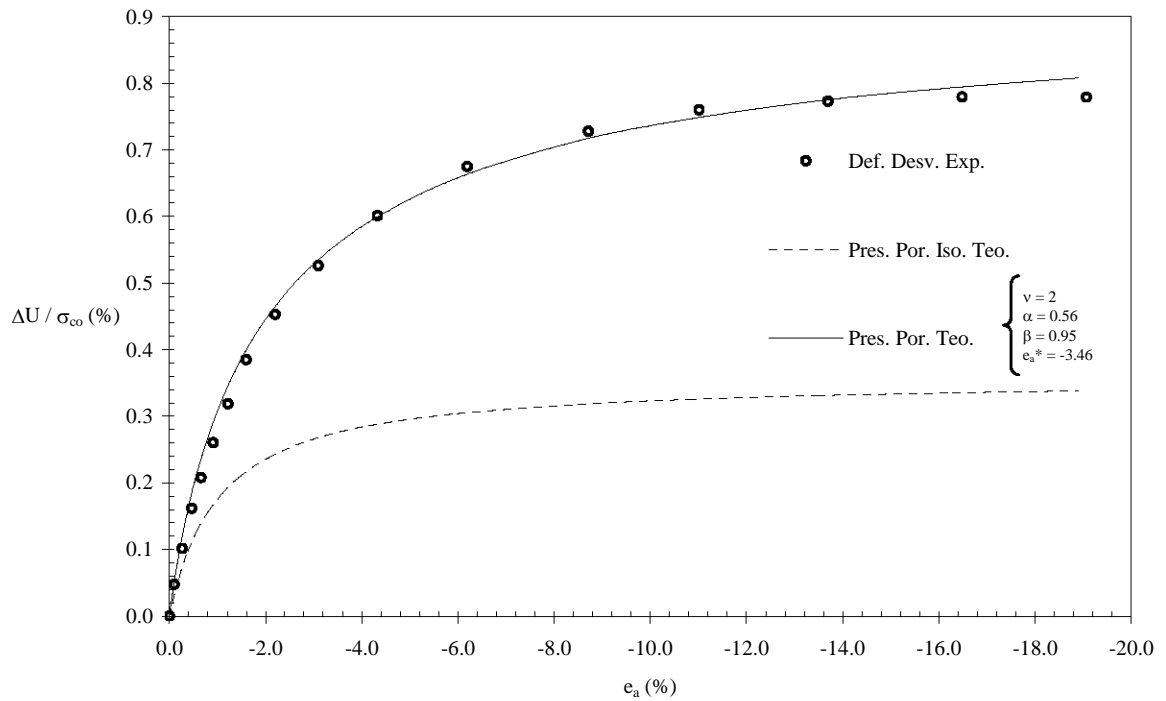


Fig. 3-122: Curva Presión de poro (AI)  $\sigma_{oct} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$   $\nu = 2$

### 3.2.2.2 Pruebas CU Estado Natural.

Las pruebas triaxiales consolidadas no drenadas con medición de presión de poro realizadas en arcilla del Valle de México en este inciso, fueron efectuadas por Héctor Alejandro Nava Muguero en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Nava M. Héctor. 2004).

El material arcilloso empleado en los ensayos se obtuvo de un sondeo de tipo inalterado en la zona lacustre de la ciudad de México, recuperada a diferentes profundidades.

El lugar de exploración se denominó “Los Álamos” por realizarse en dicha colonia en el conjunto residencial, “Lázaro Cárdenas”, ubicado en el Eje Central Lázaro Cárdenas No. 616, Del. Benito Juárez cerca de las avenidas Eje Central y Xola.

Las profundidades a las que se realizaron las pruebas triaxiales CU fueron: 5, 10, 15 y 25 m

Algunas de las propiedades índices del material usado en los ensayos se muestran en la tabla 3-18 y en las figuras 3-123 a 3-152 se muestran las curvas esfuerzo desviador normalizado vs. deformación desviadora natural ( $e_a$ ) y presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ ), para las curvas de compresión con esfuerzo axial aumentado, recalculadas mediante el principio de proporcionalidad natural (PPN), donde las curvas teóricas para un valor de  $\nu = 2$  se aproximan más al comportamiento real. El valor de los parámetros  $\mu$  y  $x_f$  que se encontraron se muestra en las tablas 3-19 y en la tabla 3-20 se muestran los valores encontrados para las curvas de presión de poro normalizado vs. ( $e_a$ ), tanto para  $\nu = 1$  y  $\nu = 2$ .

**Tabla 3-18**

Profundidad (m)	w (%)	$\gamma_m$ (ton/m <sup>3</sup> )	$G_s$	LL (%)	IP (%)	$\sigma_{vo}$ (kPa)	$\sigma_p$ (kPa)	OCR	$q_u$ (ton/m <sup>2</sup> )
5	155	1.30	2.36	210	145	55.0	135	2.5	4.3
10	318	1.15	2.14	344	210	35.0	60	1.7	1.1
15	242	1.23	2.16	362	242	80.0	110	1.4	3.5
25	173	1.25	2.27	324	182	100.0	170	1.7	4.2

**Tabla 3-19: Parámetros para obtener las curvas Esfuerzo desviador axial vs. ( $e_a$ )**

Prueba	$\sigma_{co}$ kPa	$\nu$	$\mu$	$x_f$	$\nu$	$\mu$	$x_f$
Axial Incrementado	140	1	0.022	1.313	2	0.013	1.524
	220	1	0.034	1.084	2	0.020	1.262
	300	1	0.034	0.962	2	0.018	1.089
	80	1	0.074	0.724	2	0.026	0.766
	150	1	0.085	0.676	2	0.054	0.795

	200	1	0.033	0.891	2	0.016	0.987
	270	1	0.029	0.848	2	0.012	0.916
	305	1	0.033	0.891	2	0.016	0.987
	230	1	0.033	1.011	2	0.021	1.199
	300	1	0.029	0.999	2	0.016	1.139

**Tabla 3-20: Parámetros para obtener las curvas Presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ )**

Prueba	$\sigma_{co}$ kPa	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$e_a^*$	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$e_a^*$
Axial Incrementado	140	1	0.26	1.83	-1.36	2	0.22	3.33	-1.27
	220	1	0.39	1.59	-1.68	2	0.34	2.26	-1.58
	300	1	0.48	1.34	-1.66	2	0.43	1.81	-1.58
	80	1	0.72	0.66	-3.88	2	0.60	0.98	-2.75
	150	1	0.77	0.75	-5.61	2	0.64	0.94	-3.57
	200	1	0.57	1.16	-3.08	2	0.49	1.52	-2.51
	270	1	0.55	1.28	-2.45	2	0.49	1.69	-2.22
	305	1	0.57	1.16	-3.08	2	0.49	1.52	-2.51
	230	1	0.47	1.15	-2.41	2	0.47	1.09	-2.55
	300	1	0.50	1.25	-2.37	2	0.50	1.27	-2.46

Las correlaciones obtenidas para los diferentes valores de  $\nu$  se muestran en las tablas 3-21.

**Tabla 3-21: Valores de correlación.**

Prueba	$\sigma_{co}$ kPa	Coeficiente de correlación para las curvas Esfuerzo desviador vs. Deformación desviadora natural		Coeficiente de correlación para las curvas Cambio volumétrico normalizado vs. Deformación desviadora natural	
		$\nu = 1$	$\nu = 2$	$\nu = 1$	$\nu = 2$
Axial Incrementado	140	0.999	0.995	1.000	0.998
	220	0.999	0.996	0.999	0.998
	300	0.998	0.998	0.999	0.999
	80	0.975	0.987	0.998	0.998
	150	0.996	0.998	0.999	0.999
	200	0.997	0.995	0.999	0.999
	270	0.994	0.996	0.997	0.999
	305	0.997	0.995	0.999	0.999
	230	1.000	0.998	0.999	0.995
	300	0.999	0.996	0.998	0.996

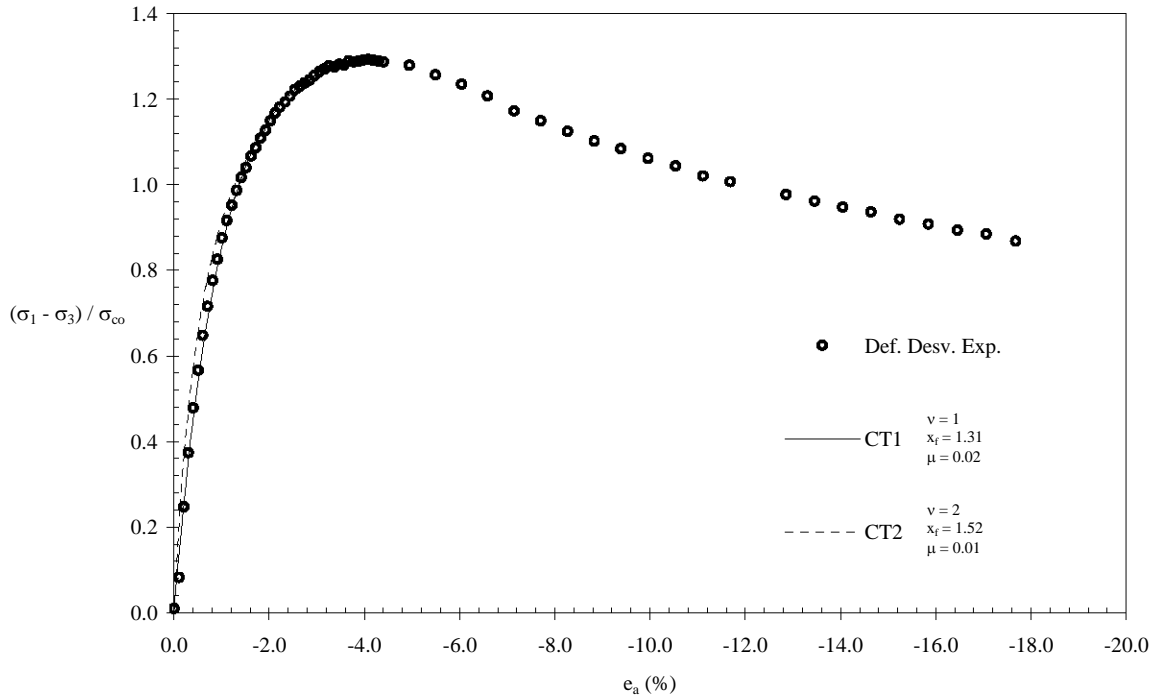


Fig. 3-123: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 140$  kPa (A1)

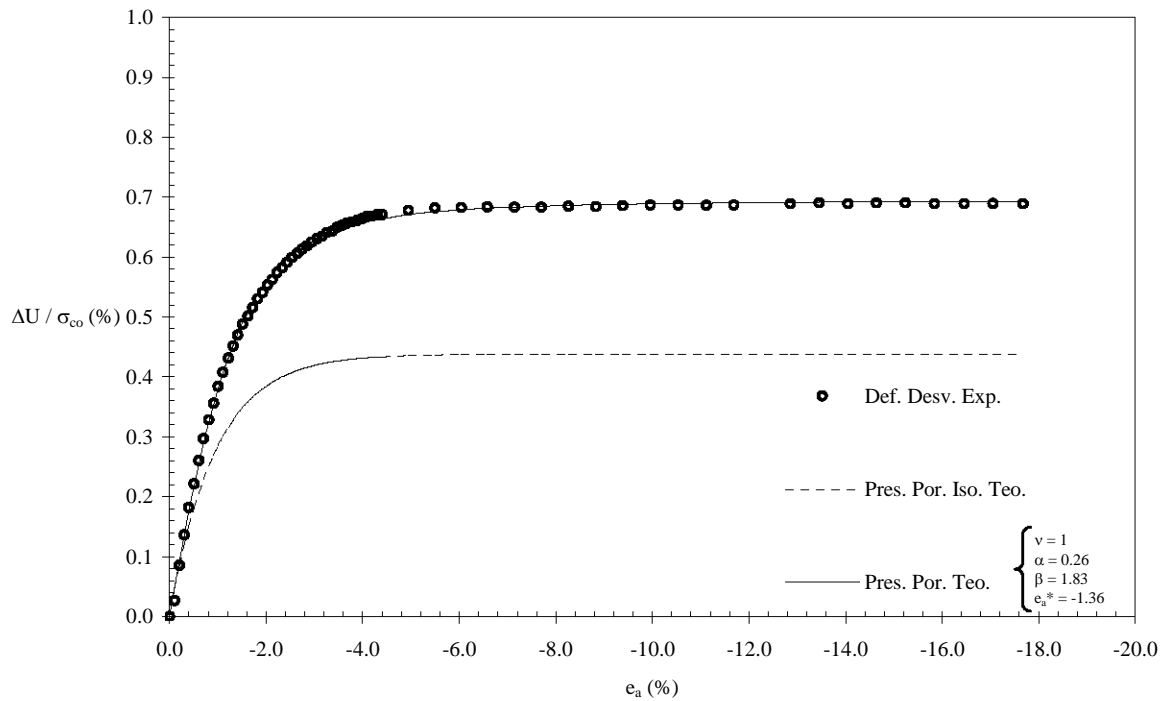


Fig. 3-124: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 140$  kPa (A1)

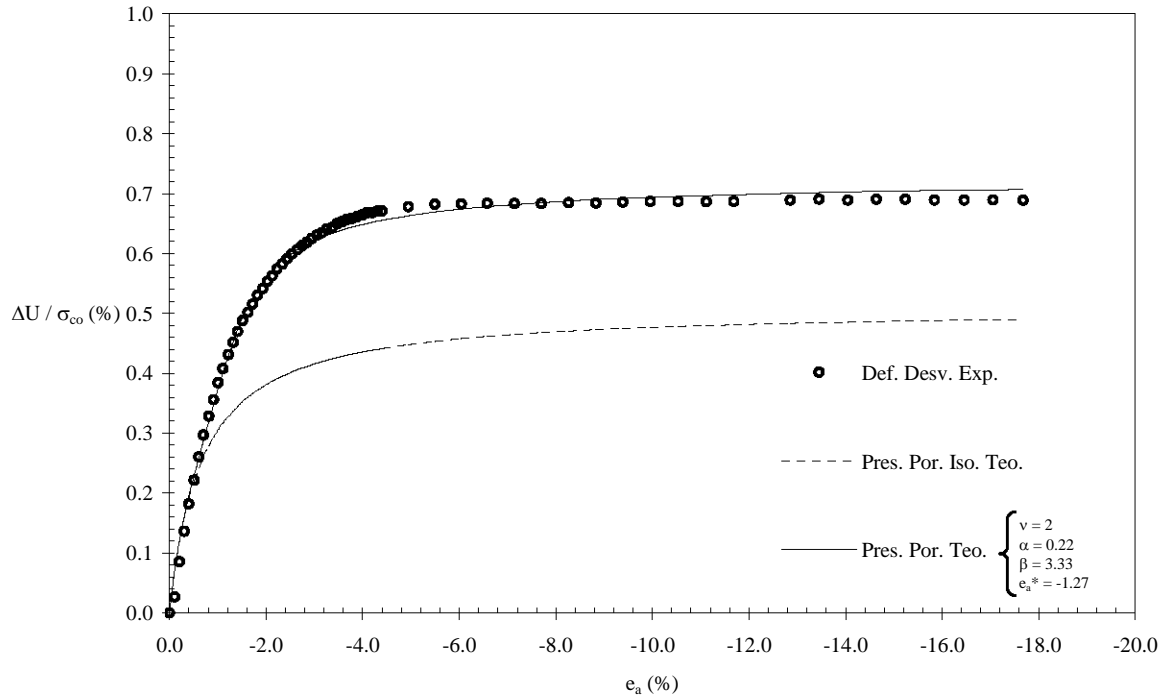


Fig. 3-125: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 140$  kPa (A1)

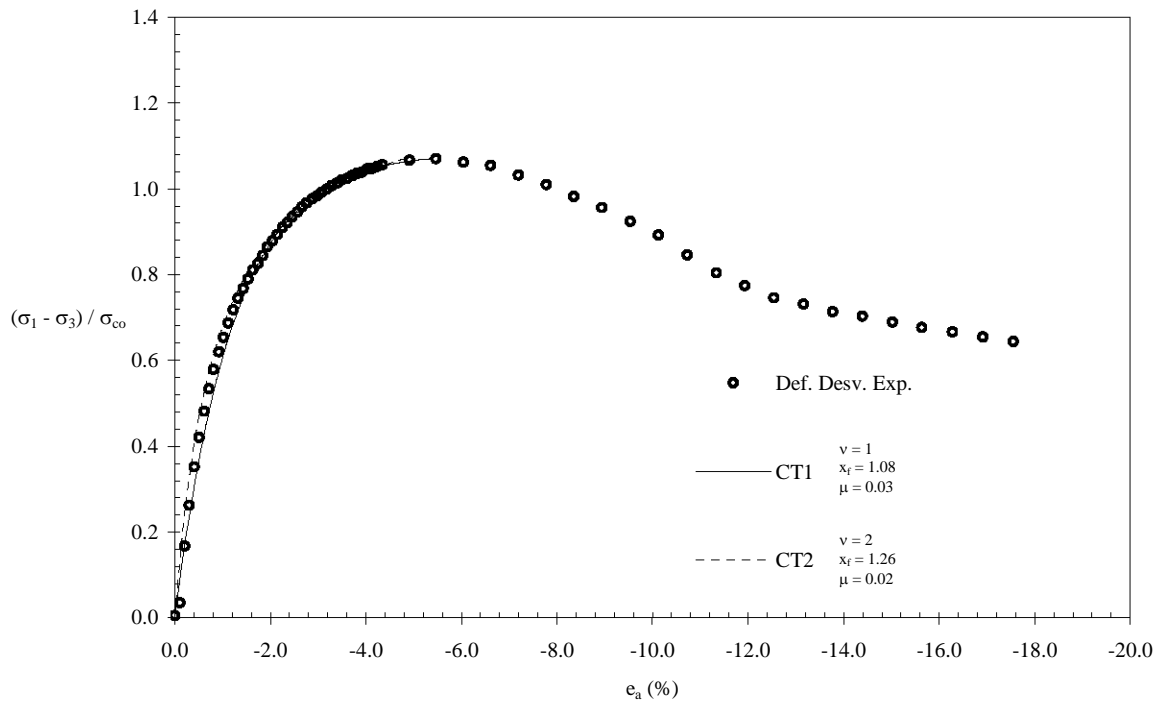


Fig. 3-126: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 220$  kPa (A2)



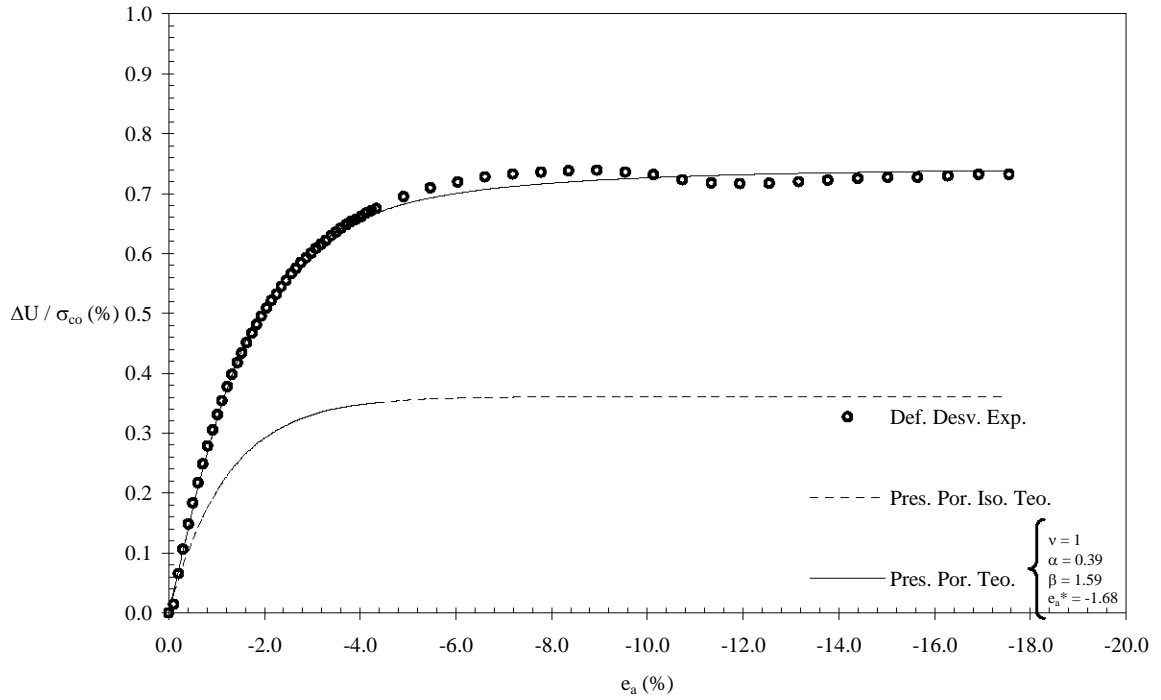


Fig. 3-127: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 220$  kPa (A2)

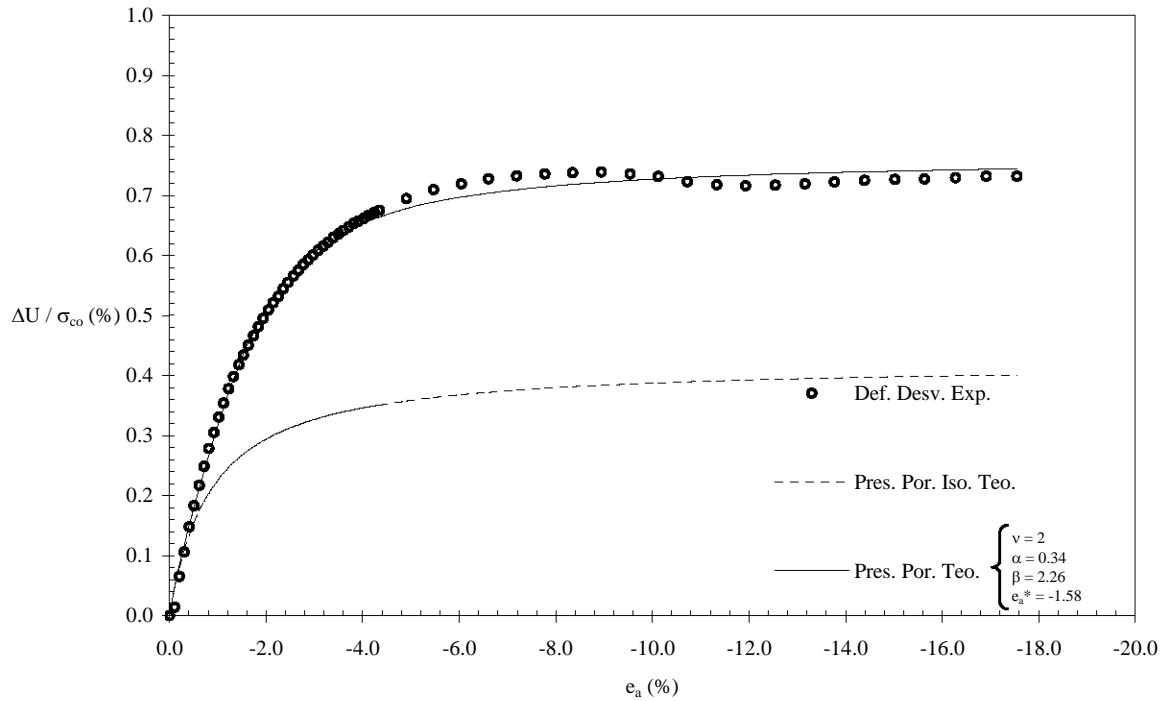


Fig. 3-128: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 220$  kPa (A2)

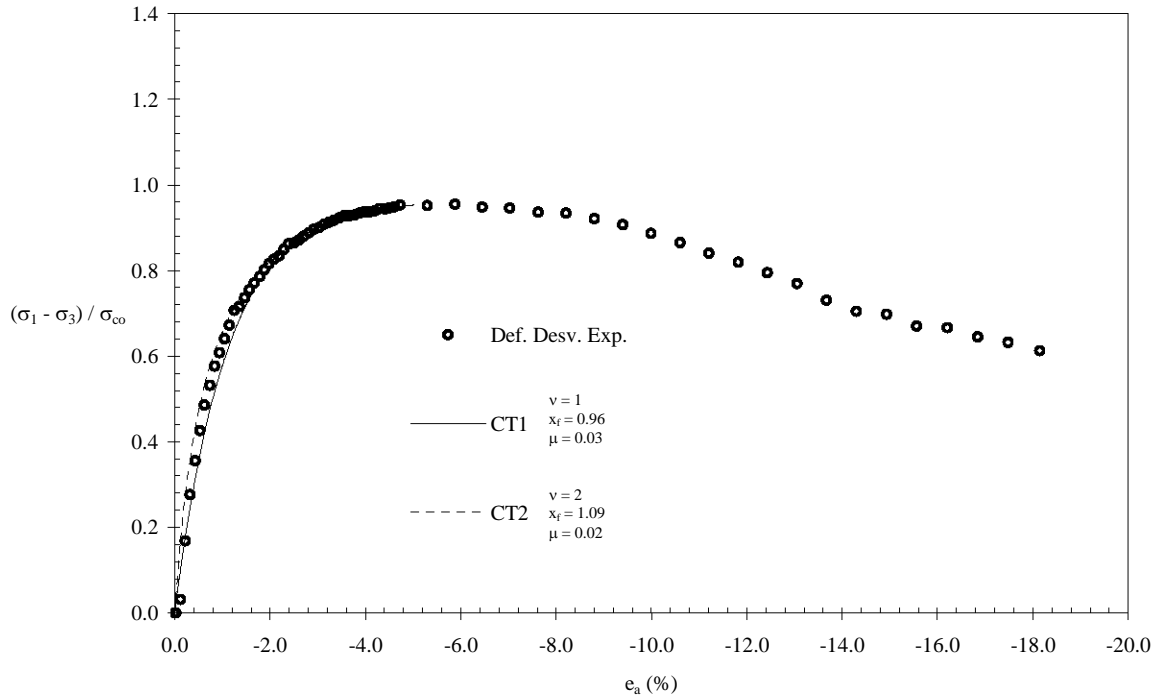


Fig. 3-129: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 300$  kPa (A3)

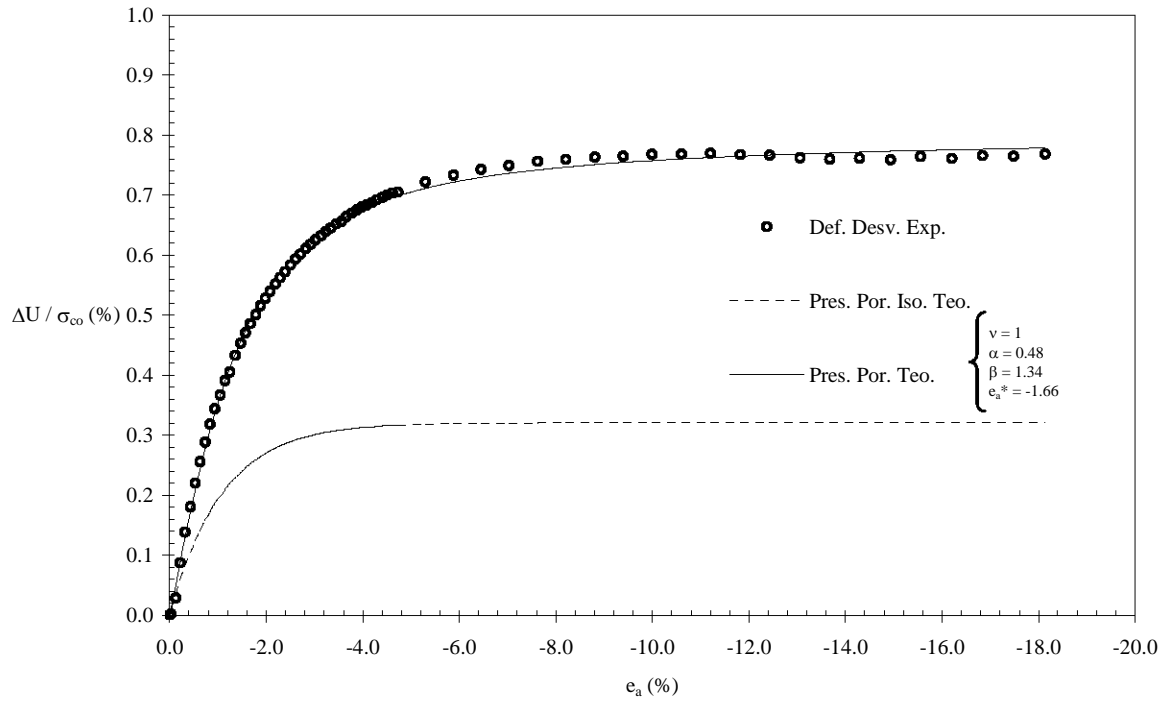


Fig. 3-130: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 300$  kPa (A3)

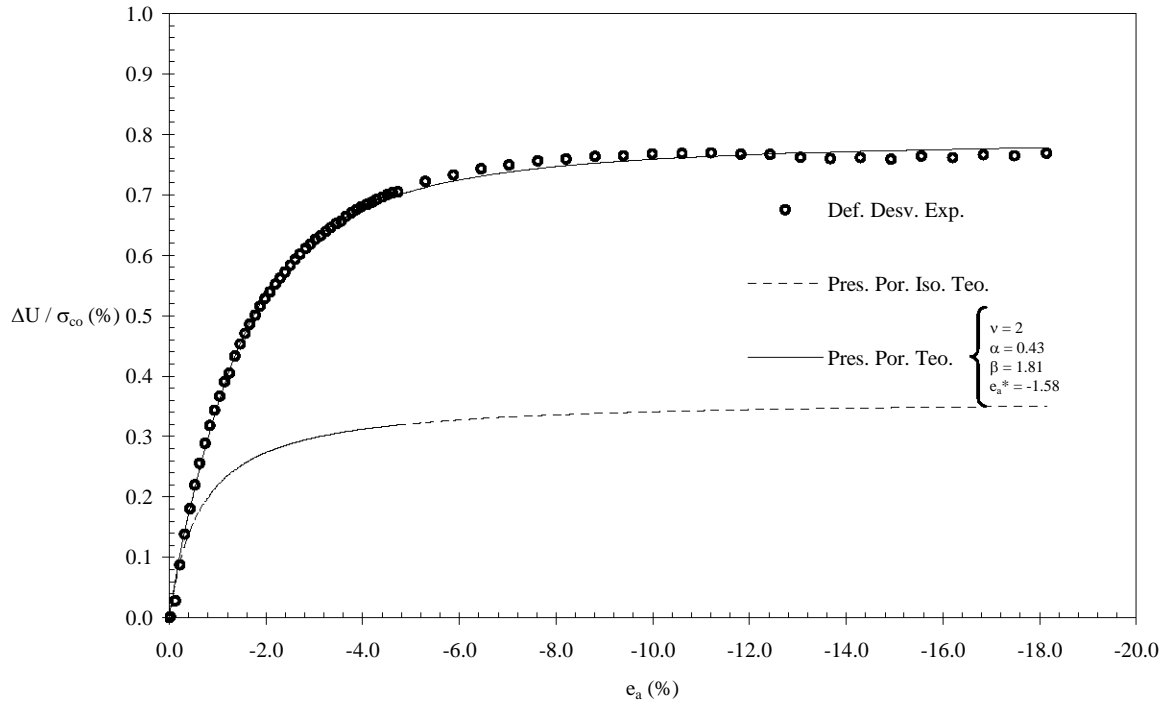


Fig. 3-131: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 300 \text{ kPa}$  (A3)

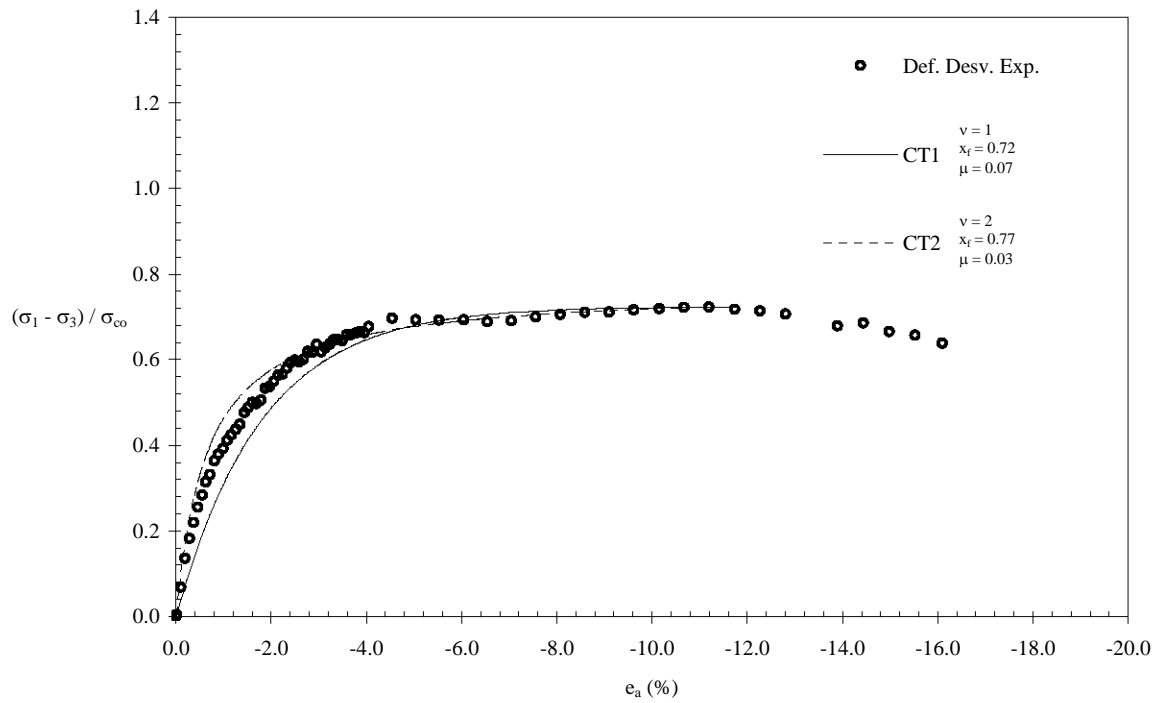


Fig. 3-132: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 80 \text{ kPa}$  (A4)

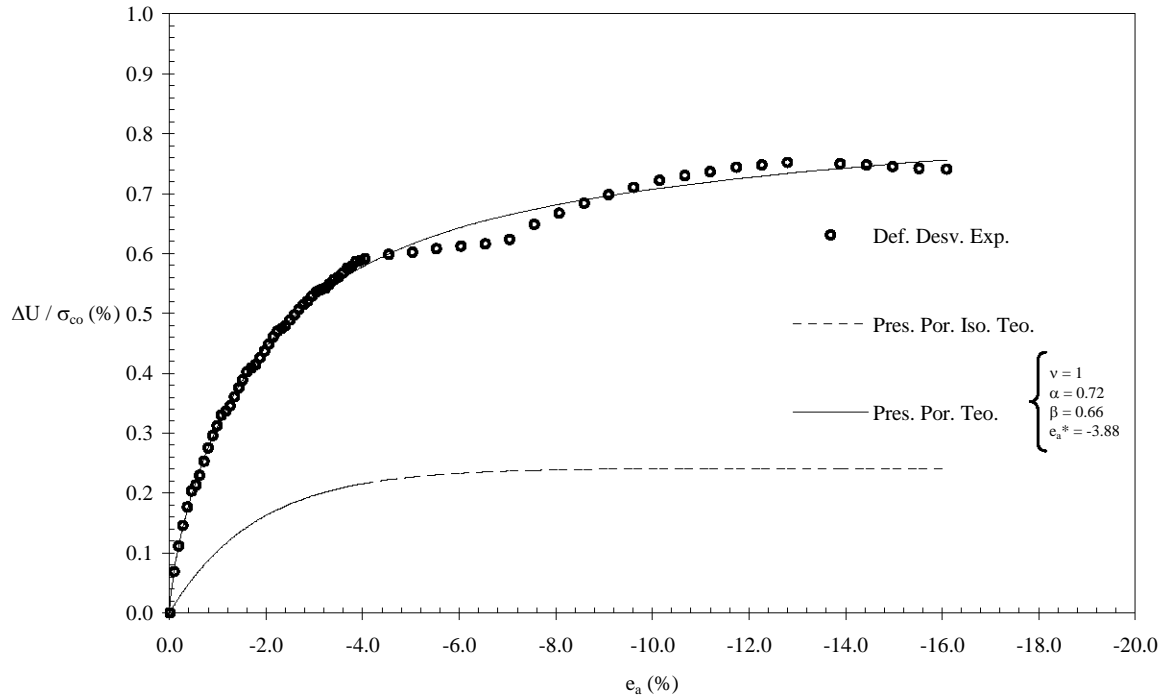


Fig. 3-133: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 80$  kPa (A4)

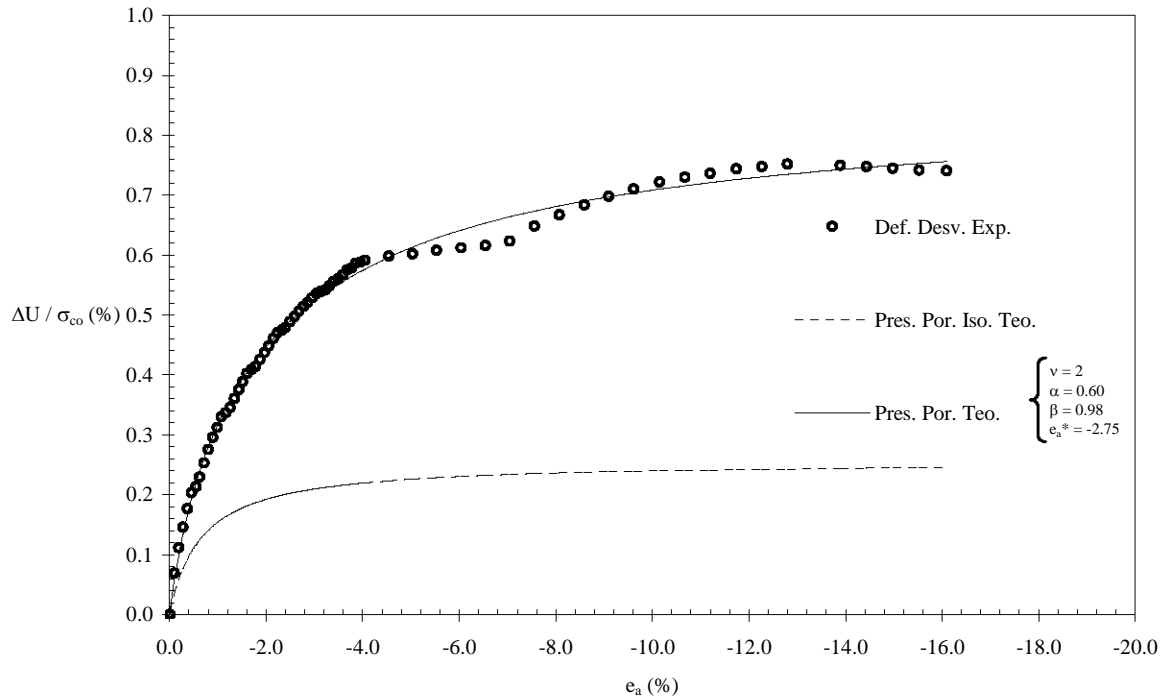


Fig. 3-134: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 80$  kPa (A4)

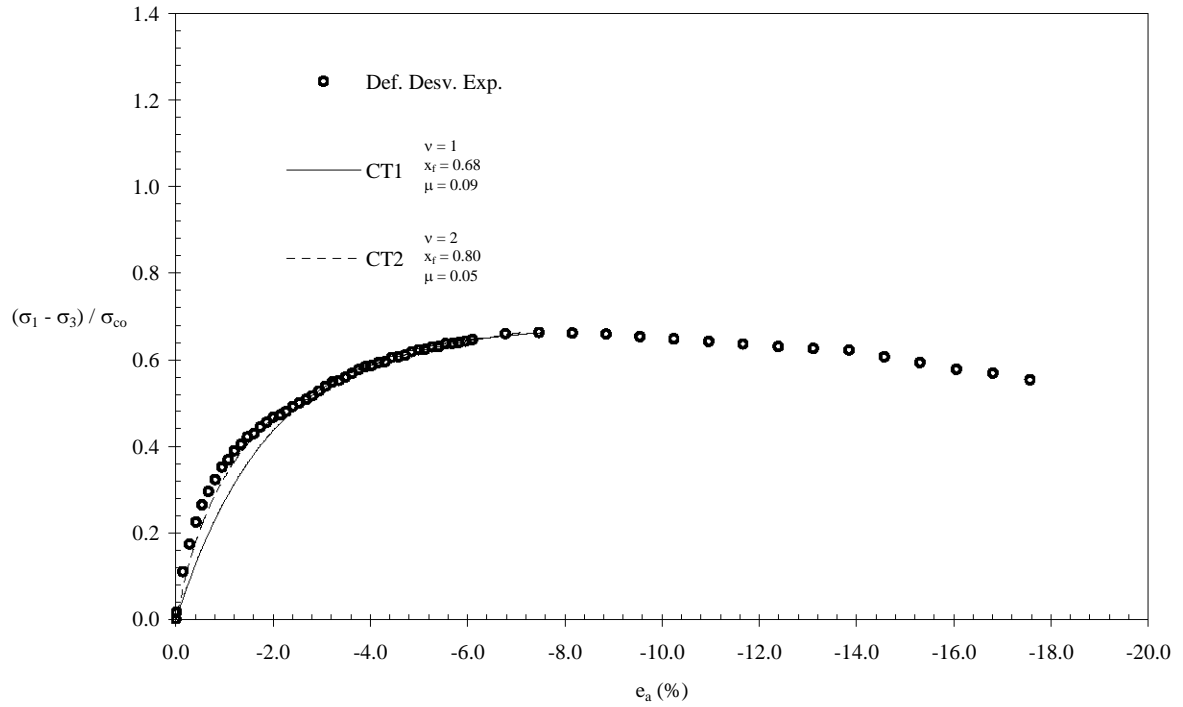


Fig. 3-135: Curva esfuerzo – deformación  $\sigma_{co} = 150$  kPa (A5)

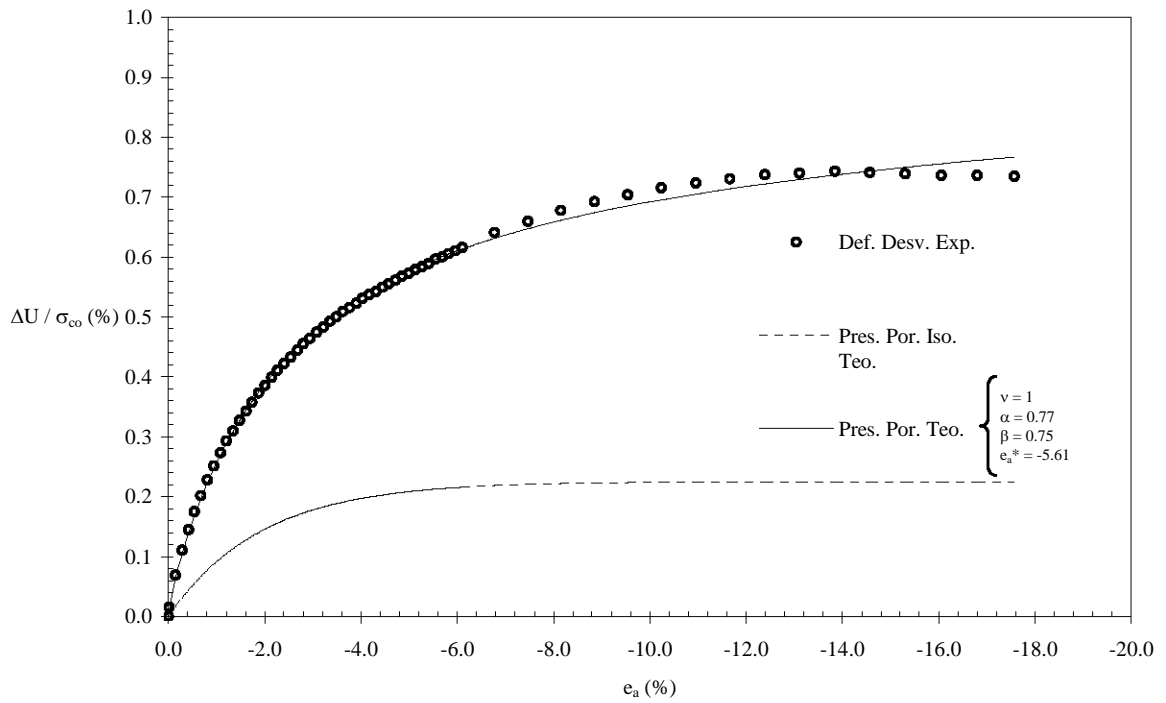


Fig. 3-136: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 150$  kPa (A5)

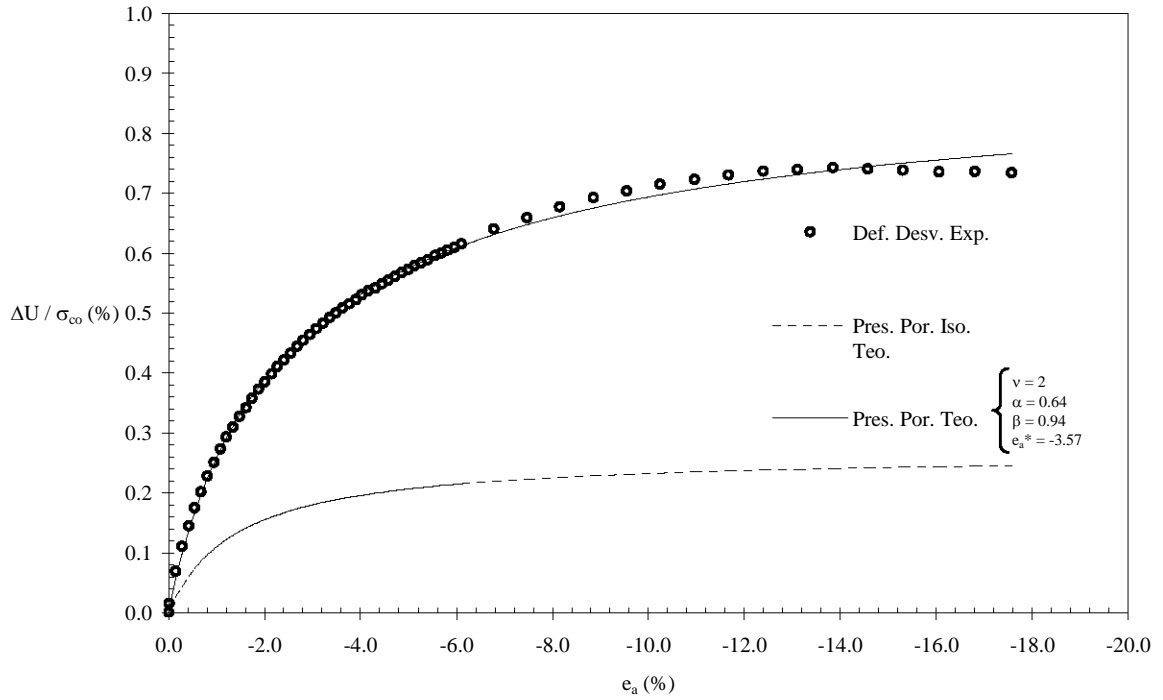


Fig. 3-137: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 150$  kPa (A5)

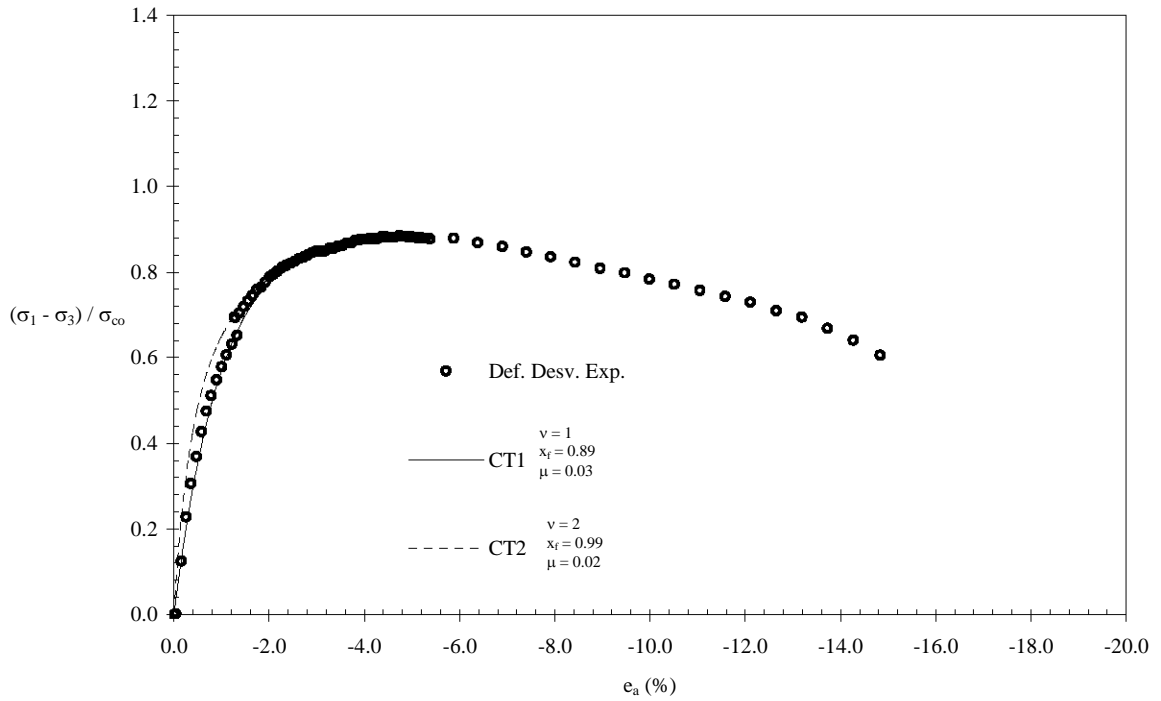


Fig. 3-138: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 200$  kPa (A11)

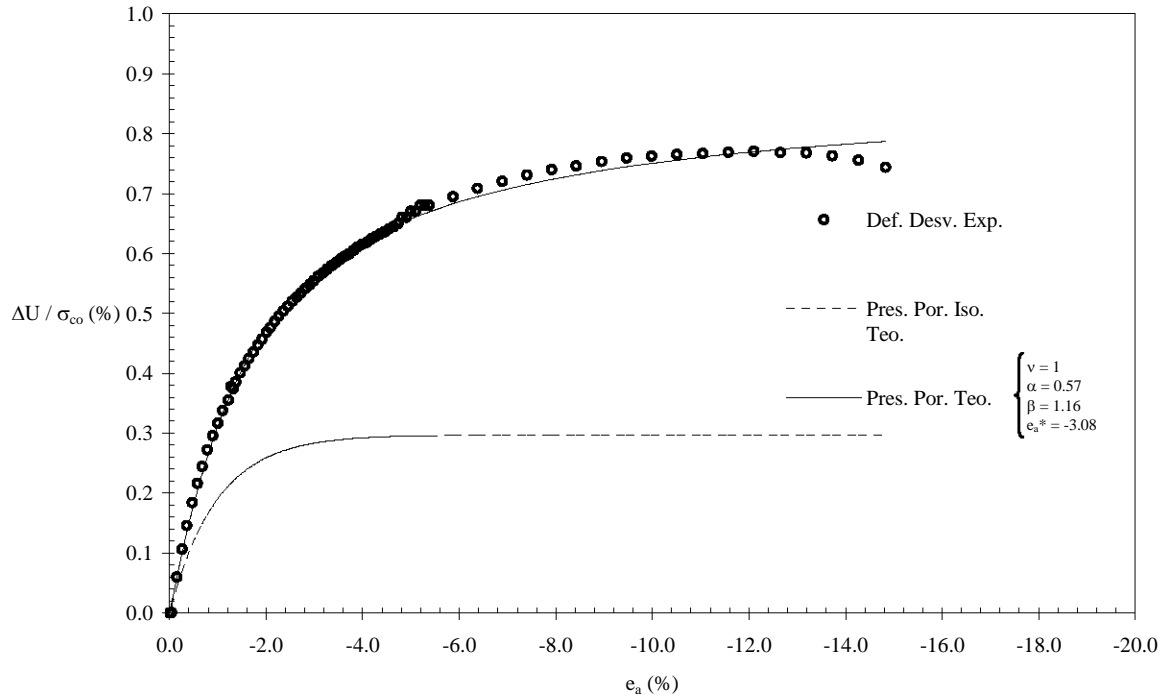


Fig. 3-139: Curva presión de poro  $\sigma_{co} = 200 \text{ kPa}$  (A11)

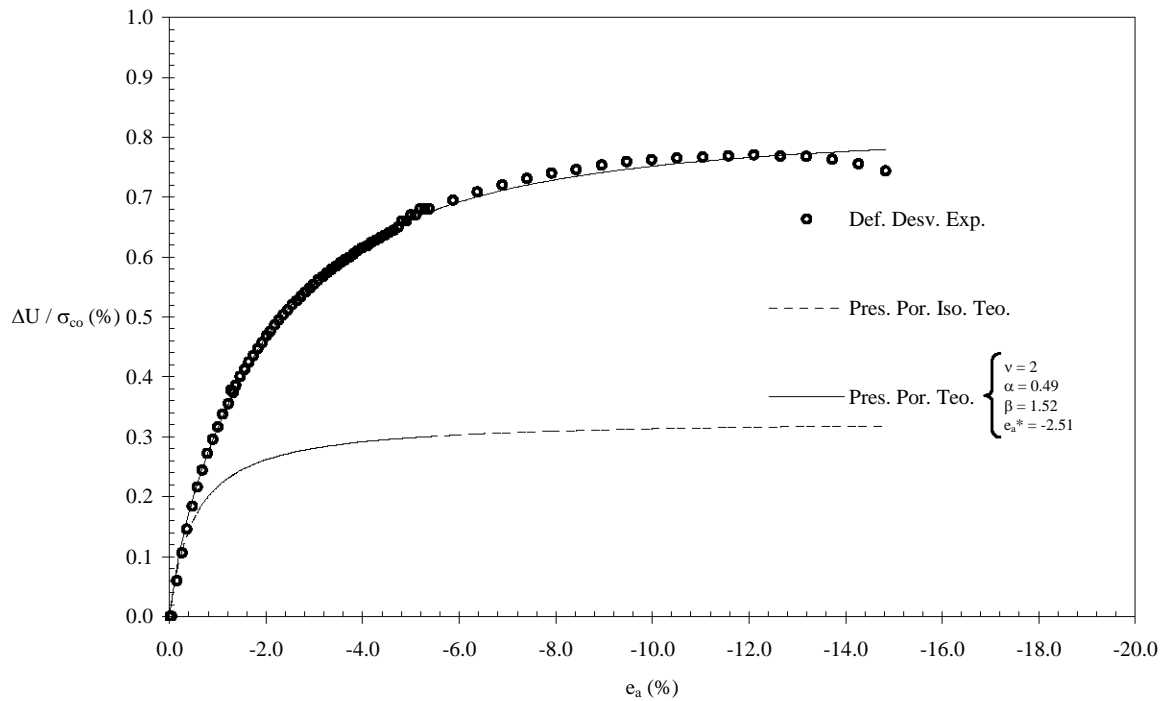


Fig. 3-140: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 200 \text{ kPa}$  (A11)

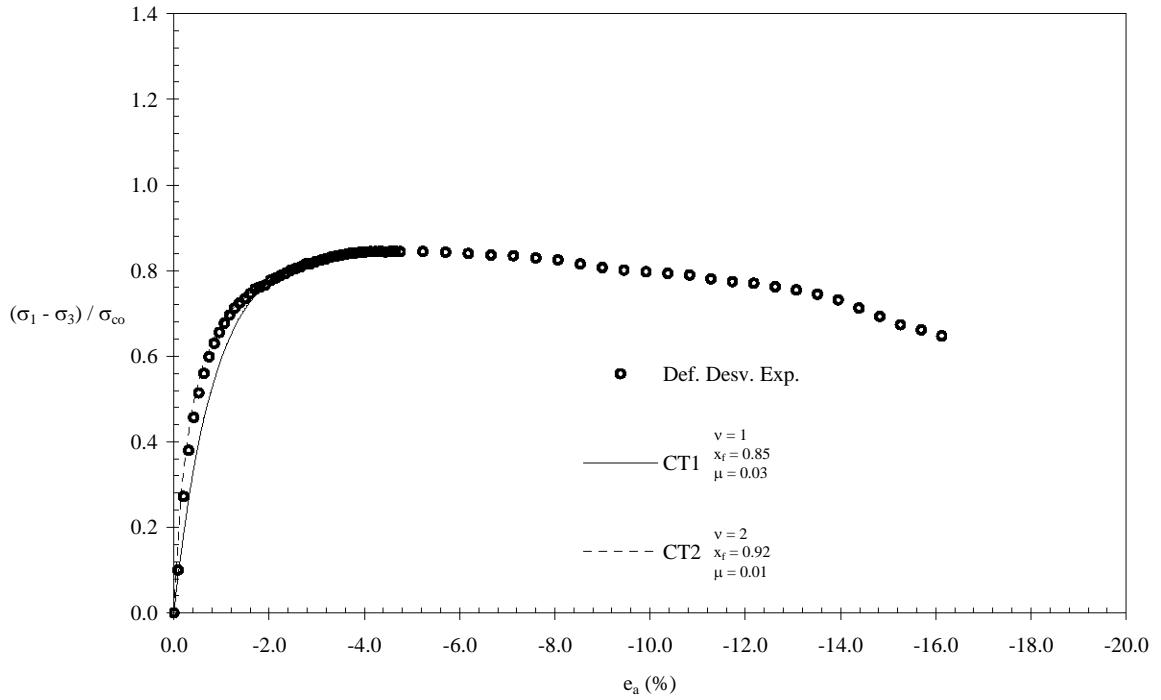


Fig. 3-141: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 270$  kPa – A12

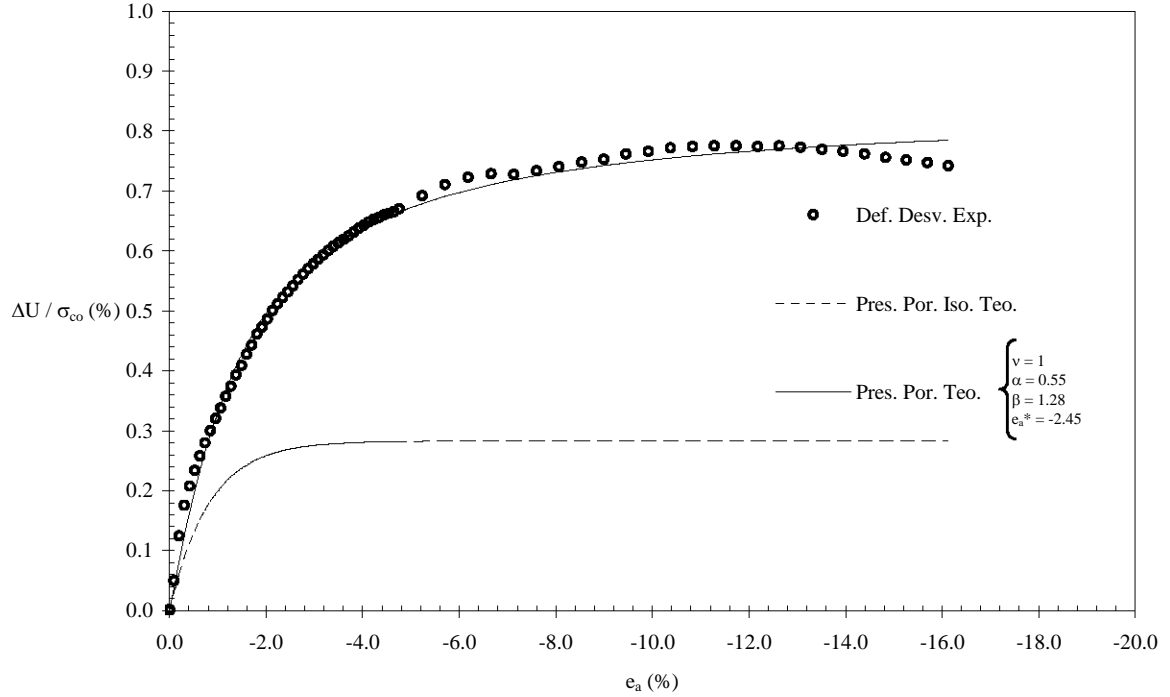


Fig. 3-142: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 270$  kPa (A12)



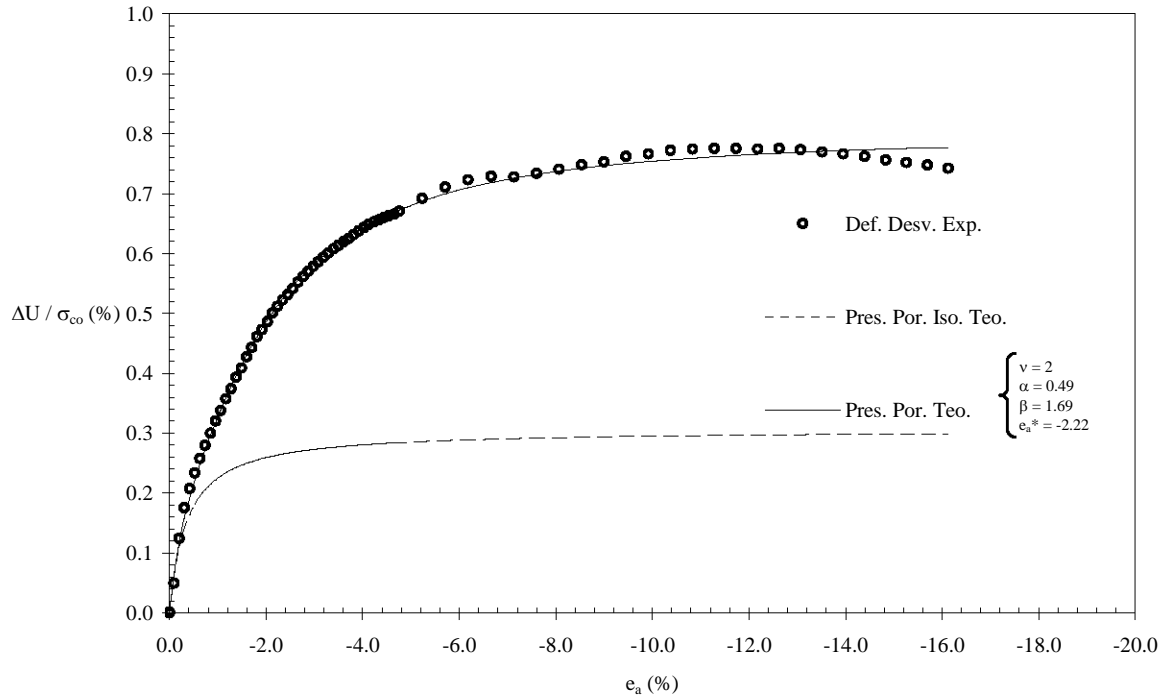


Fig. 3-143: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 270$  kPa (A12)

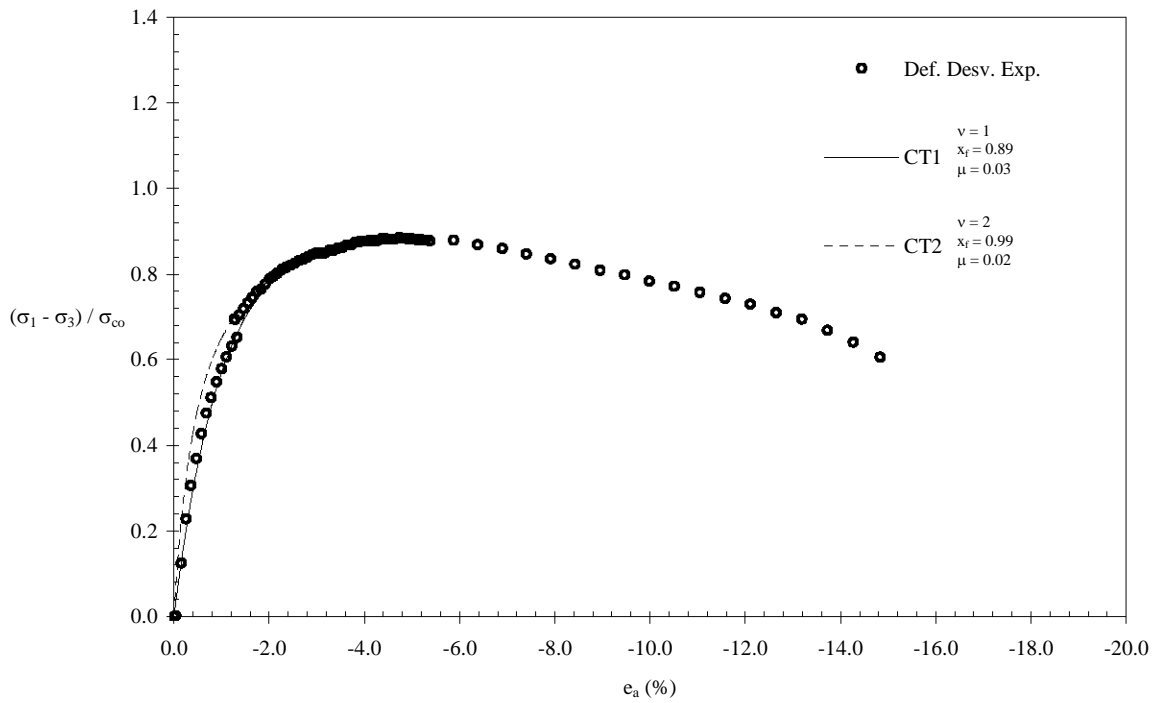


Fig. 3-144: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 305$  kPa (A13)

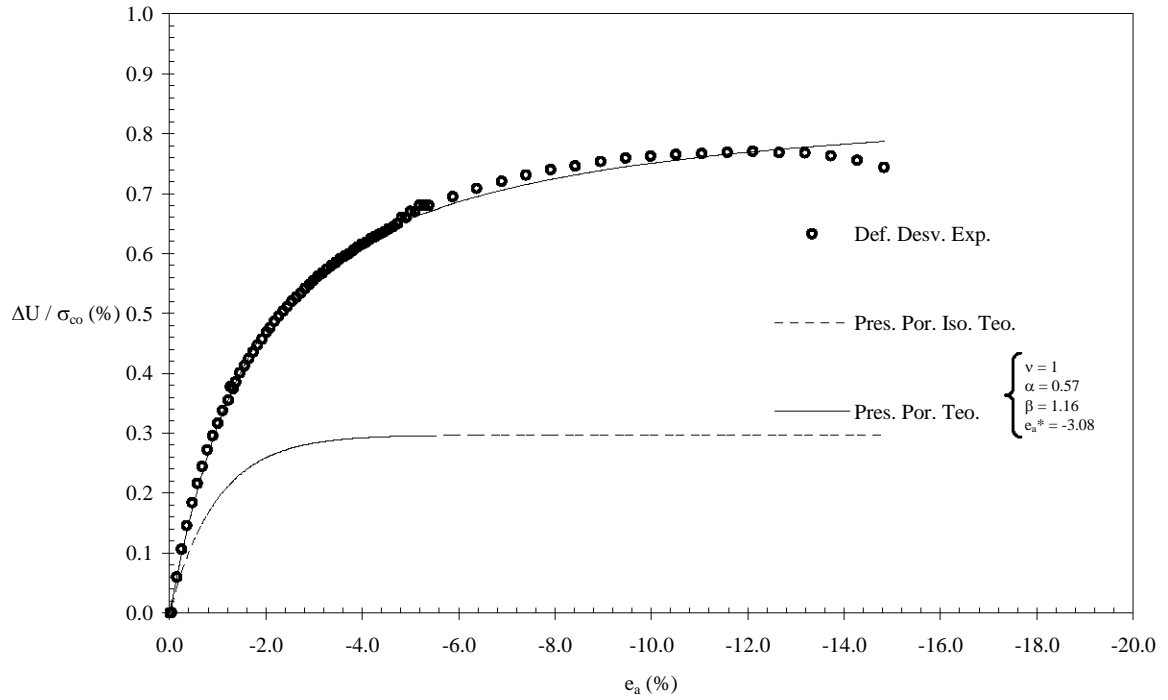


Fig. 3-145: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 305$  kPa (A13)

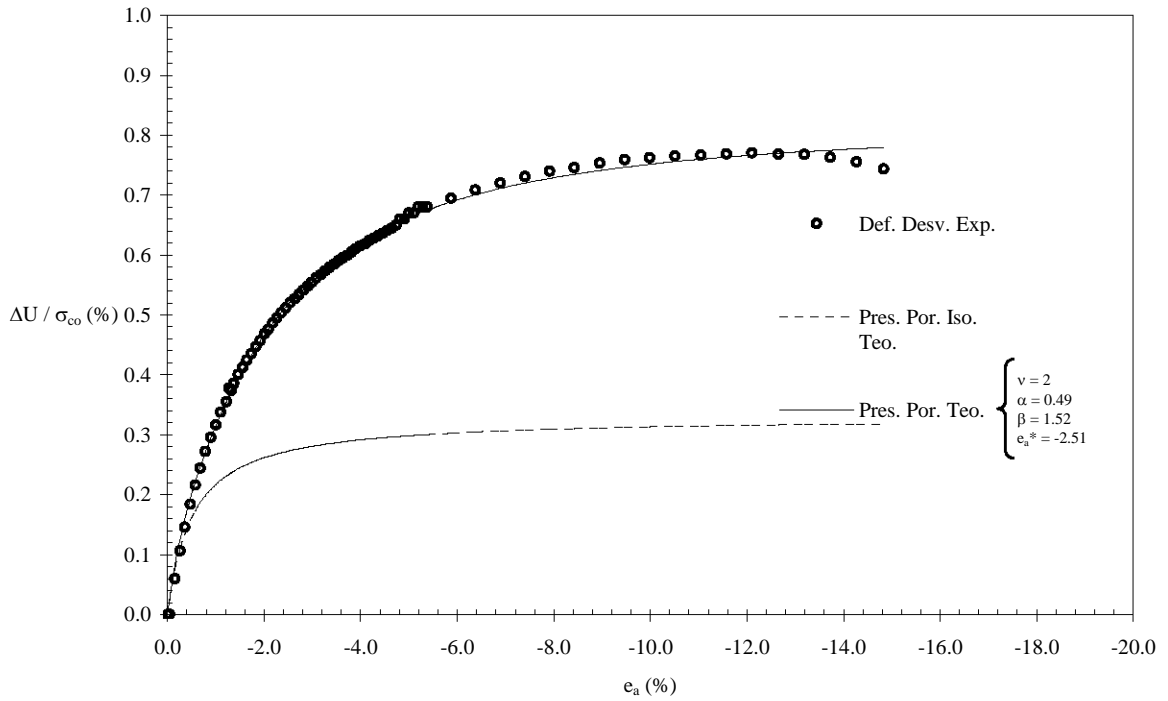


Fig. 3-146: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 305$  kPa (A13)

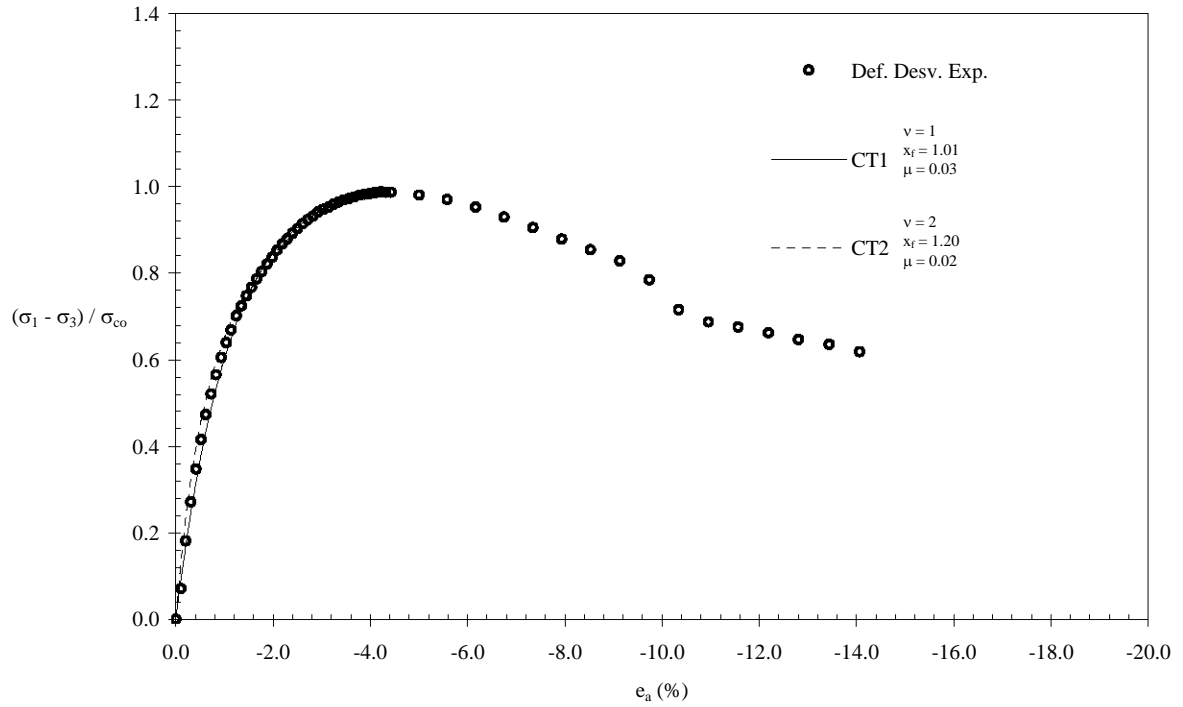


Fig. 3-147: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{c0} = 230$  kPa (A17)

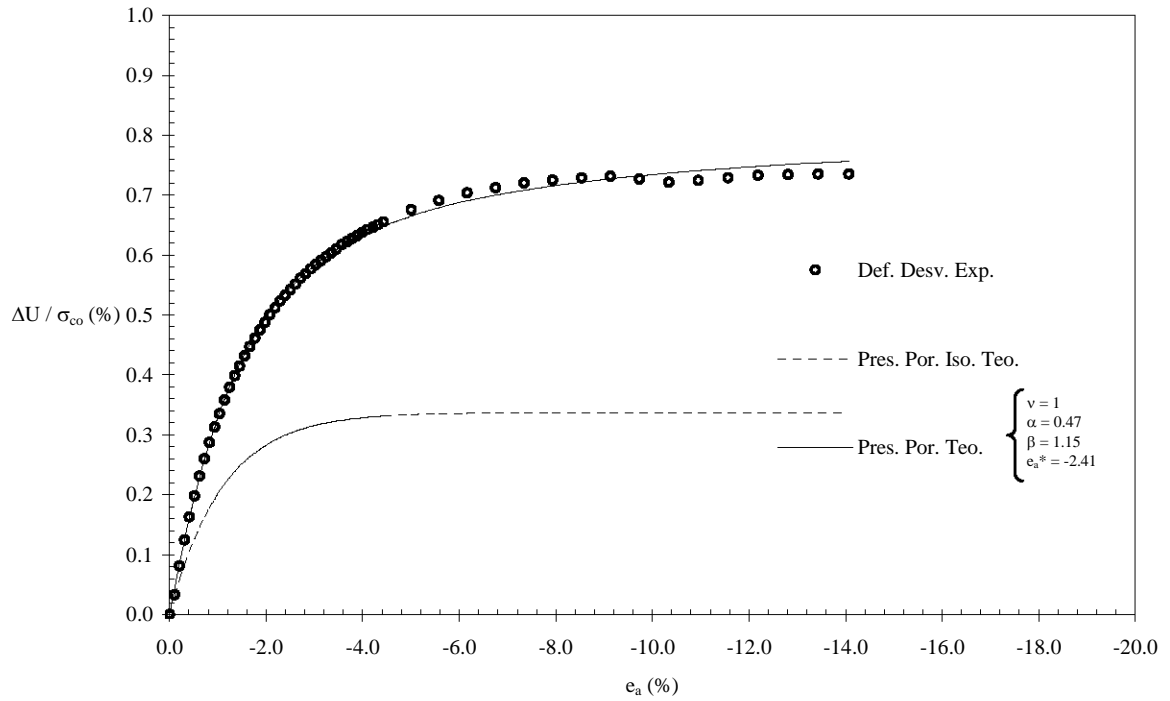


Fig. 3-148: Curva de presión de poro  $\sigma_{c0} = 230$  kPa (A17)

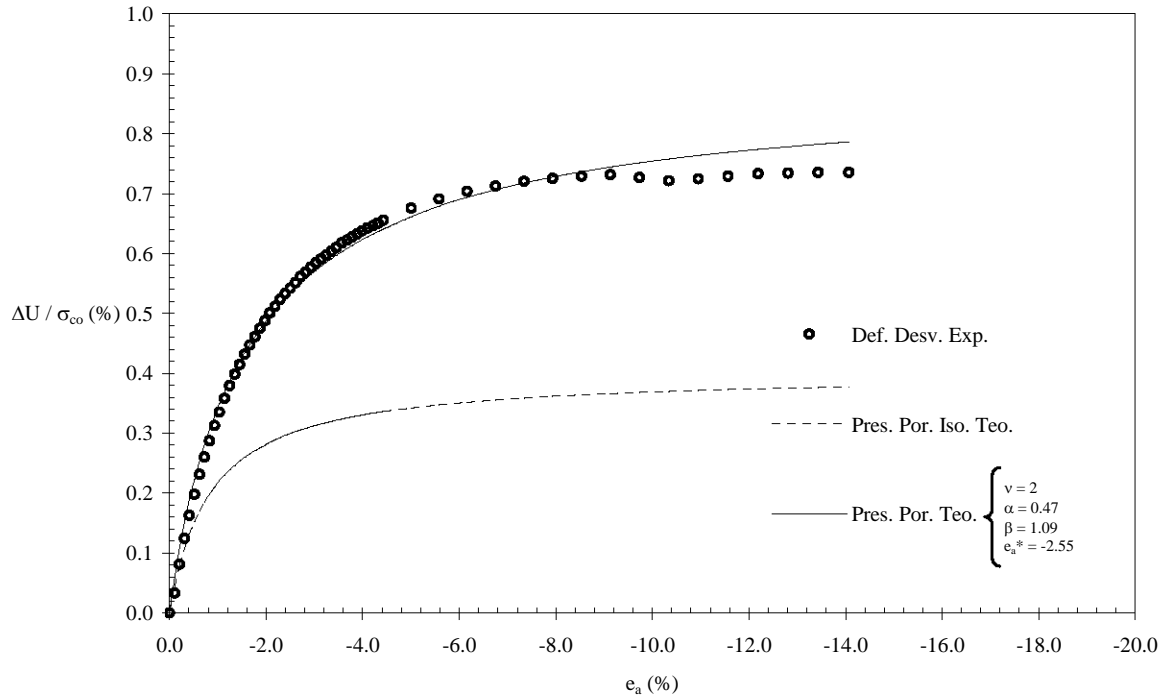


Fig. 3-149: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 230$  kPa (A17)

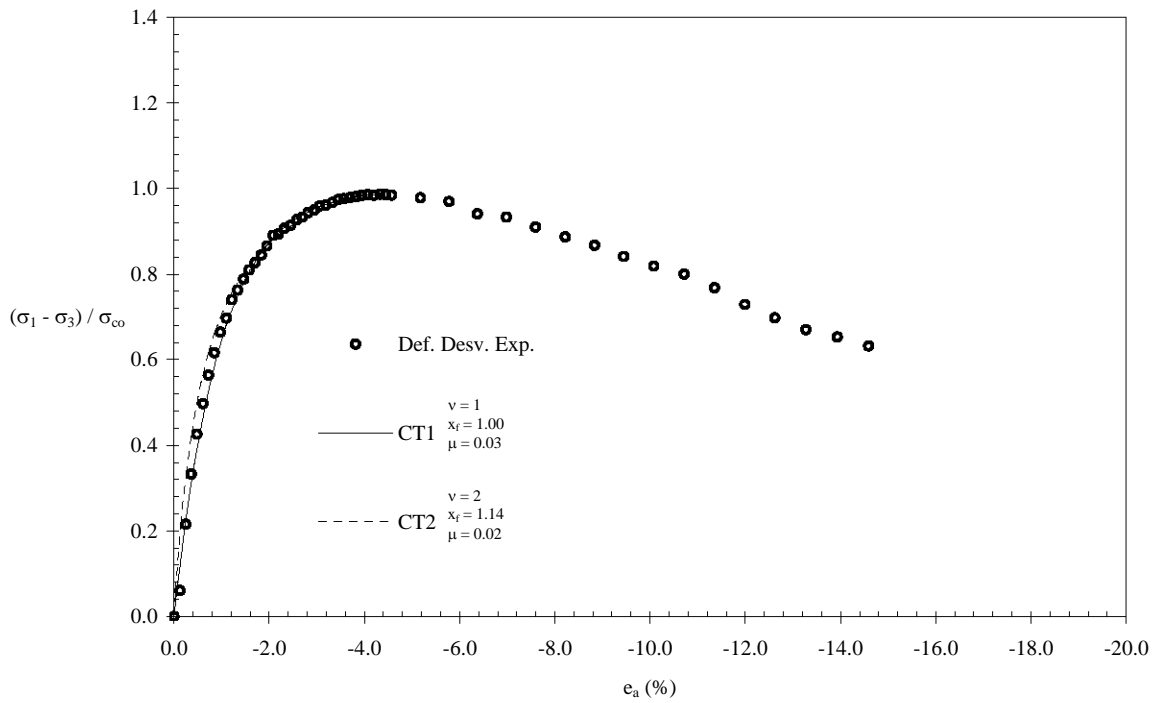


Fig. 3-150: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 230$  kPa (A17)

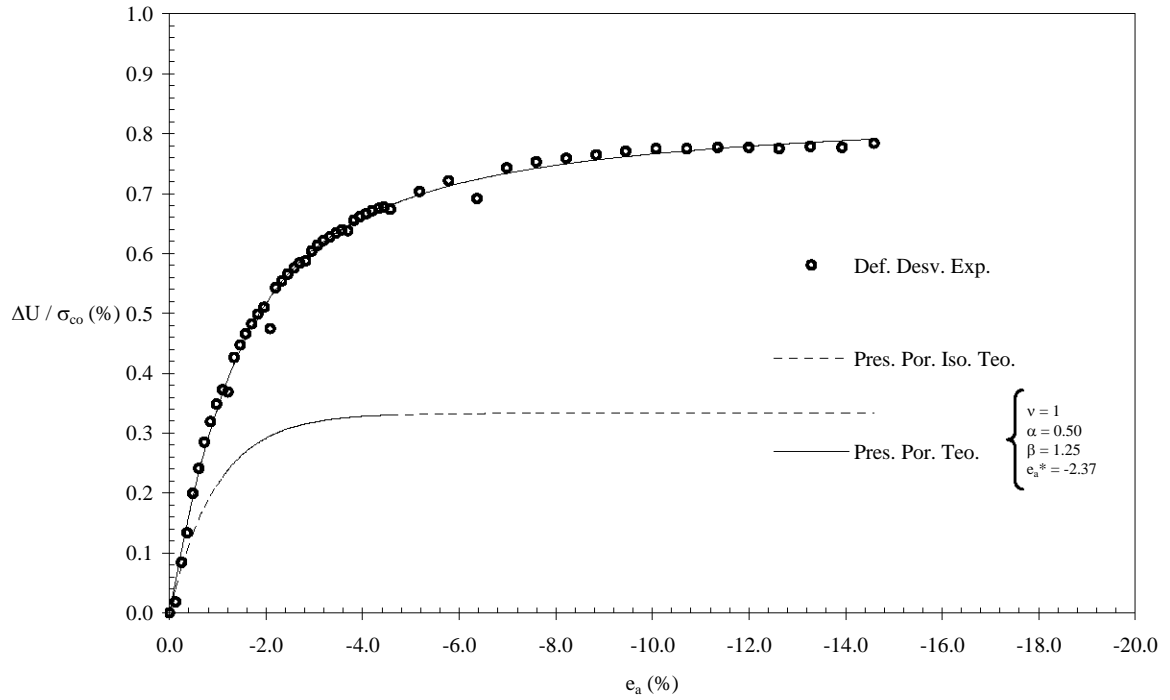


Fig. 3-151: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 230 \text{ kPa}$  (A17)

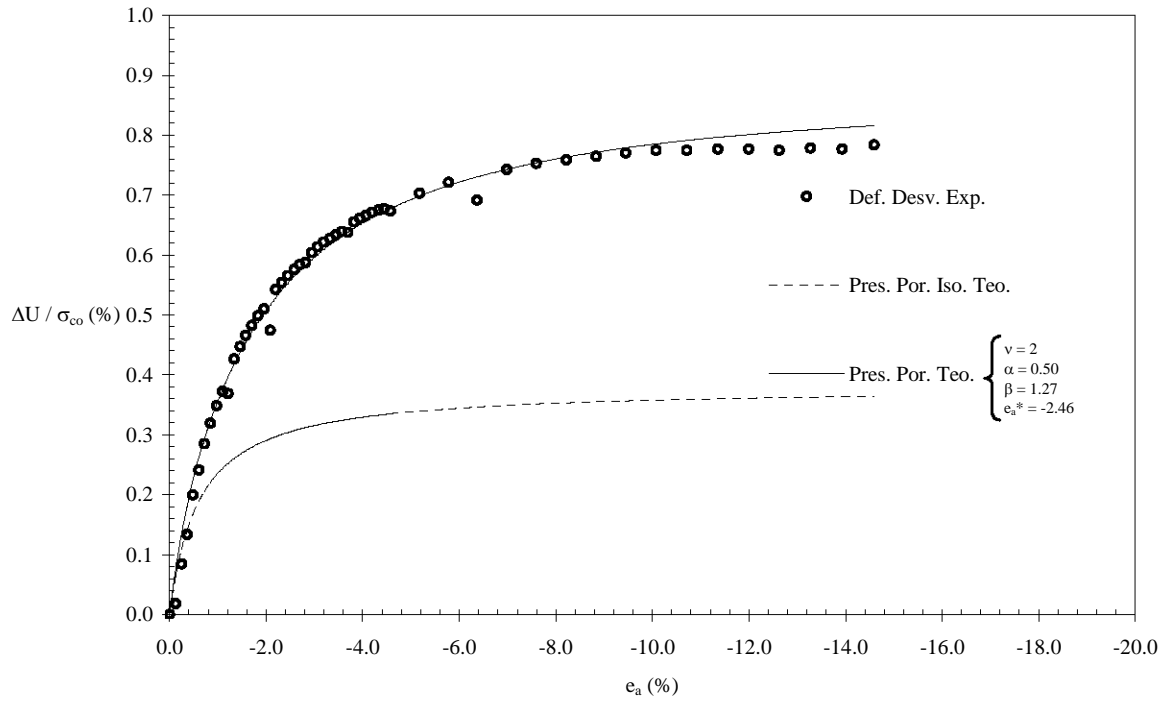


Fig. 3-152: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 230 \text{ kPa}$  (A17)

### 3.2.3 Arcilla Caolinita.

Las pruebas ajustadas en este apartado fueron tomadas de la tesis doctoral realizada por el ahora Dr. Venancio Trueba López en la Escuela Central de Paris en 1988 cuyo titulo es “Estudio del comportamiento mecánico de las arcillas saturadas bajo solicitaciones tridimensionales.”

Como se menciona en la tesis, la arcilla usada es conocida como Arcilla Blanca y es una arcilla limosa con un poco de arena, de plasticidad mediana, vendida comercialmente de forma deshidratada, en polvo, la cual fue mezclada con agua para la formación de la muestras.

La granulometría y límites de Atterberg se muestran en la tabla 3-22.

**Tabla 3-22**

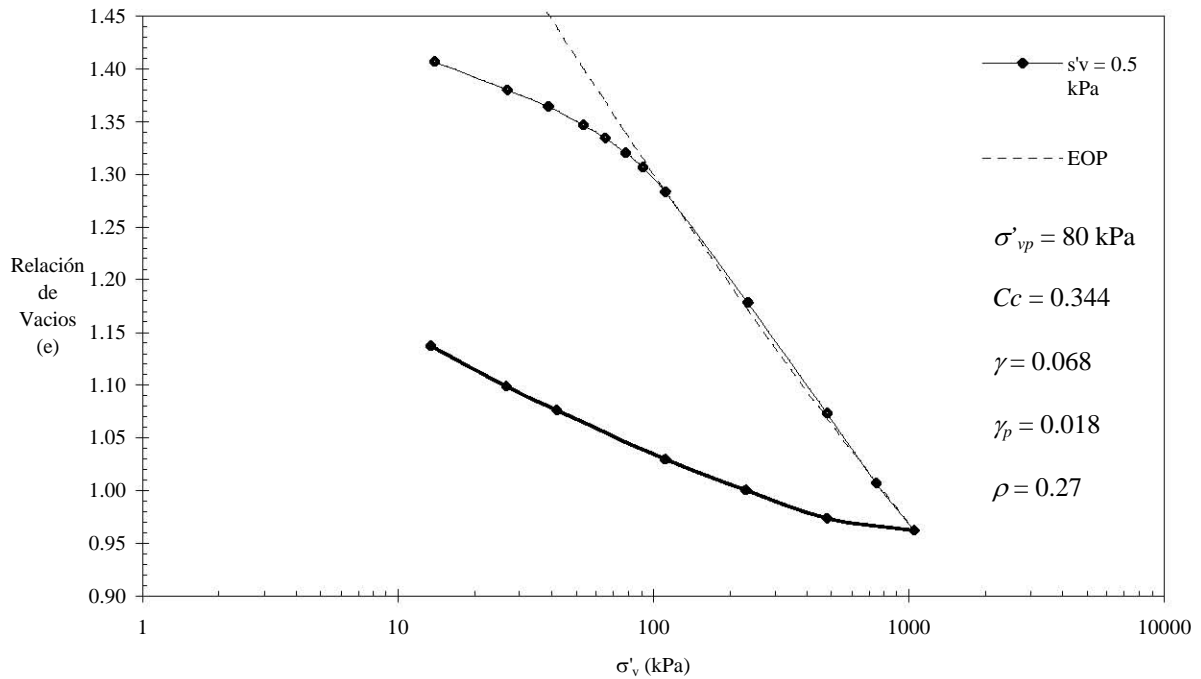
Granulometría			Ll	Lp	IP
$\leq 2 \mu\text{m}$ (caolinita)	Limo	Arena			
70%	21%	9%	61%	30%	31

Después de realizada la formación del material a utilizar, de manera semejante a lo expuesto en el capítulo 3.2.2.1, se realizó una prueba de consolidación odométrica, cuyos datos se muestran en la tabla 3-23 y aparecen de forma gráfica en la figura 3-153.

**Tabla 3-23**

$\sigma$ kPa	$e$
13.937	1.407
26.823	1.380
38.944	1.364
53.345	1.347
64.747	1.334
77.944	1.320
91.059	1.306
111.733	1.283
234.884	1.179
480.916	1.073
747.511	1.007
1051.289	0.962
479.170	0.973
231.281	1.000
111.328	1.030

41.997	1.076
26.556	1.099
13.426	1.137



**Fig. 3-153: Curva de compresibilidad (Caolinita)**

En las figuras 3-154 a 3-171 se presentan las curvas experimentales y teóricas del comportamiento esfuerzo desviador vs. ( $e_a$ ) y presión de poro normalizada vs. ( $e_a$ ), donde las curvas teóricas para un valor de  $\nu = 2$  se aproximan más al comportamiento real. El valor de los parámetros  $\mu$  y  $x_f$  que se encontraron se muestra en las tablas 3-24 y en la tabla 3-25 se muestran los valores encontrados para las curvas de presión de poro normalizado vs. ( $e_a$ ), tanto para  $\nu = 1$  y  $\nu = 2$ .

**Tabla 3-24: Parámetros para obtener las curvas Esfuerzo desviador axial vs. ( $e_a$ )**

Prueba	OCR	OCF	$\sigma_{oct}$ kPa	$\nu$	$\mu$	$x_f$	$\nu$	$\mu$	$x_f$
Axial Incrementado	1.0	1.0	295	1	0.183	0.550	2	0.052	0.577
	1.0	1.0	402	1	0.162	0.560	2	0.086	0.624
	1.0	1.0	645	1	0.248	0.545	2	0.077	0.585
	1.0	1.0	800	1	0.281	0.542	2	0.088	0.586
	1.0	1.0	1992	1	0.226	0.526	2	0.093	0.588
	1.0	1.0	3240	1	0.211	0.524	2	0.059	0.555

	1.0	1.0	4168	1	0.228	0.482	2	0.085	0.530
	1.0	1.0	5806	1	0.255	0.473	2	0.071	0.502
	1.0	1.0	8125	1	0.287	0.446	2	0.087	0.478
	1.0	1.0	9993	1	0.300	0.430	2	0.077	0.455

**Tabla 3-25: Parámetros para obtener las curvas Presión de poro normalizadas vs. ( $e_a$ )**

Prueba	OCR	OCF	$\sigma_{oct}$ kPa	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$e_a^*$	$\nu$	$\mu$	$\beta$	$e_a^*$
Axial Incrementado	1.0	1.0	295	1	0.620	2.085	-2.542	2	0.619	2.281	-2.784
	1.0	1.0	402	1	0.613	1.035	-4.290	2	0.520	2.095	-4.355
	1.0	1.0	645	1	0.535	1.325	-2.915	2	0.505	2.049	-3.449
	1.0	1.0	800	1	0.638	0.648	-3.897	2	0.548	1.224	-3.934
	1.0	1.0	1992	1	0.595	1.150	-3.104	2	0.560	1.389	-3.135
	1.0	1.0	3240	1	0.384	2.064	-1.789	2	0.431	1.122	-2.803
	1.0	1.0	4168	1	0.549	0.588	-2.166	2	0.504	0.769	-2.185
	1.0	1.0	5806	1	0.562	0.312	-2.008	2	0.478	0.584	-2.029
	1.0	1.0	8125	1	0.537	0.589	-3.350	2	0.486	0.845	-3.371
	1.0	1.0	9993	1	0.469	0.628	-2.097	2	0.477	0.780	-3.380

Las correlaciones obtenidas para los diferentes valores de  $\nu$  se muestran en la tabla 3-26.

**Tabla 3-26: Valores de correlación.**

Prueba	OCR	OCF	$\sigma_{oct}$ kg/cm <sup>2</sup>	Coeficiente de correlación para las curvas Esfuerzo desviador vs. Deformación desviadora natural		Coeficiente de correlación para las curvas Presión de poro normalizada vs. Deformación desviadora natural	
				$\nu = 1$	$\nu = 2$	$\nu = 1$	$\nu = 2$
Axial Incrementado	1.0	1.0	295	0.994	0.994	0.999	0.999
	1.0	1.0	402	0.990	0.996	0.995	0.995
	1.0	1.0	645	0.989	0.996	0.998	1.000
	1.0	1.0	800	0.996	0.998	0.993	0.996
	1.0	1.0	1992	0.995	0.999	0.997	0.997
	1.0	1.0	3240	0.999	0.993	0.999	0.996
	1.0	1.0	4168	0.998	0.998	0.999	1.000
	1.0	1.0	5806	0.992	0.999	0.999	0.998
	1.0	1.0	8125	0.995	0.998	0.999	0.999
	1.0	1.0	9993	0.989	0.999	0.999	0.998



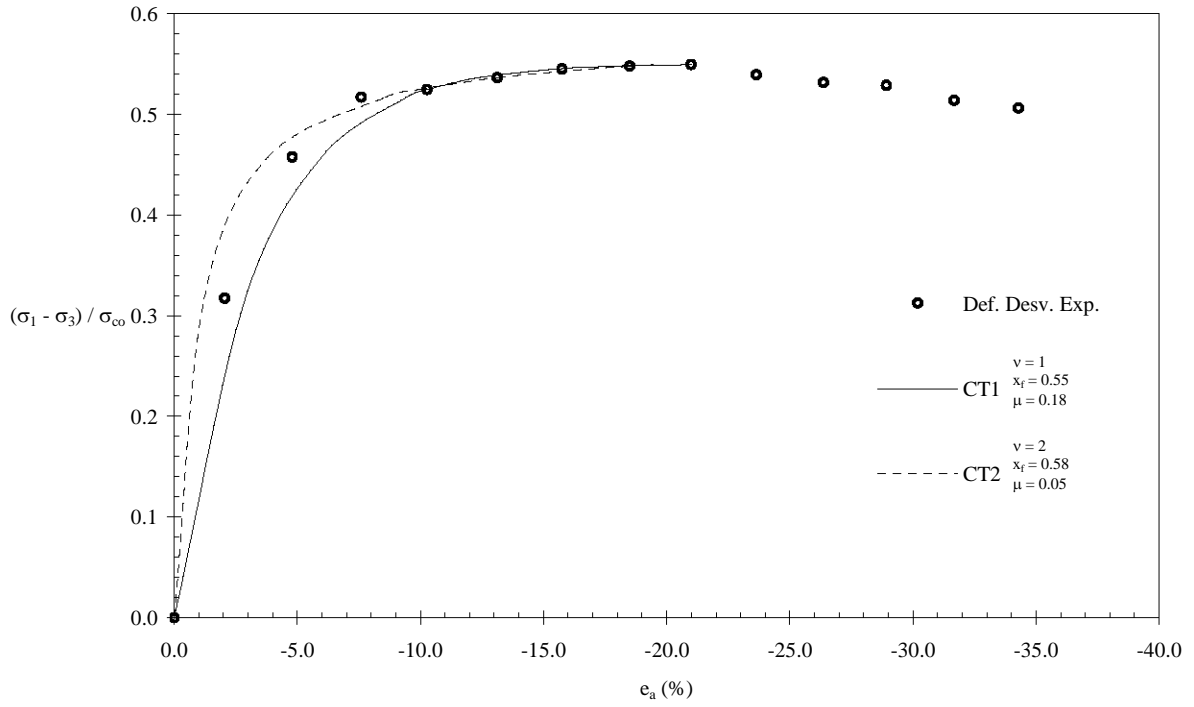


Fig. 3-154: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{c0} = 295$  kPa

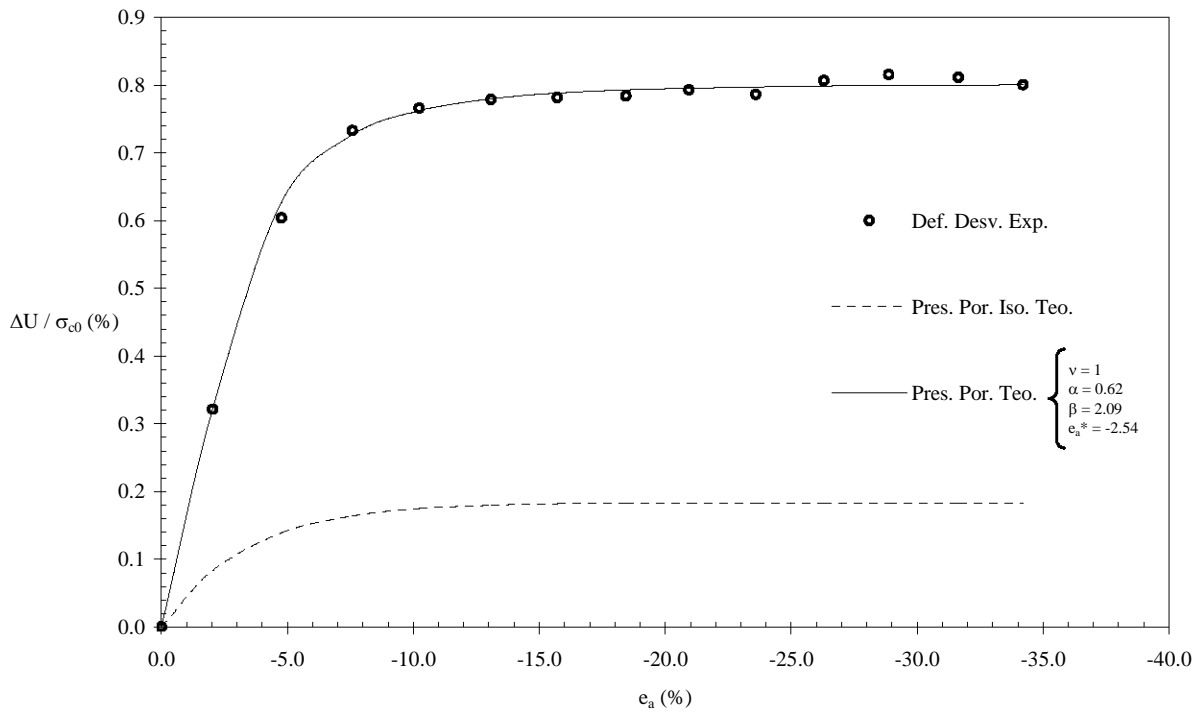


Fig. 3-155: Curva de presión de poro  $\sigma_{c0} = 295$  kPa

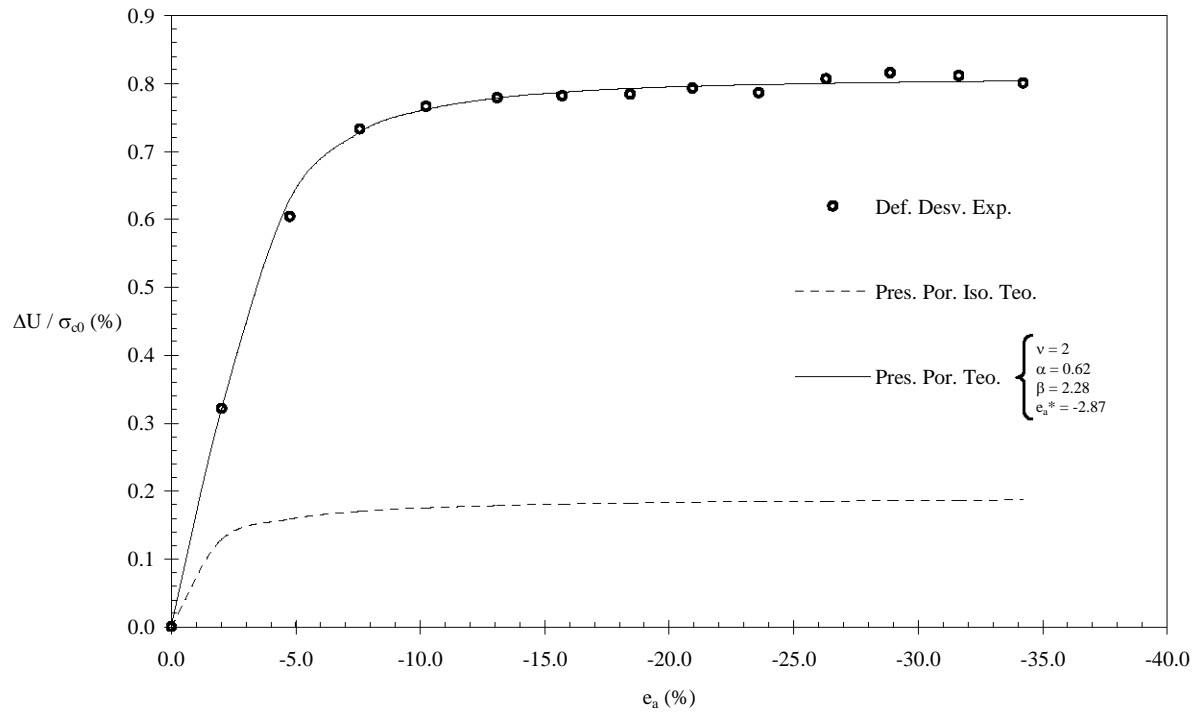


Fig. 3-156: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 295 \text{ kPa}$

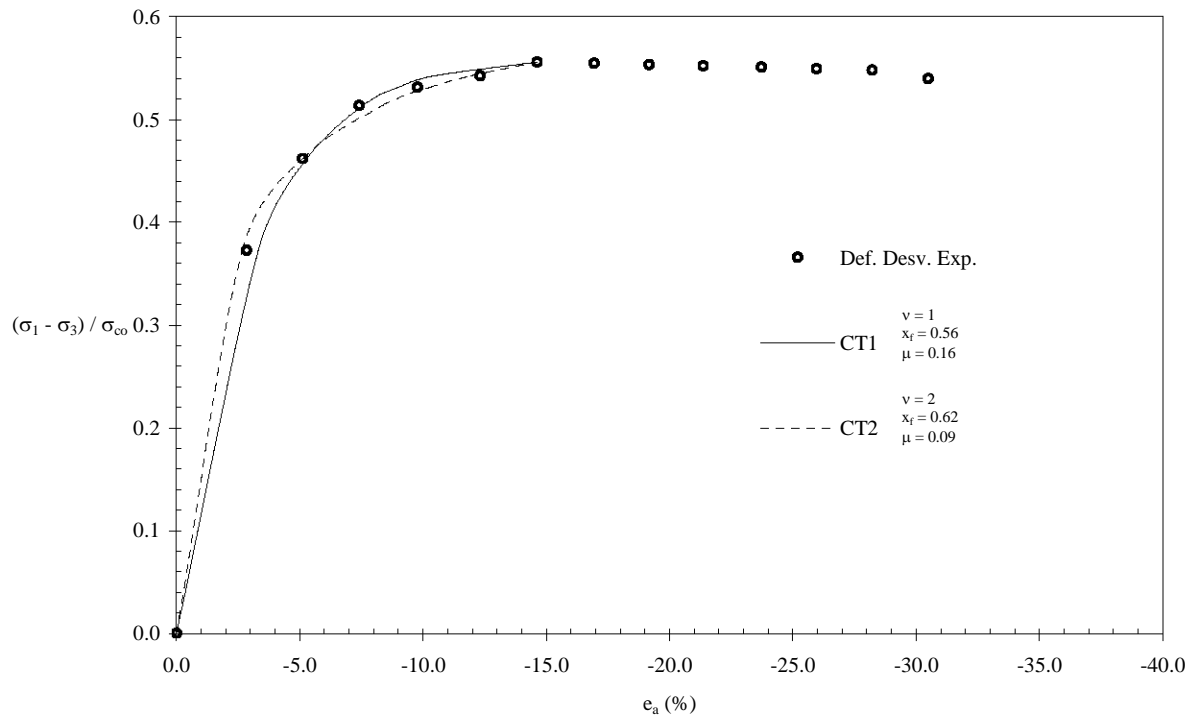


Fig. 3-157: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 402 \text{ kPa}$

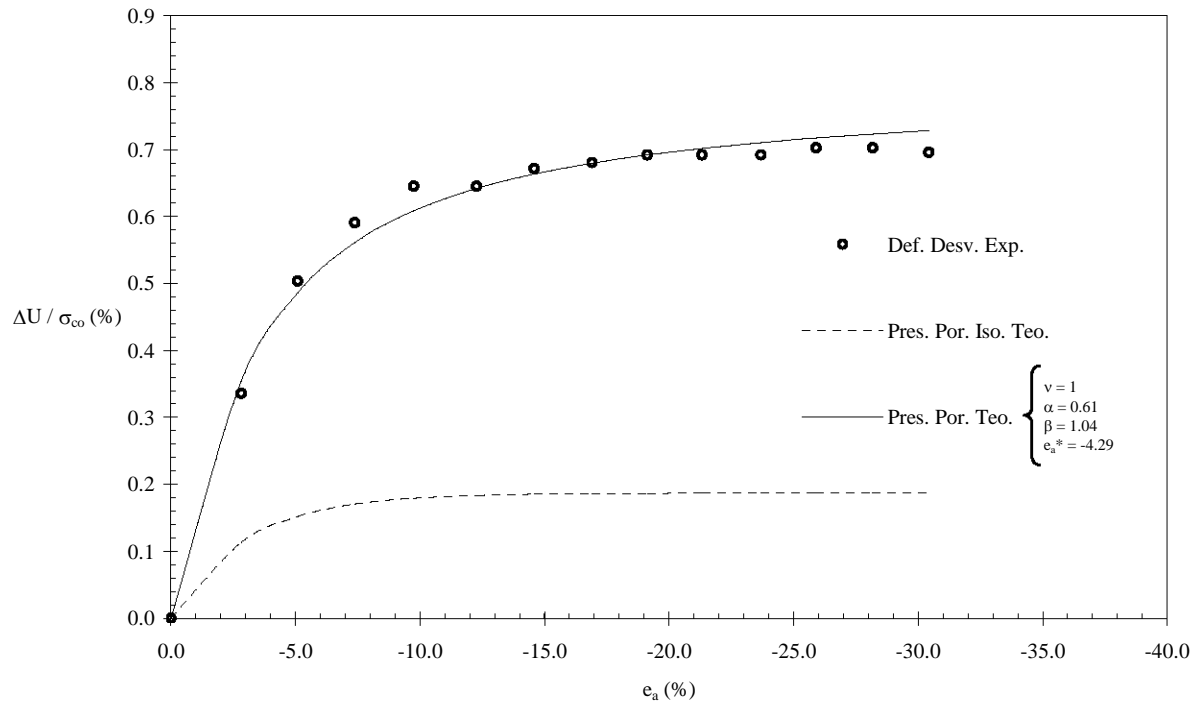


Fig. 3-158: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 402 \text{ kPa}$

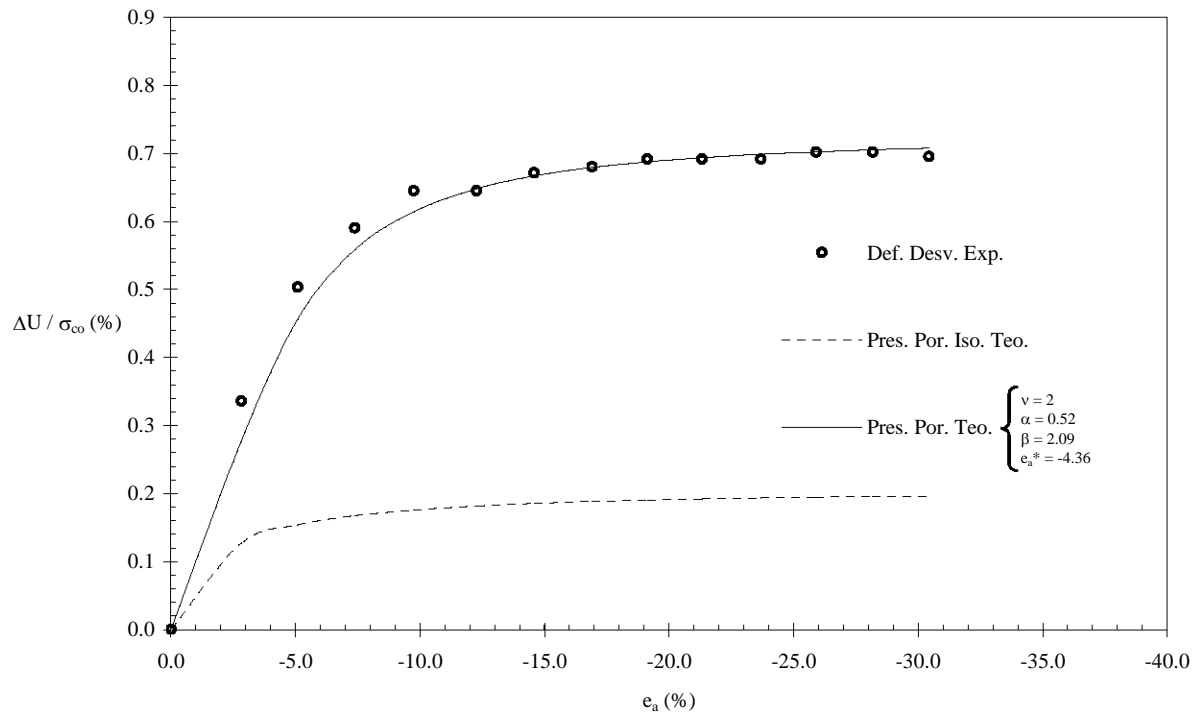
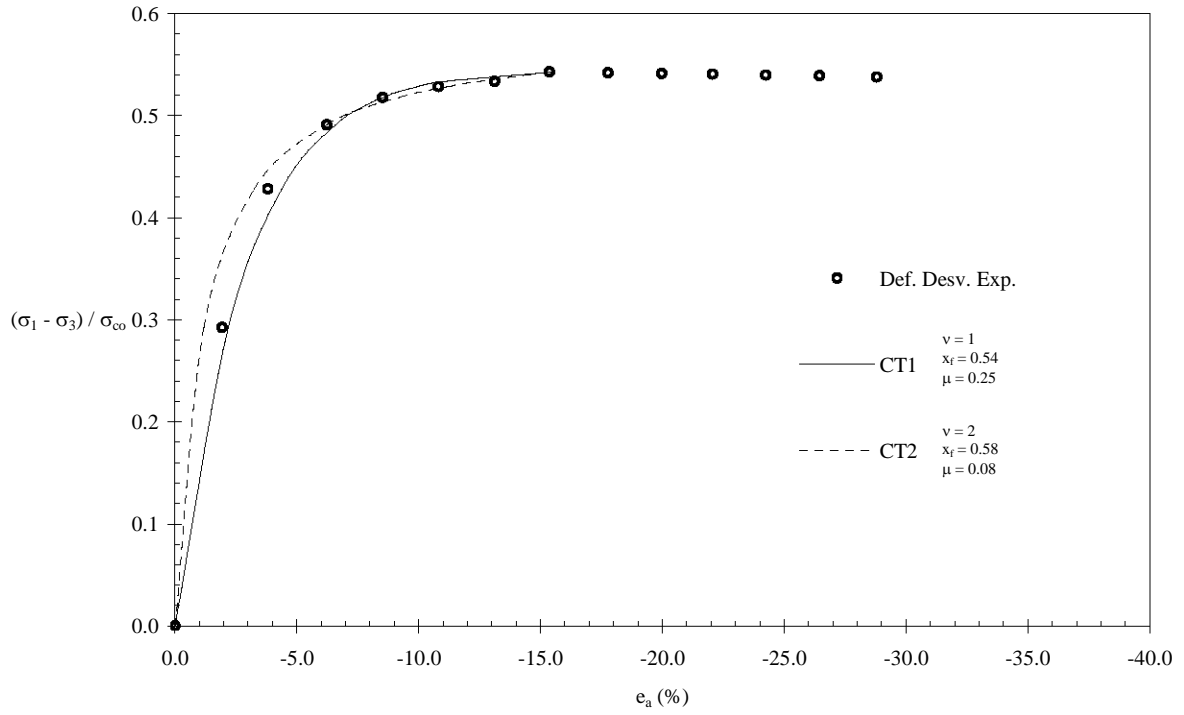
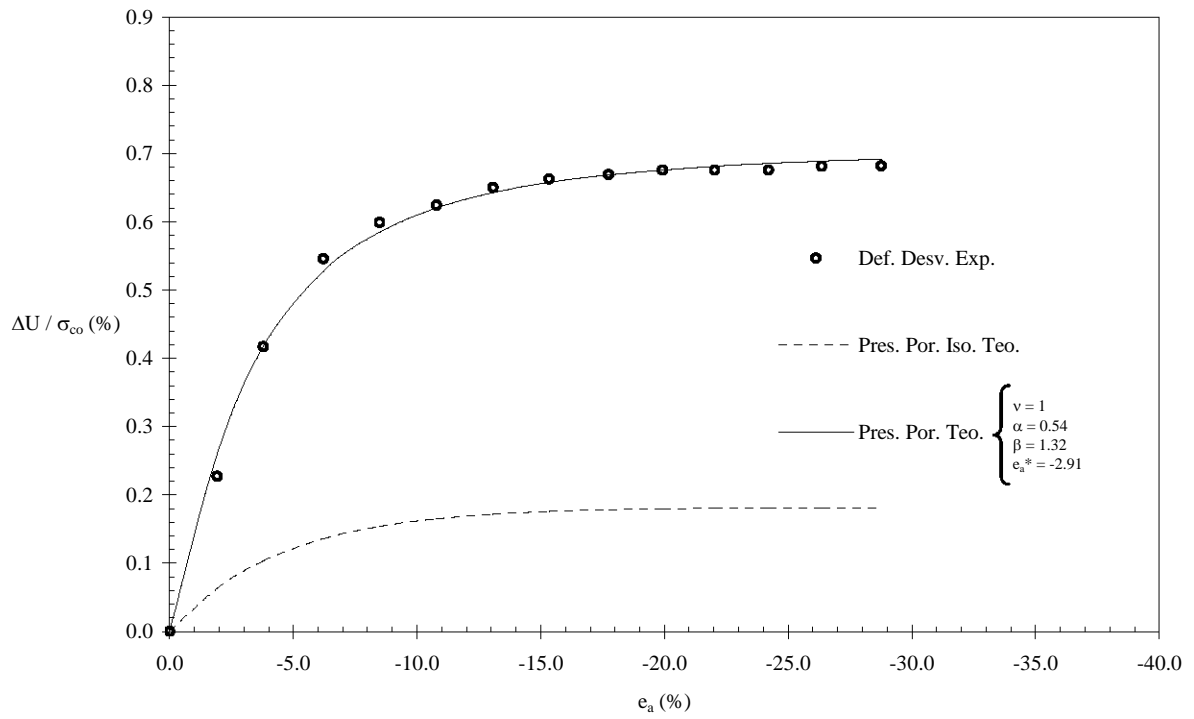


Fig. 3-159: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 402 \text{ kPa}$



**Fig. 3-160: Curva esfuerzo deformación  $\sigma_{co} = 645$  kPa**



**Fig. 3-161: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 645$  kPa**

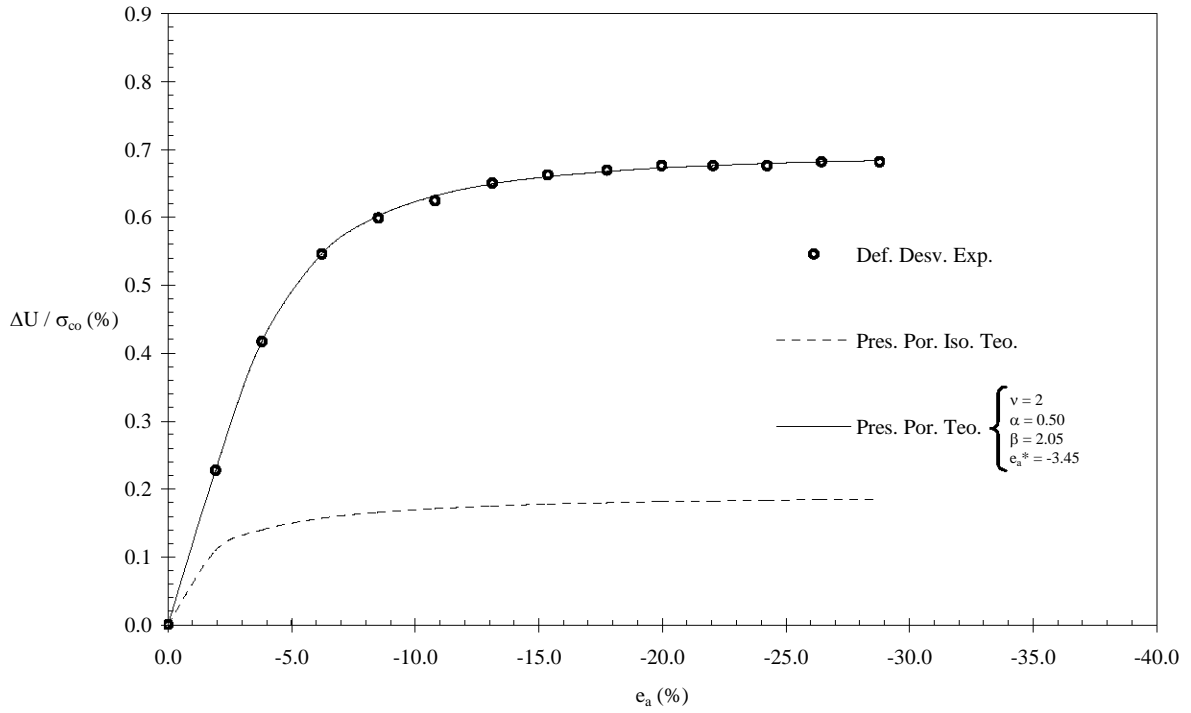


Fig. 3-162: Curva de presión de poro  $\sigma_{c0} = 645$  kPa

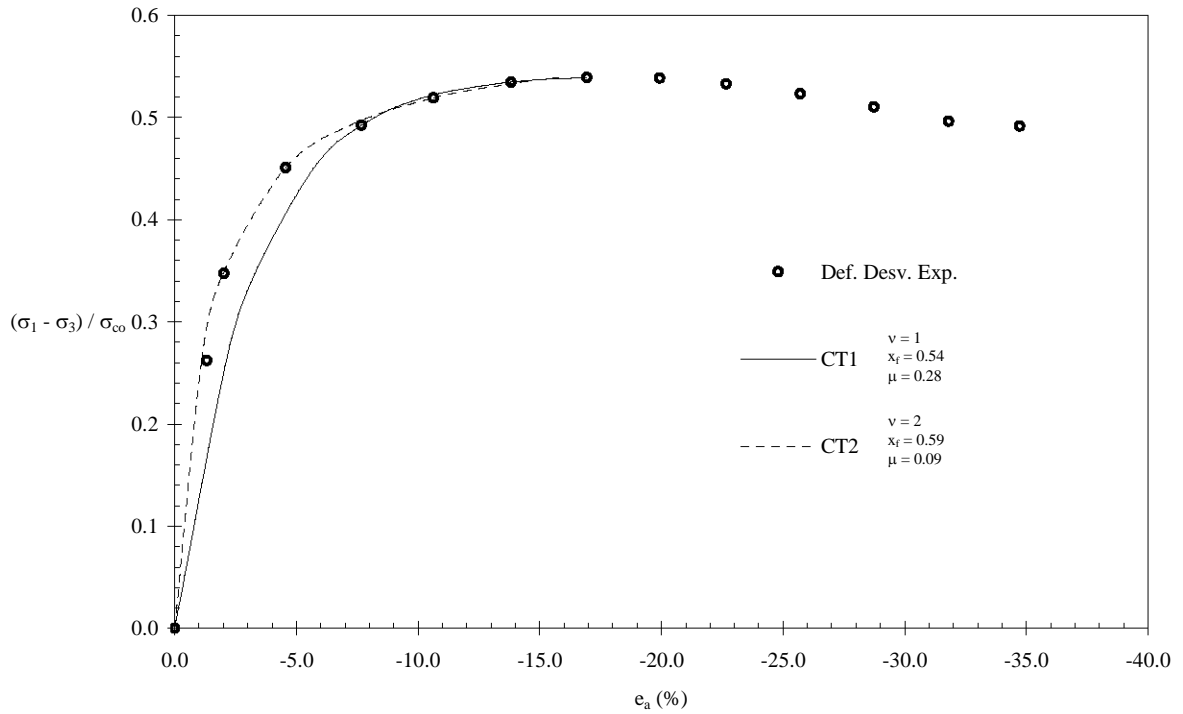
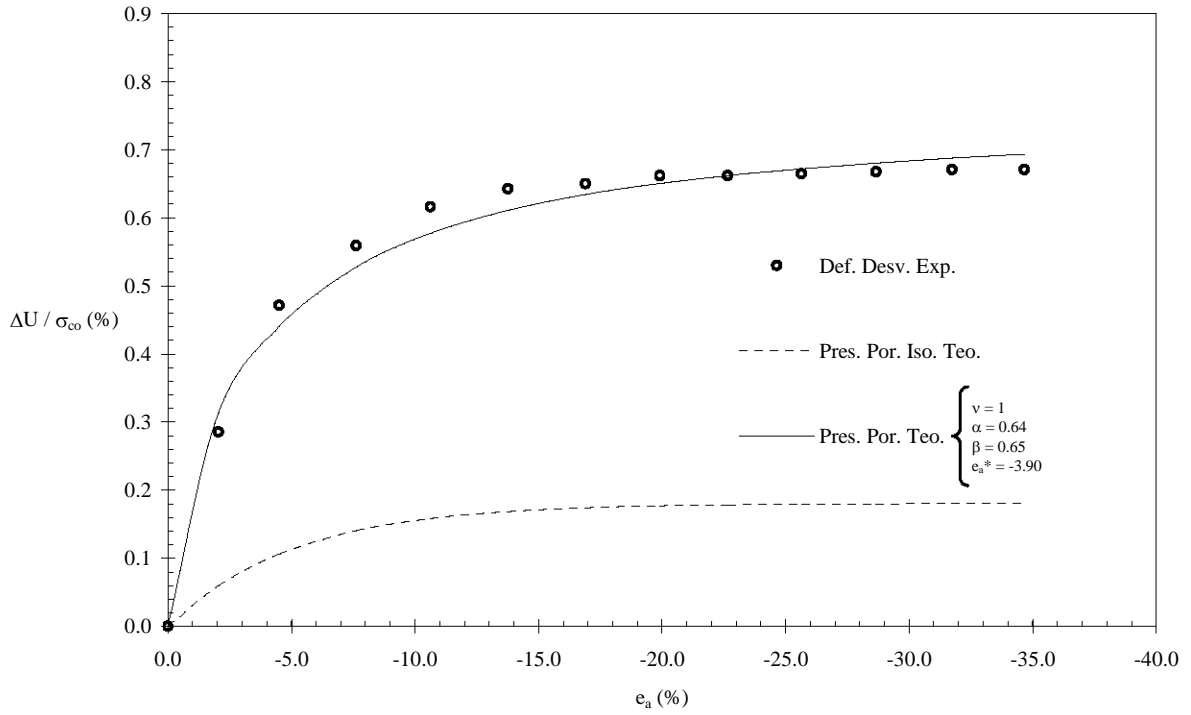
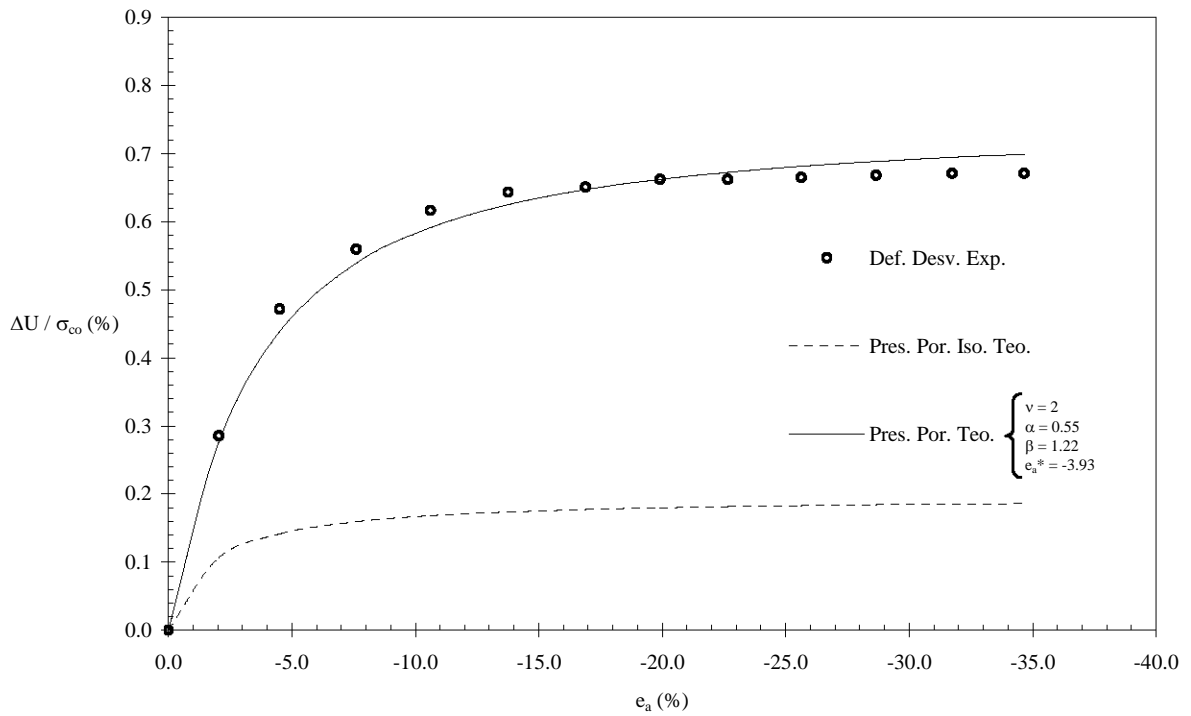


Fig. 3-163: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{c0} = 800$  kPa



**Fig. 3-164: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 800 \text{ kPa}$**



**Fig. 3-165: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 800 \text{ kPa}$**

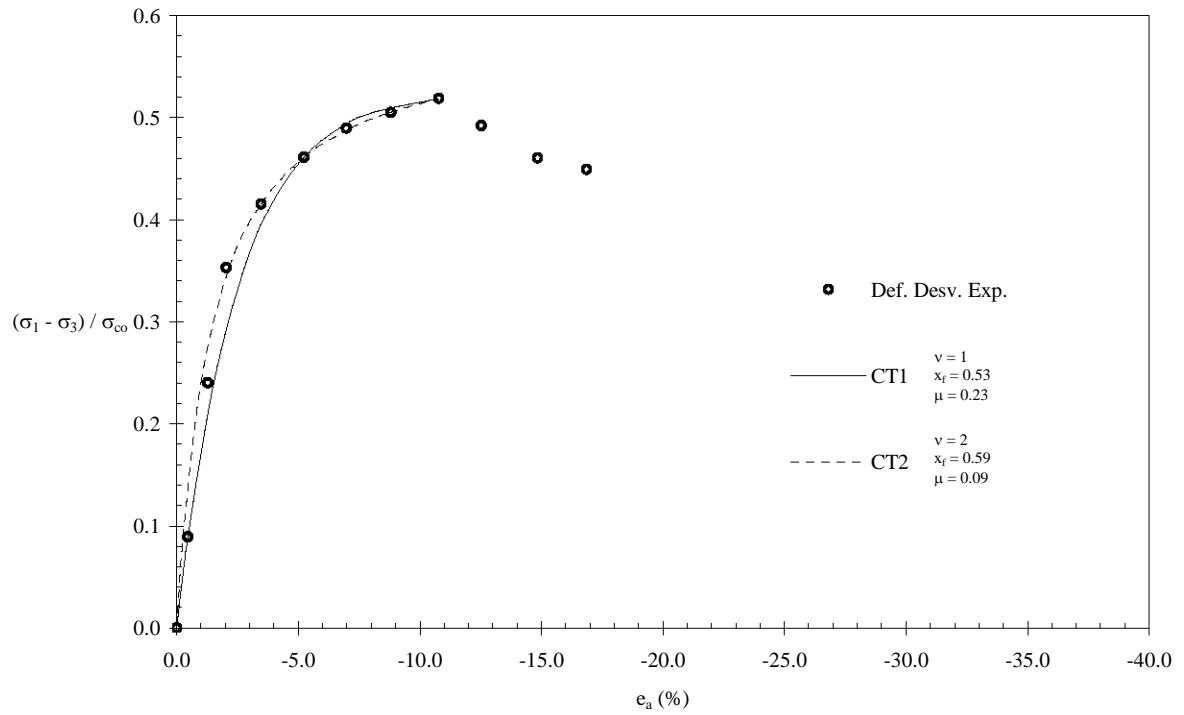


Fig. 3-166: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 1992$  kPa

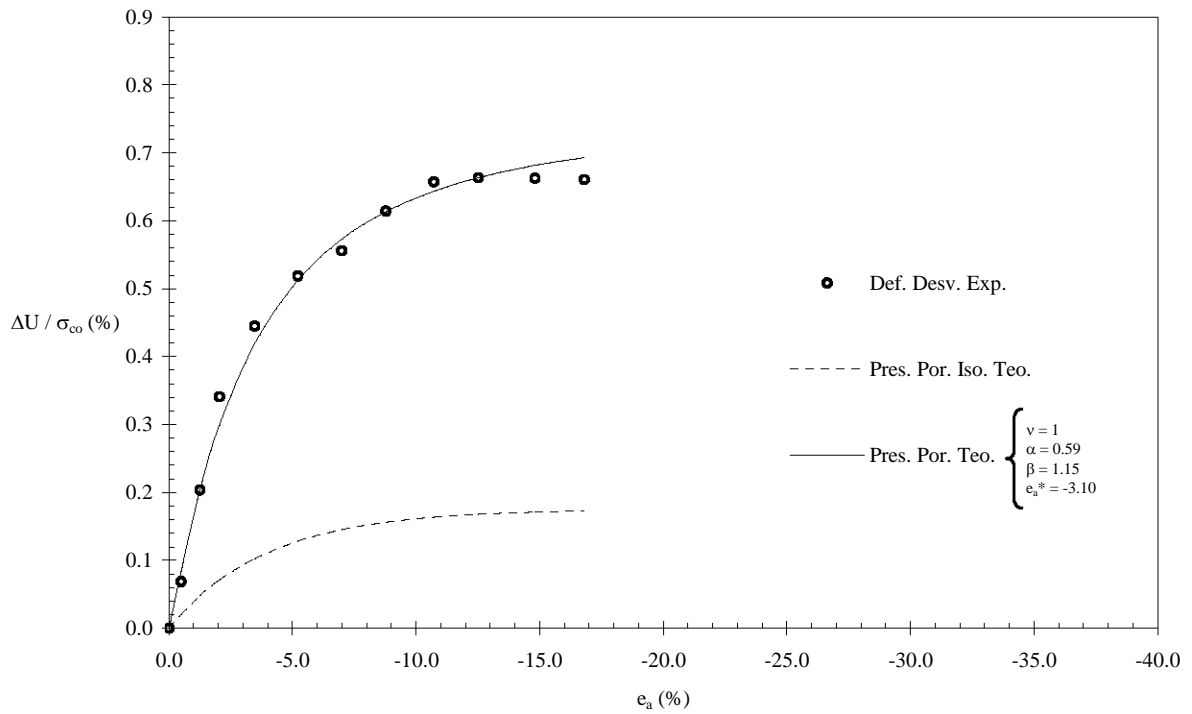


Fig. 3-167: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 1992$  kPa

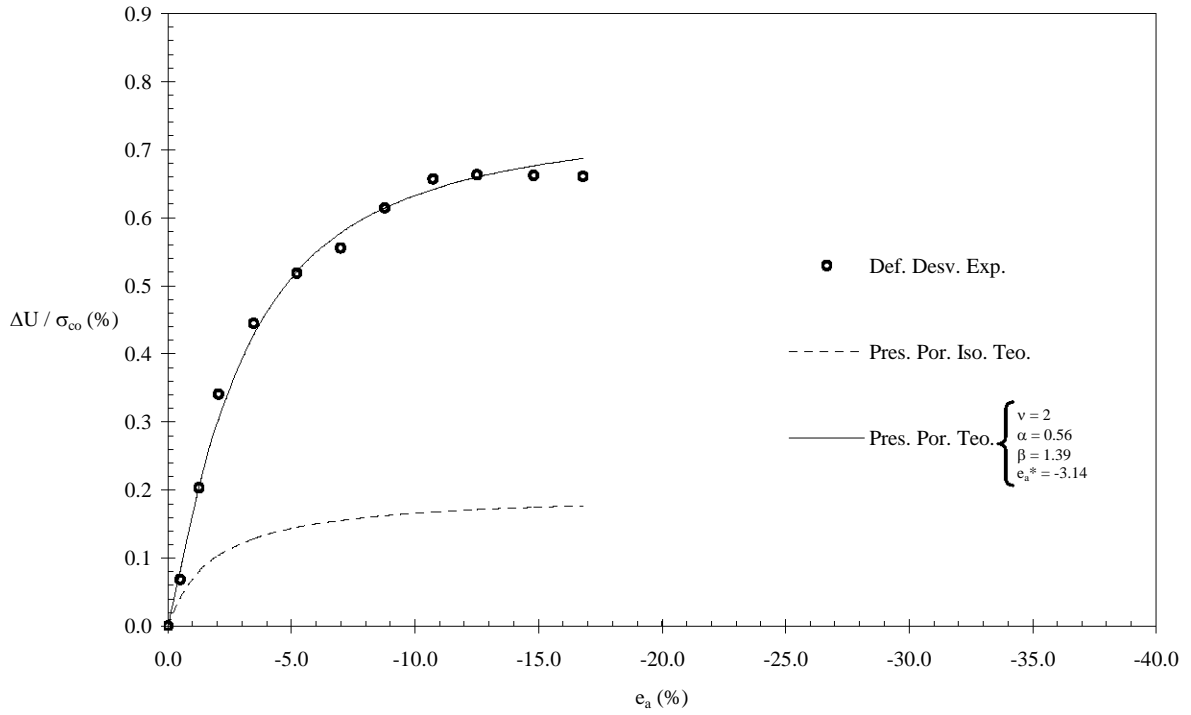


Fig. 3-168: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 1992 \text{ kPa}$

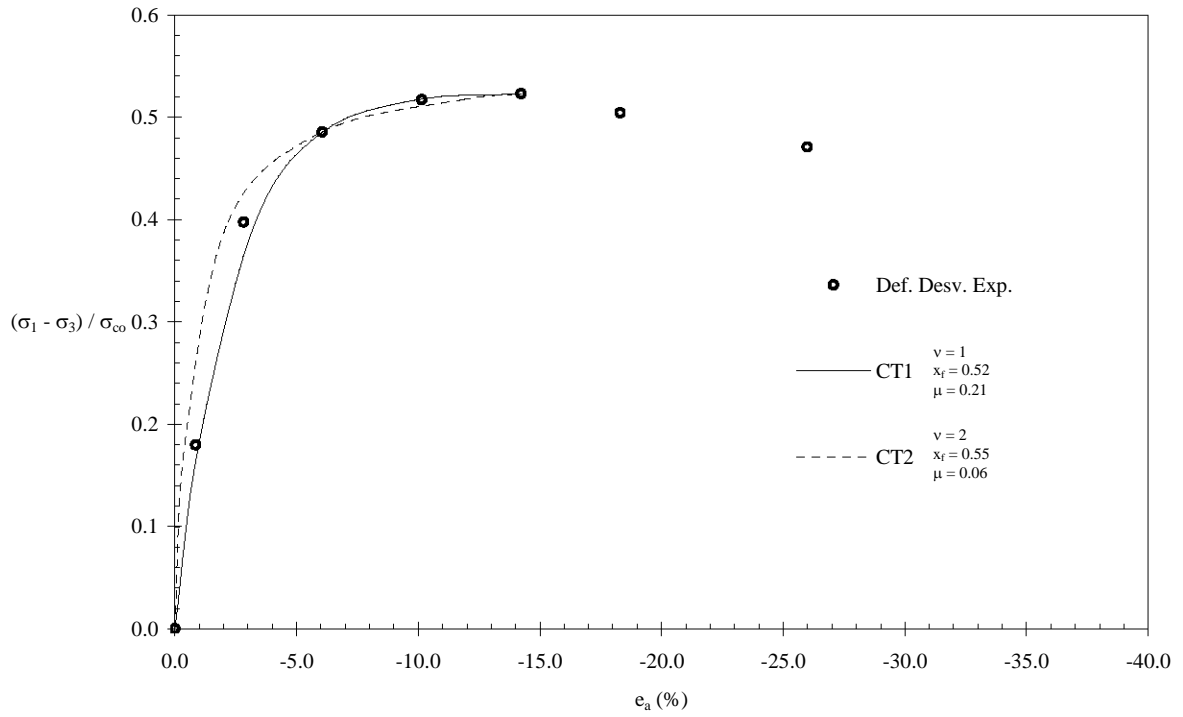


Fig. 3-169: Curva esfuerzo - deformación  $\sigma_{co} = 3240 \text{ kPa}$



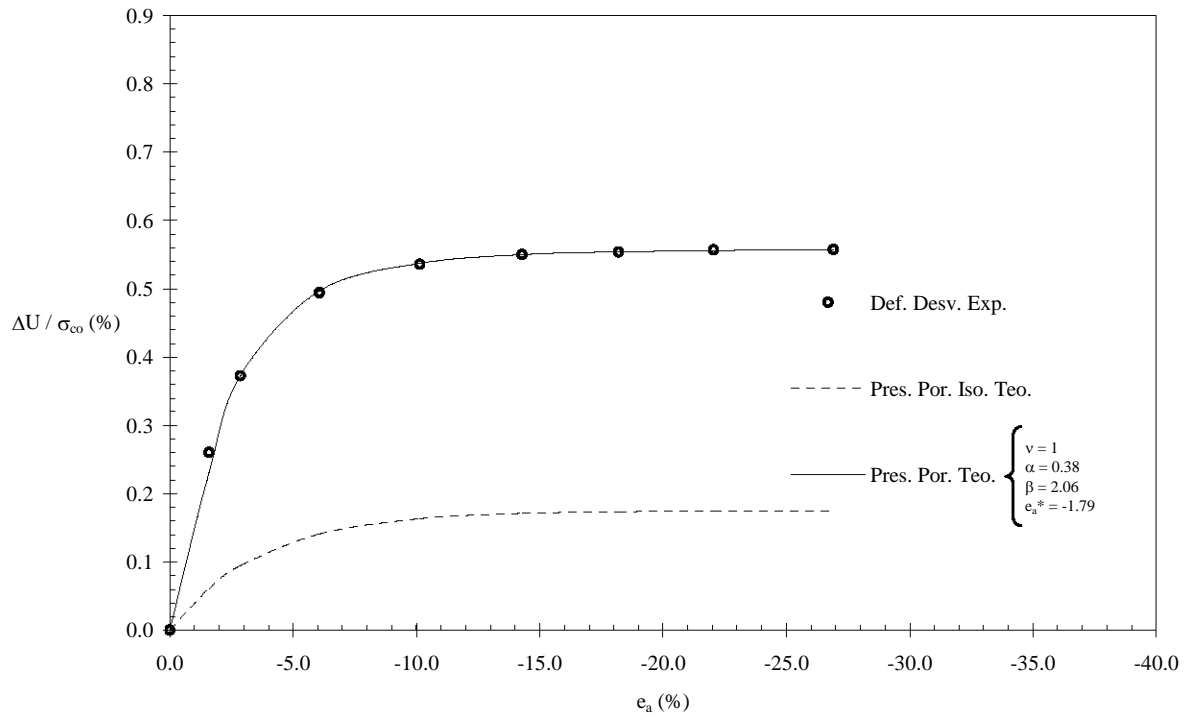


Fig. 3-170: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 3240$  kPa

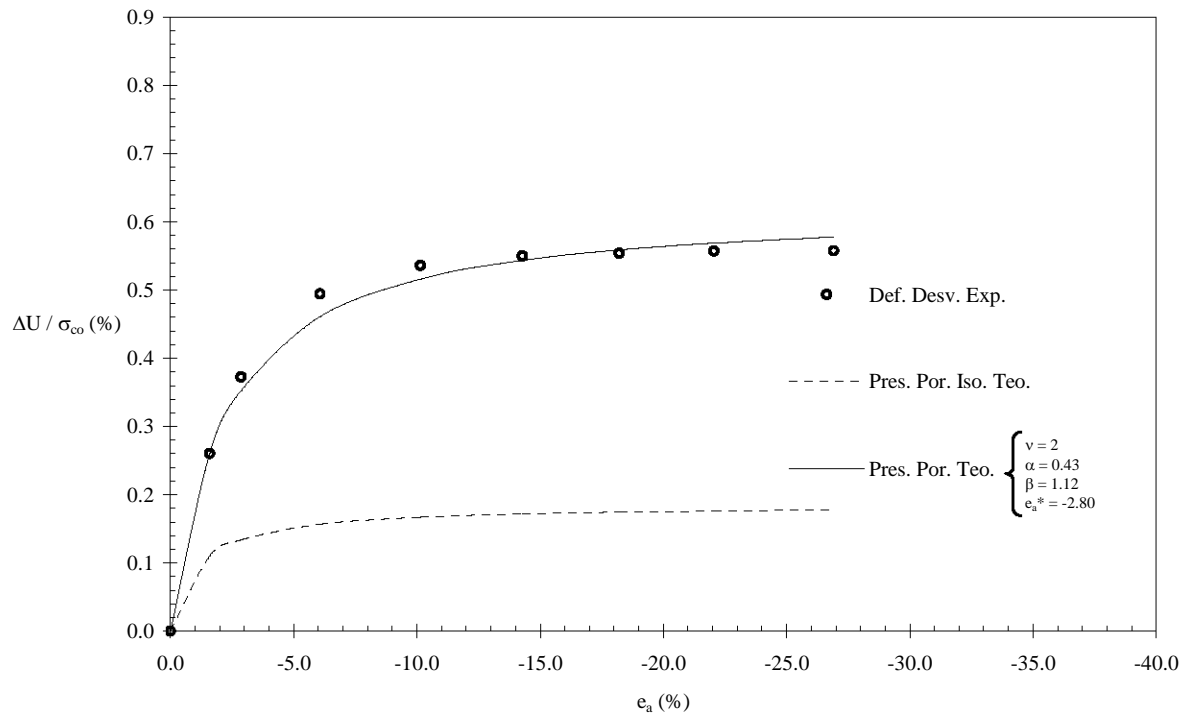


Fig. 3-171: Curva de presión de poro  $\sigma_{co} = 3240$  kPa

## 4 RESULTADOS.

### 4.1 Variación de los parámetros del PPN respecto al OCF pruebas CD.

El objetivo perseguido con el ajuste de las pruebas CD en la arcilla de Weald, además de reajustar estas curvas con las ecuaciones mejoradas derivadas del Principio de Proporcionalidad Natural (PPN), es el tratar de encontrar una ley de variación de los parámetros  $\mu$ ,  $x_f$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $e_a^*$ , respecto al factor de preconsolidación (*OCF*) en diferentes tipos de pruebas y como se puede observar en algunas de las pruebas, podemos suponer que se presentaron algunos problemas en su ejecución, al presentarse resistencias menores a las que se esperarían, lo cual afecta los valores tomados por los parámetros que ya mencionamos.

Otro punto que se puede observar en el comportamiento de las pruebas presentadas en la arcilla de Weald, es el hecho de que no presentan una falla de pico, y que fueron plenamente descritas por la ecuación pre – pico de sensibilidad normal ( $y_N$ ).

Para tratar de encontrar estas leyes, se idealizó un comportamiento lineal en primera instancia, para determinar si los parámetros crecían, o decrecían respecto al *OCF* y luego se usaron los valores sobre esta línea, en las ecuaciones respectivas, para determinar su impacto en las curvas de ajuste.

En el caso de los parámetros  $\mu$ ,  $x_f$ , cualquier pequeña variación de estos modifica de manera importante los ajustes, por lo cual solo podemos decir que en las pruebas *AI* y *RI* estos parámetros disminuyen al aumentar el factor de preconsolidación y en el caso de las pruebas *AD*, *RD*, *CJC* y *EJC*, no podemos definir el comportamiento o la tendencia que estos valores presentan.

Para los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $e_a^*$ , se siguió el mismo procedimiento, pero en este caso, se tomo en primera instancia al parámetro  $\beta$  para idealizar un comportamiento lineal que pasara por los valores encontrados, debido a que esta variable presentar un comportamiento más estable. Posteriormente se reajustaron los otros dos parámetros, luego se realizó el procedimiento anterior con el parámetro  $\alpha$ , se realizó nuevamente el ajuste de las curvas variando solo el valor de la deformación característica ( $e_a^*$ ), nuevamente se trazo una línea recta por los valores encontrados y se tomaron los valores sobre dicha línea y se ajustaron nuevamente las curvas, encontrándose que en la mayoría de los ajustes no se perdió gran aproximación.

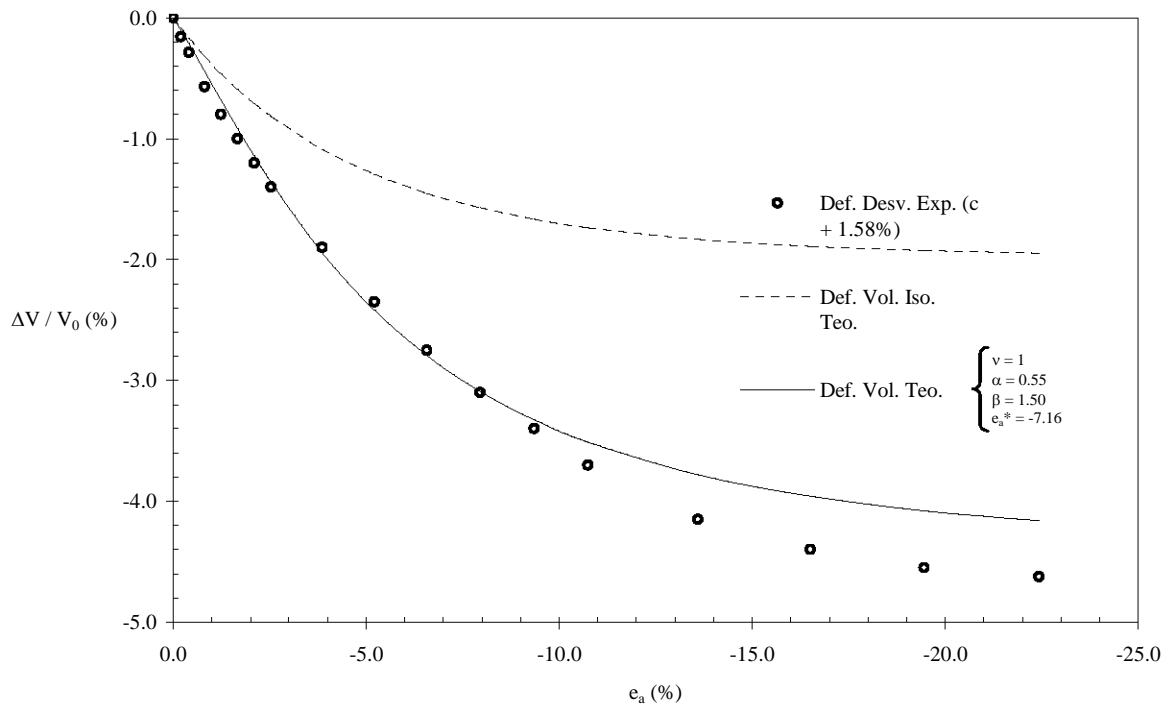
En las figuras 4-1 a 4-67 se muestran las curvas de deformación volumétrica normalizada vs. ( $e_a$ ), con los ajustes finales de acuerdo al procedimiento antes mencionado y en las tablas 4-1 a 4-3 los valores usados para dichos ajustes y de forma grafica en las figuras 4-68 a 4-70.

Como podemos apreciar en la figura 4-35, los valores del parámetro  $\beta$  disminuyen respecto al *OCF*, para las pruebas de esfuerzo *AI*, *RI* y *EJC* y aumenta para las pruebas *AD*, *RD* y *CJC*, además de esto, el comportamiento sugiere que las líneas usadas como primera

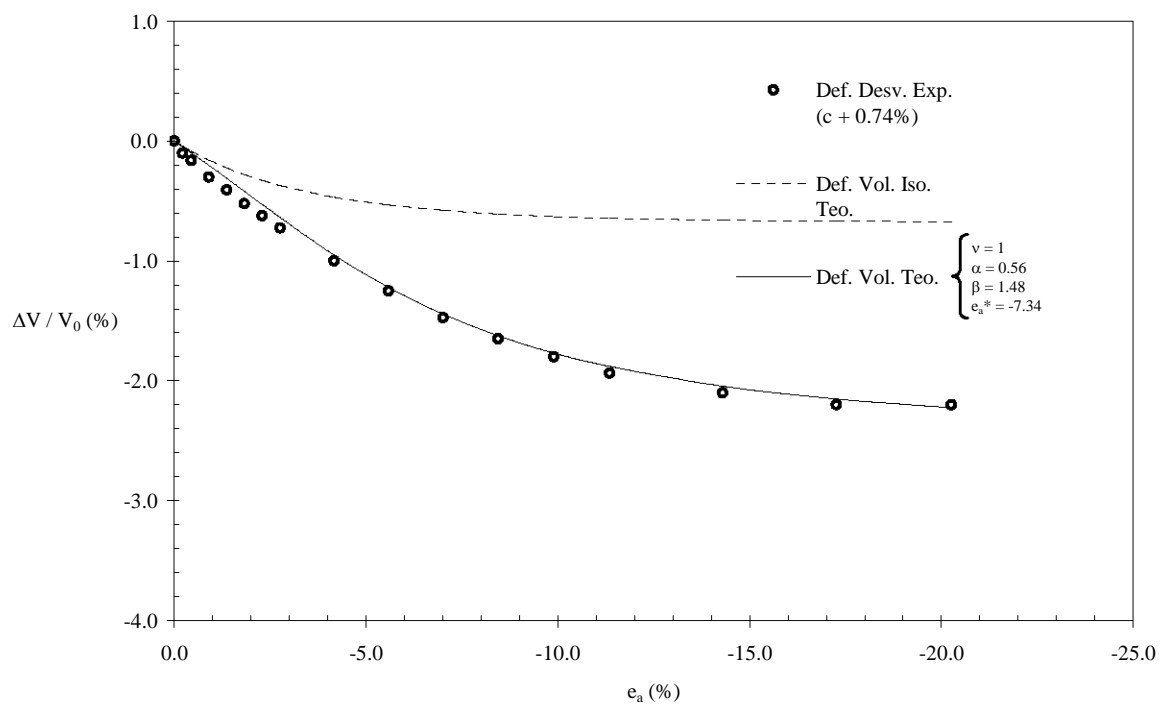
aproximación del comportamiento, debiesen ser paralelas en el caso de los comportamientos del mismo tipo (crecientes o decrecientes) e inversas por ejemplo para las pruebas en las que se aumenta o disminuye el esfuerzo axial o el radial, y en el caso particular de las líneas con pendientes iguales pero de signo contrario.

Para la figura 4-36, donde se muestra la variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $OCF$ , todos los tipos de pruebas presentaron crecimientos, a excepción de las  $RI$  y las  $CJC$ , las cuales se mantuvieron casi constantes en las primeras y disminuyeron en las segundas, sin embargo, dado que este parámetro nos da una idea del grado de perturbación que sufre el suelo, sería de esperarse que este creciera al incrementarse el factor de preconsolidación.

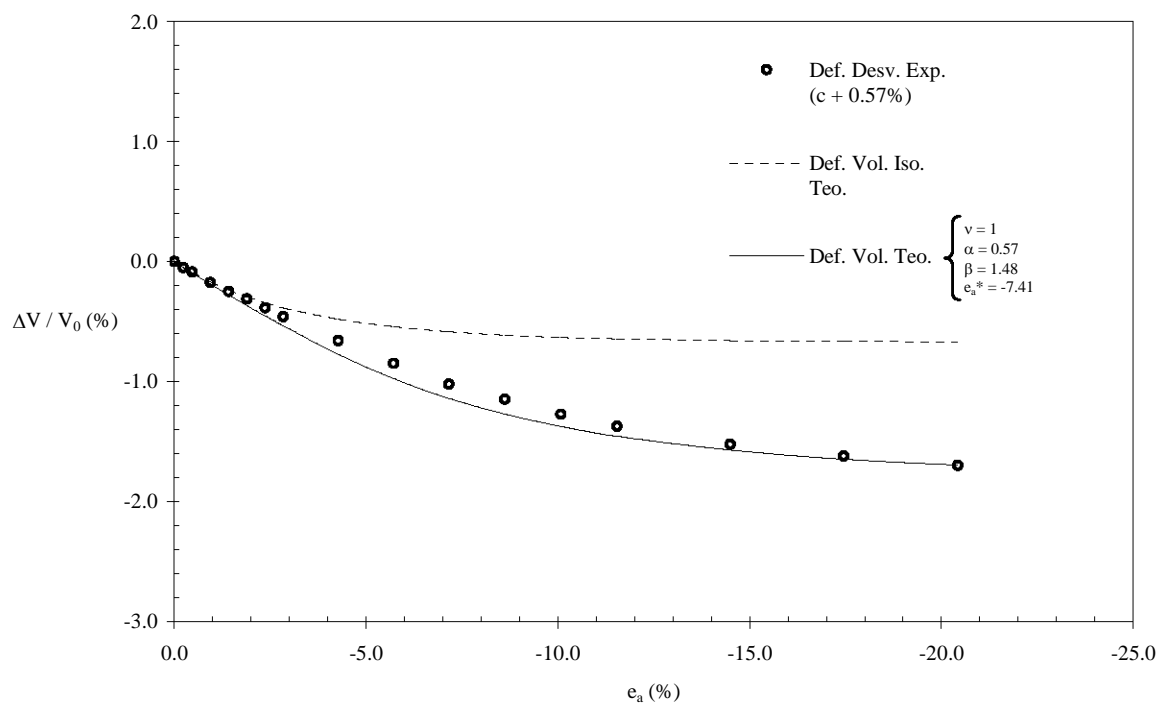
El comportamiento que se puede apreciar en la figura 4-37 y 4-38, es el sufrido por el parámetro de la deformación característica, la cual solo parece modificarse de manera importante en las pruebas  $AI$  y  $RI$ , donde parece aumentar para el primer tipo de prueba y disminuir para el segundo.



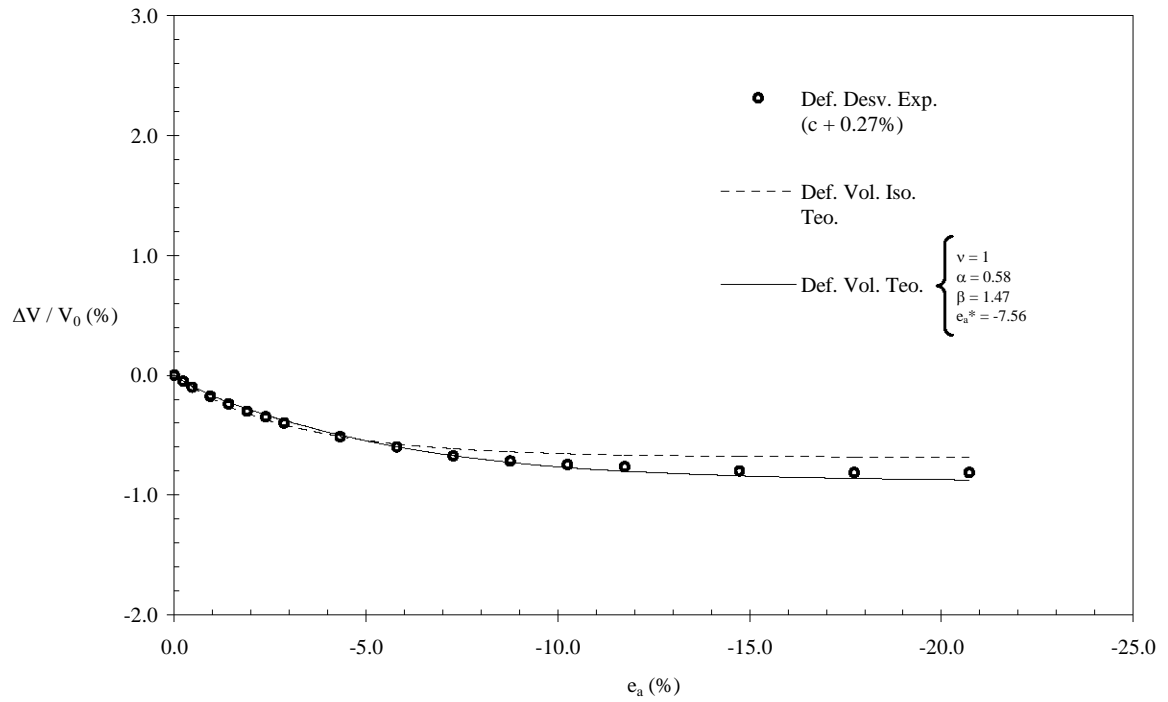
**Fig. 4-1: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 1**



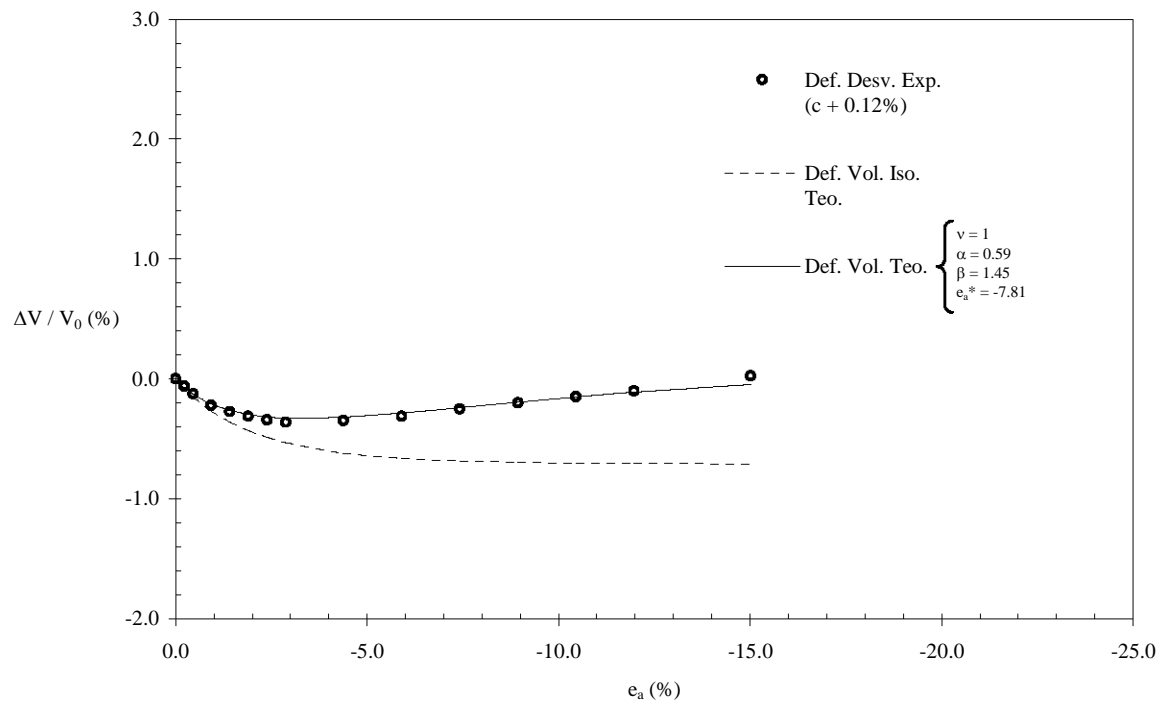
**Fig. 4-2: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 1.7**



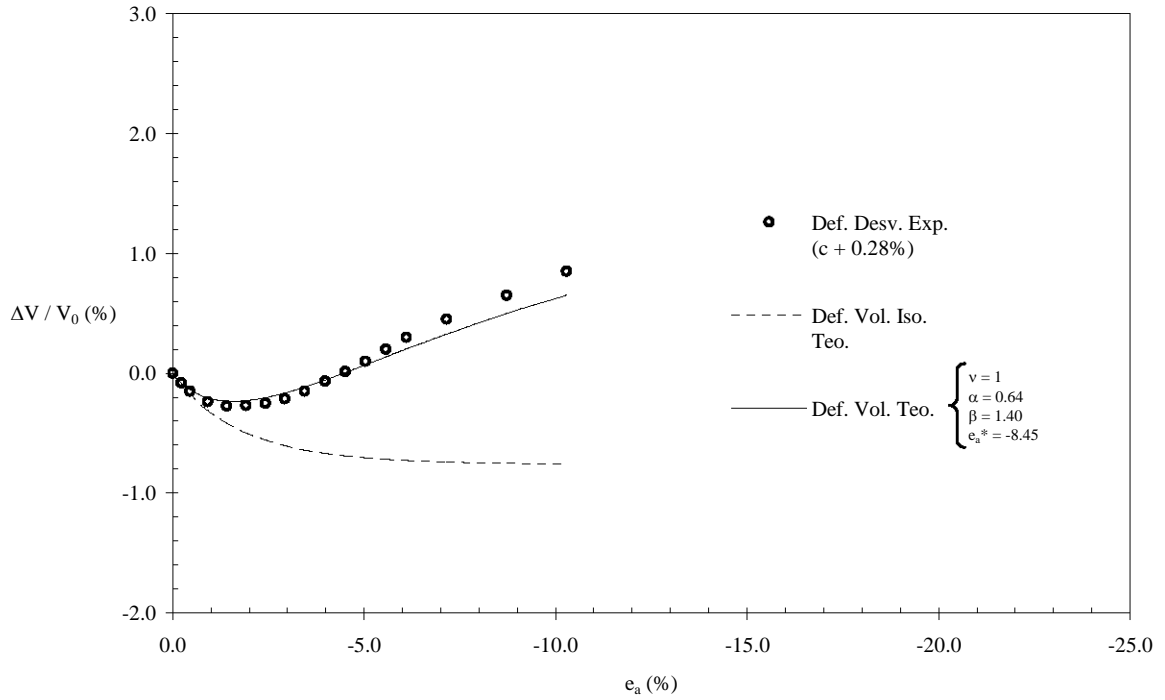
**Fig. 4-3: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 2.0**



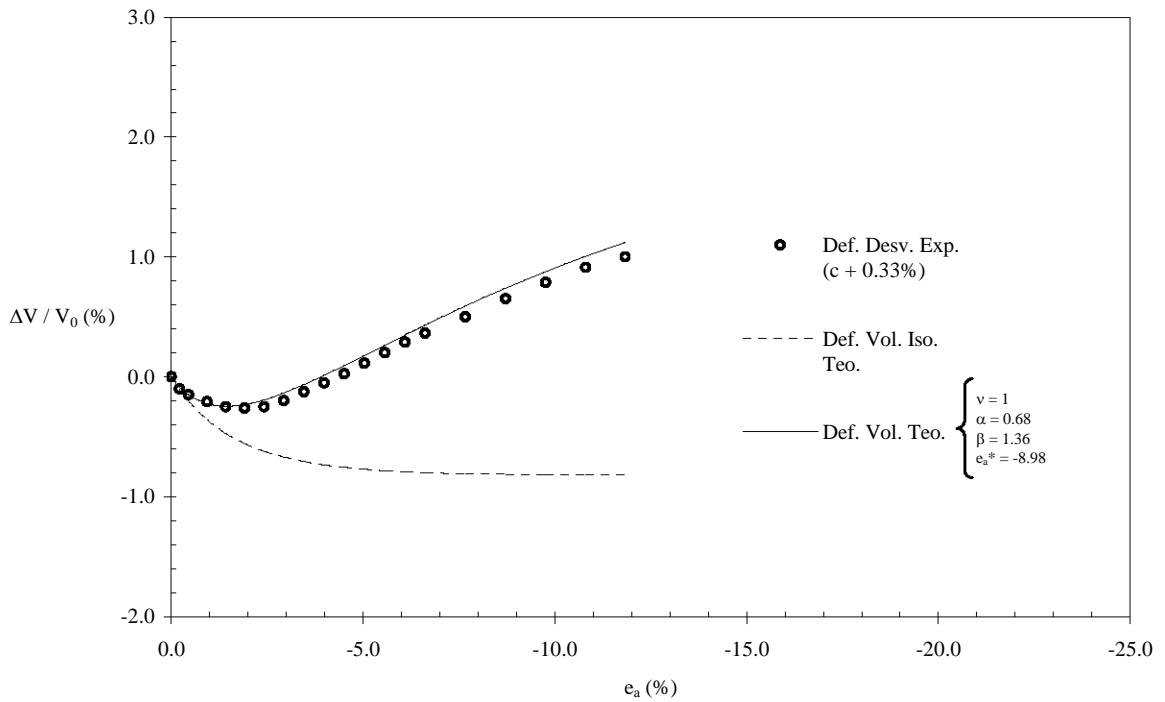
**Fig. 4-4: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 2.7**



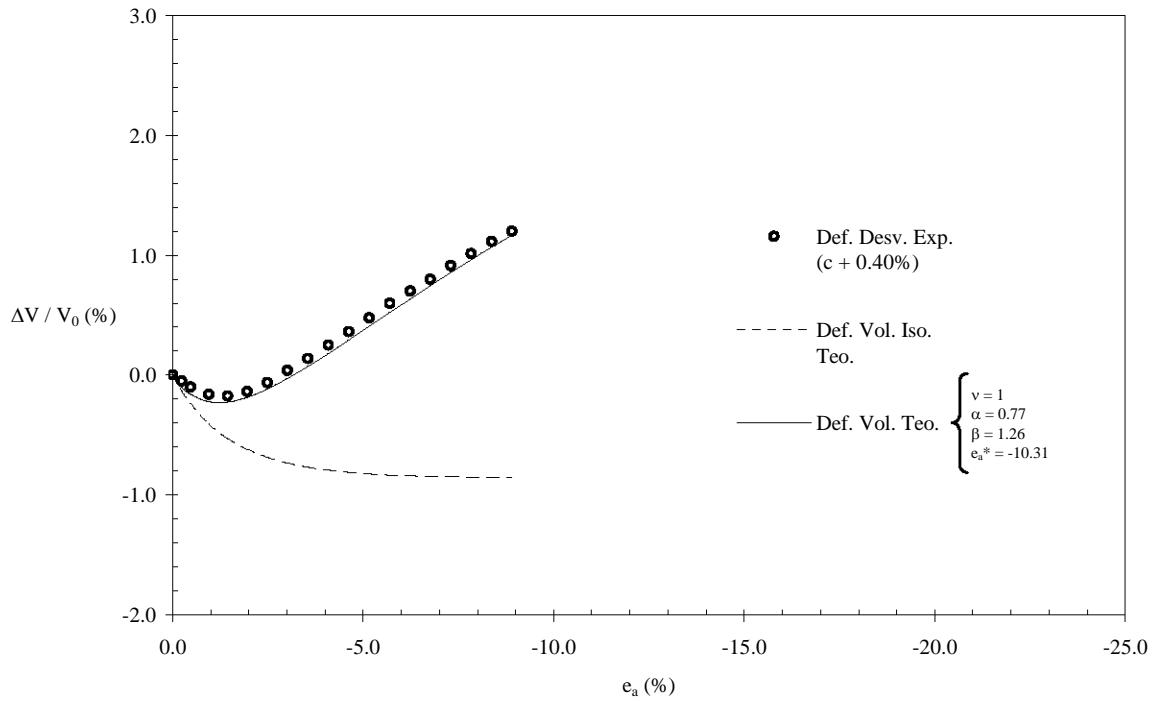
**Fig. 4-5: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 4.0**



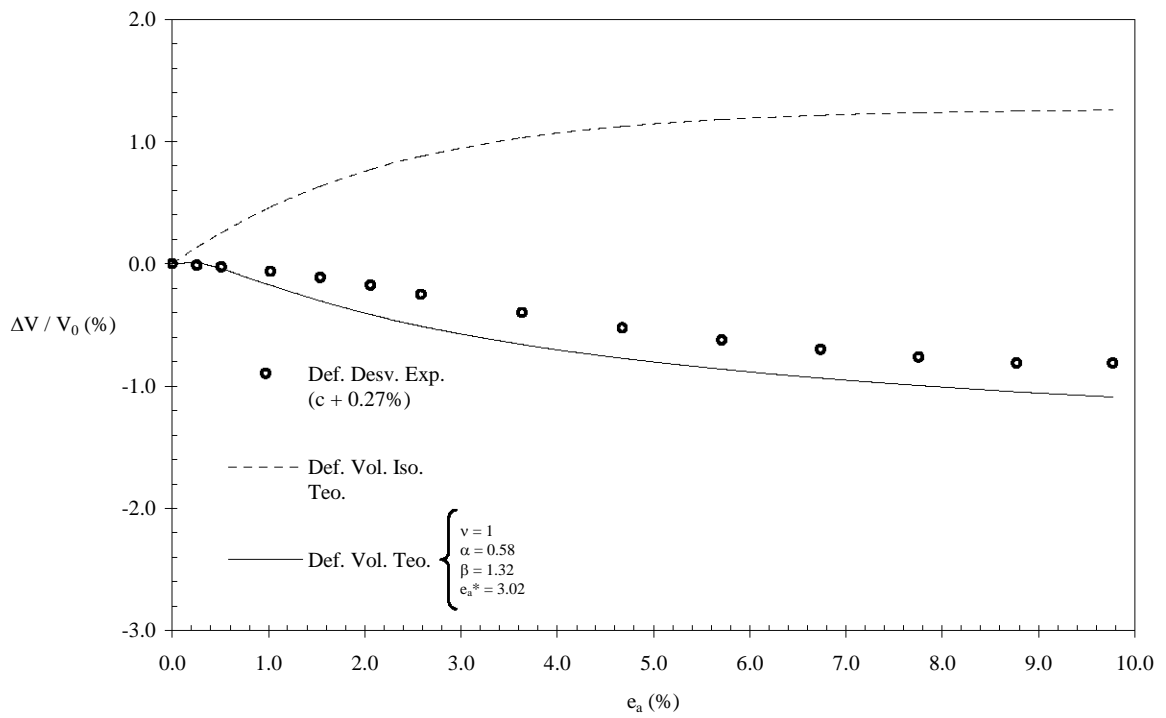
**Fig. 4-6: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 8.0**



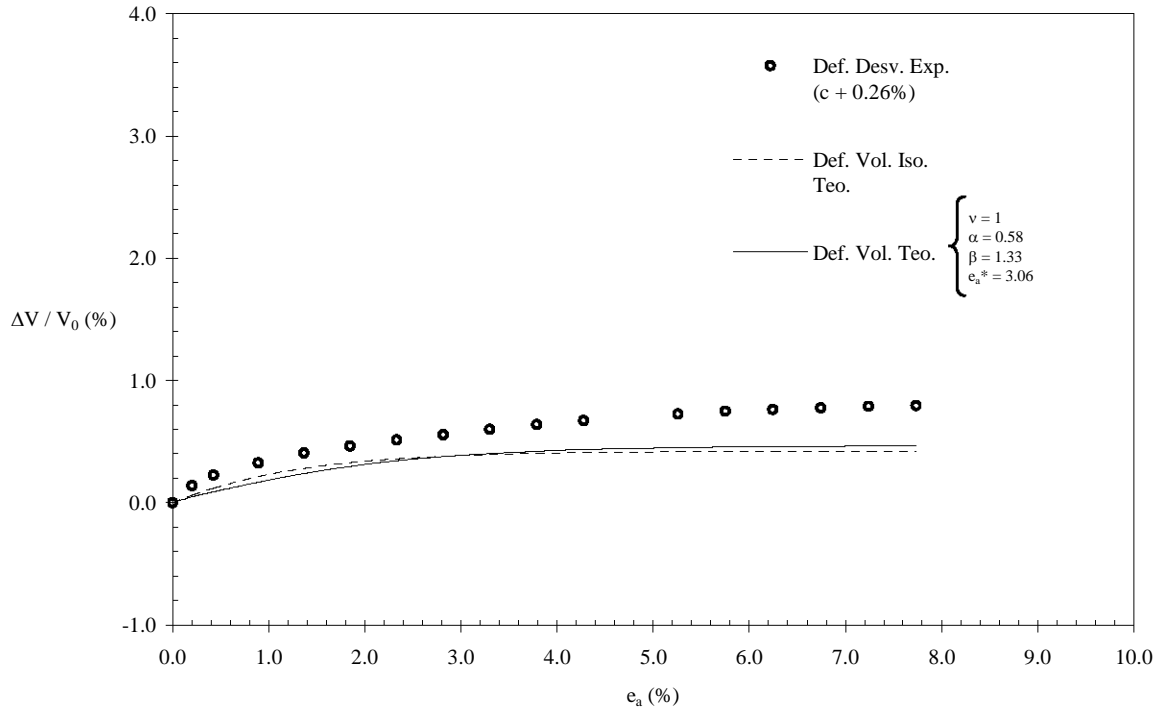
**Fig. 4-7: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 12.0**



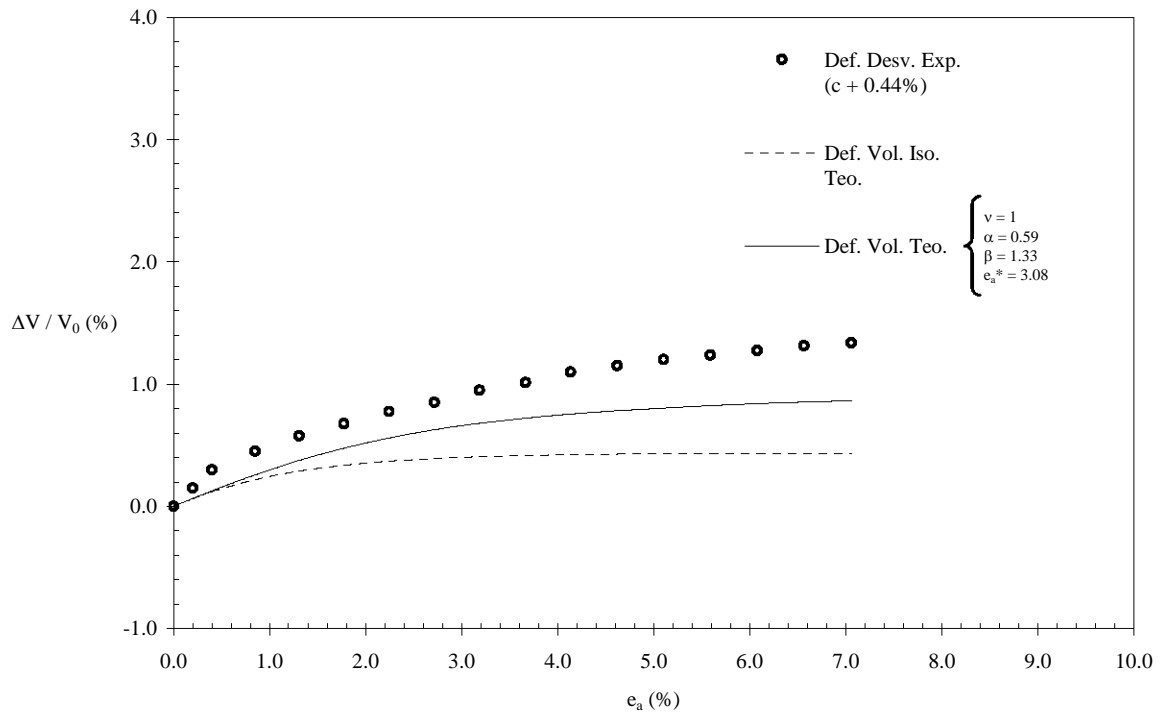
**Fig. 4-8: Curva de cambio volumétrico (AI) OCR = 24.0**



**Fig. 4-9: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 1**

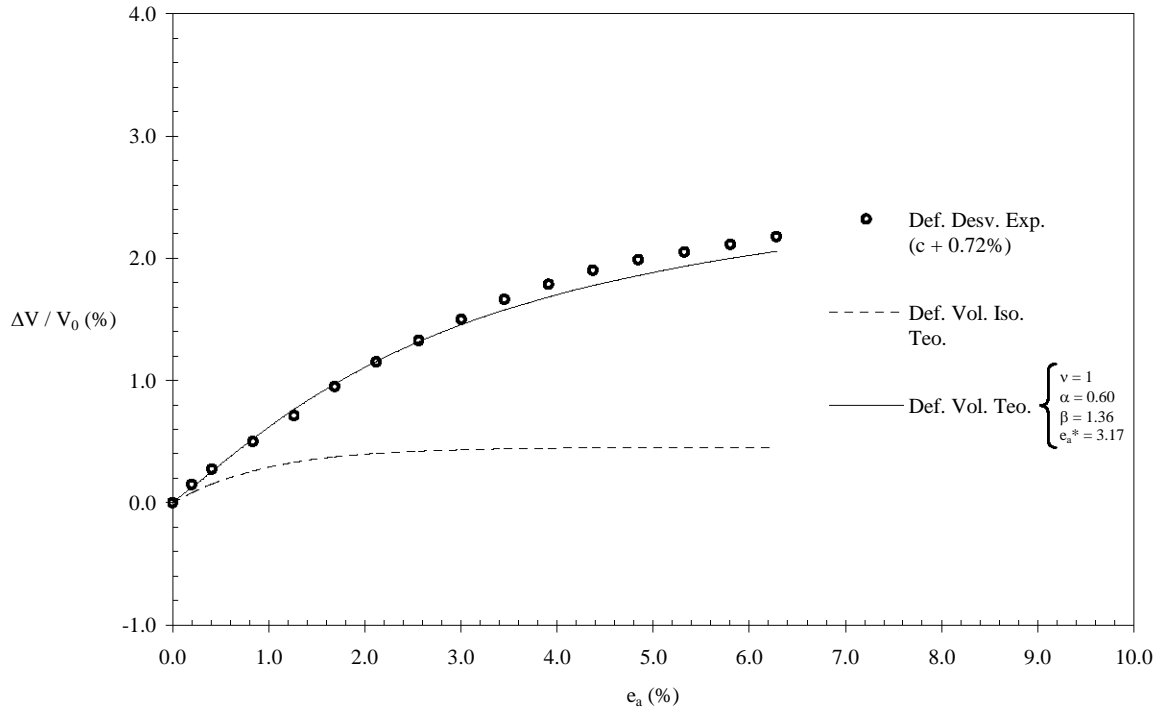


**Fig. 4-10: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 1.7**

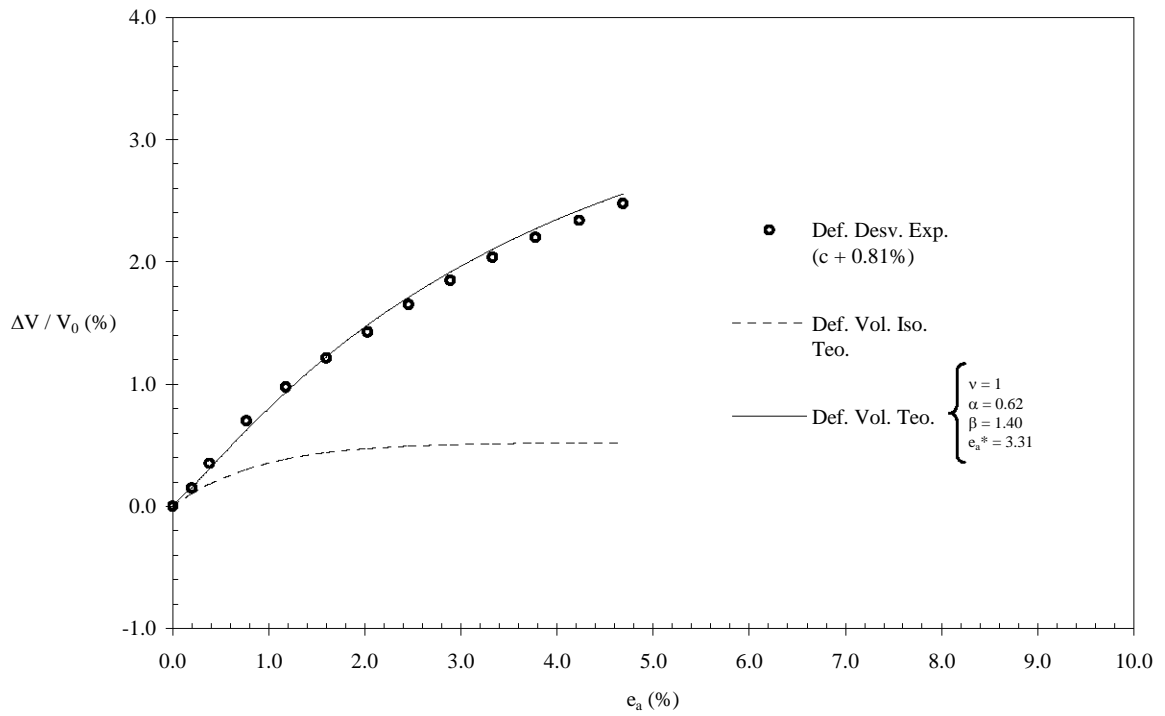


**Fig. 4-11: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 2.0**

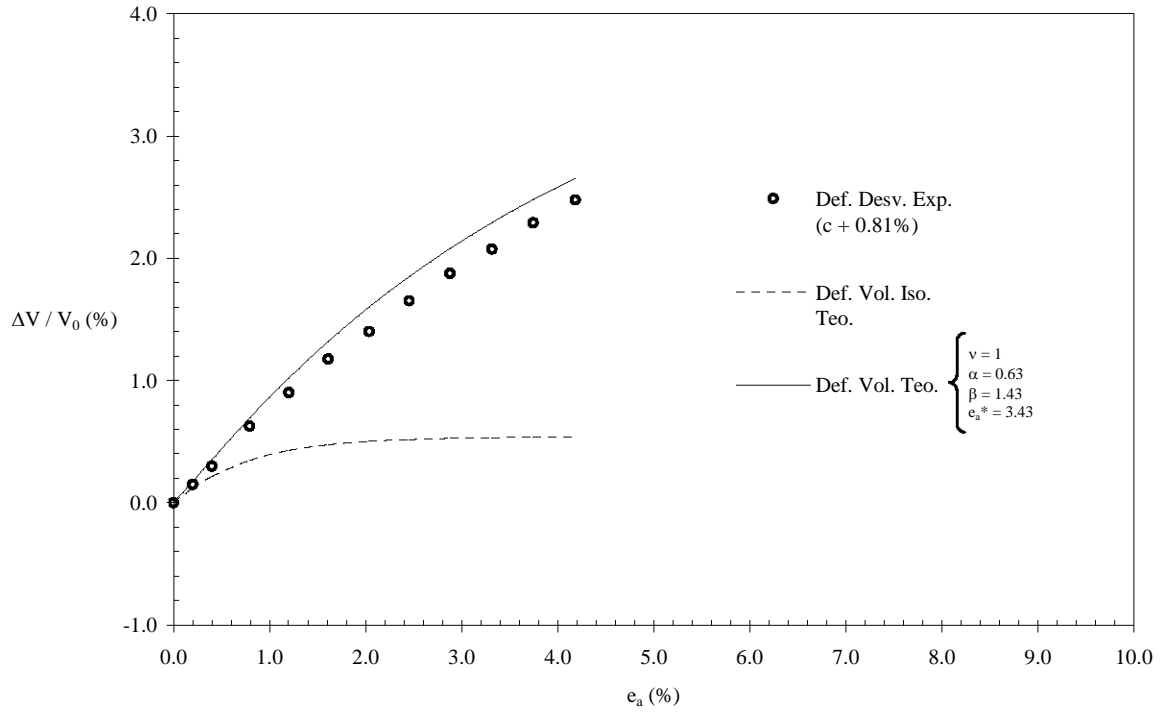




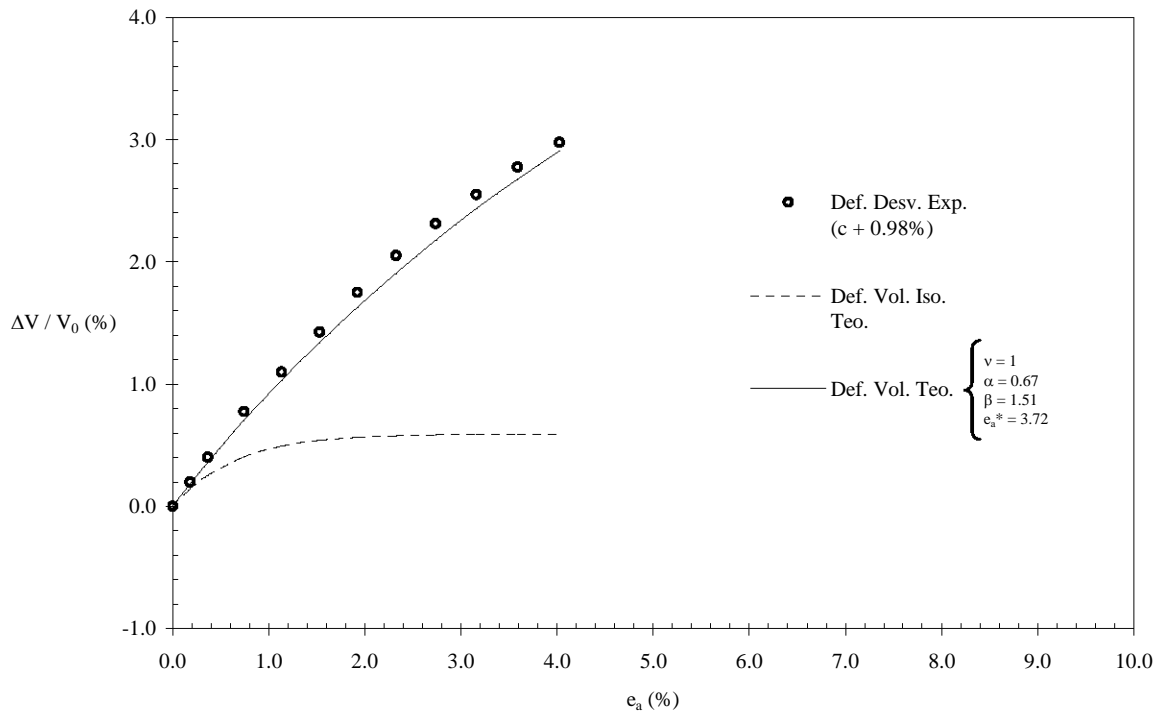
**Fig. 4-12: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 4.0**



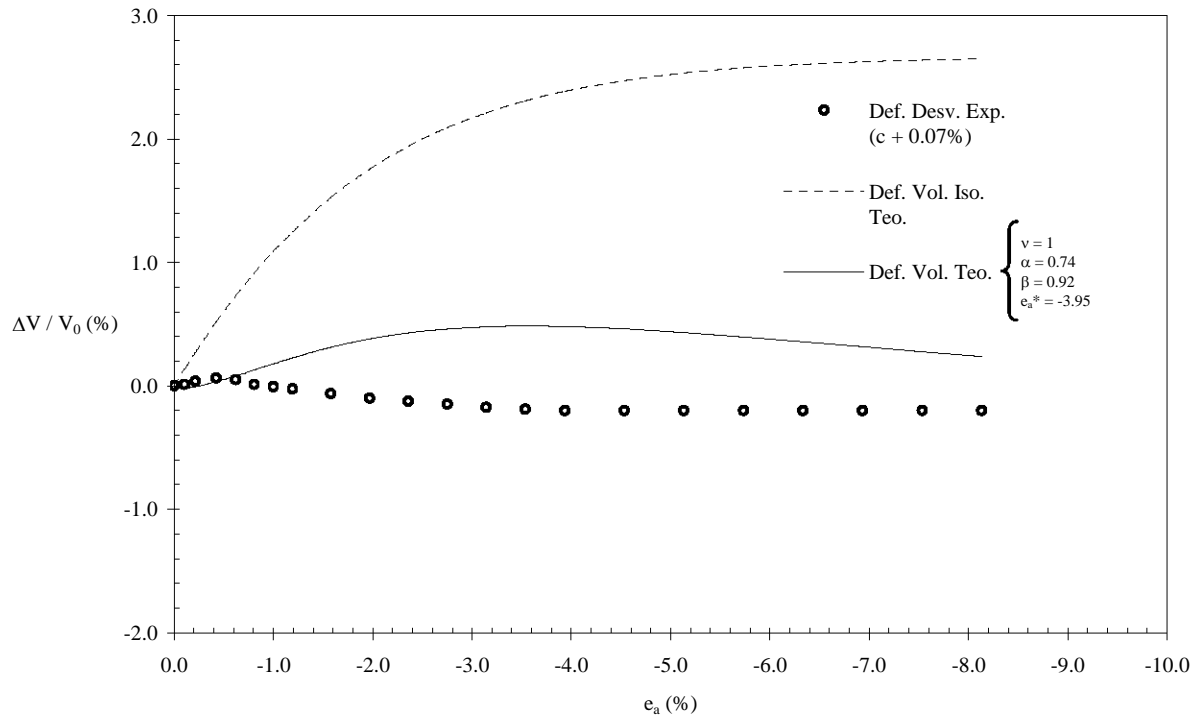
**Fig. 4-13: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 8.0**



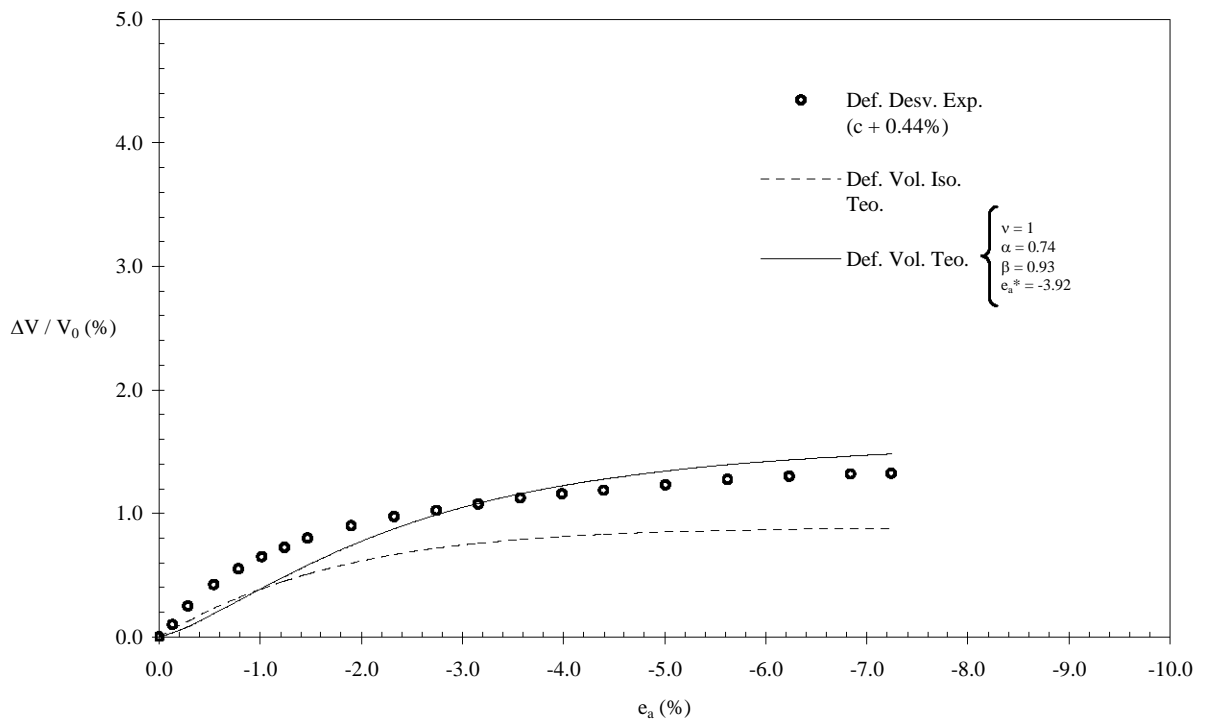
**Fig. 4-14: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 12.0**



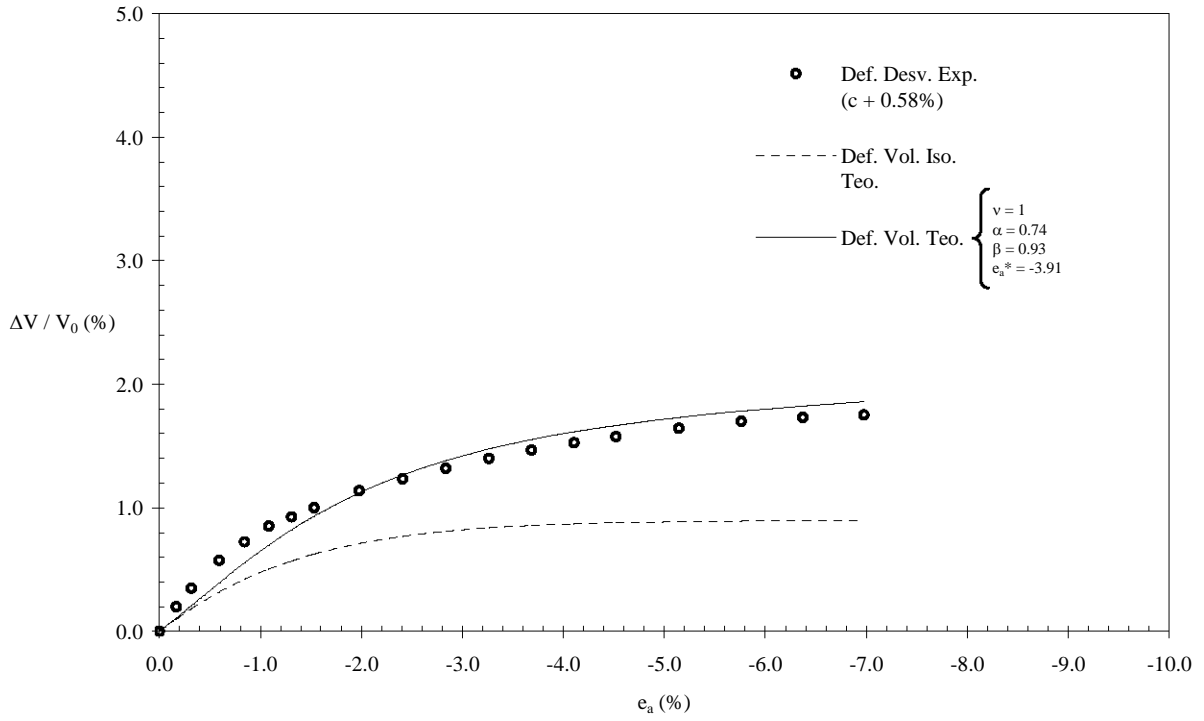
**Fig. 4-15: Curva de cambio volumétrico (AD) OCR = 24.0**



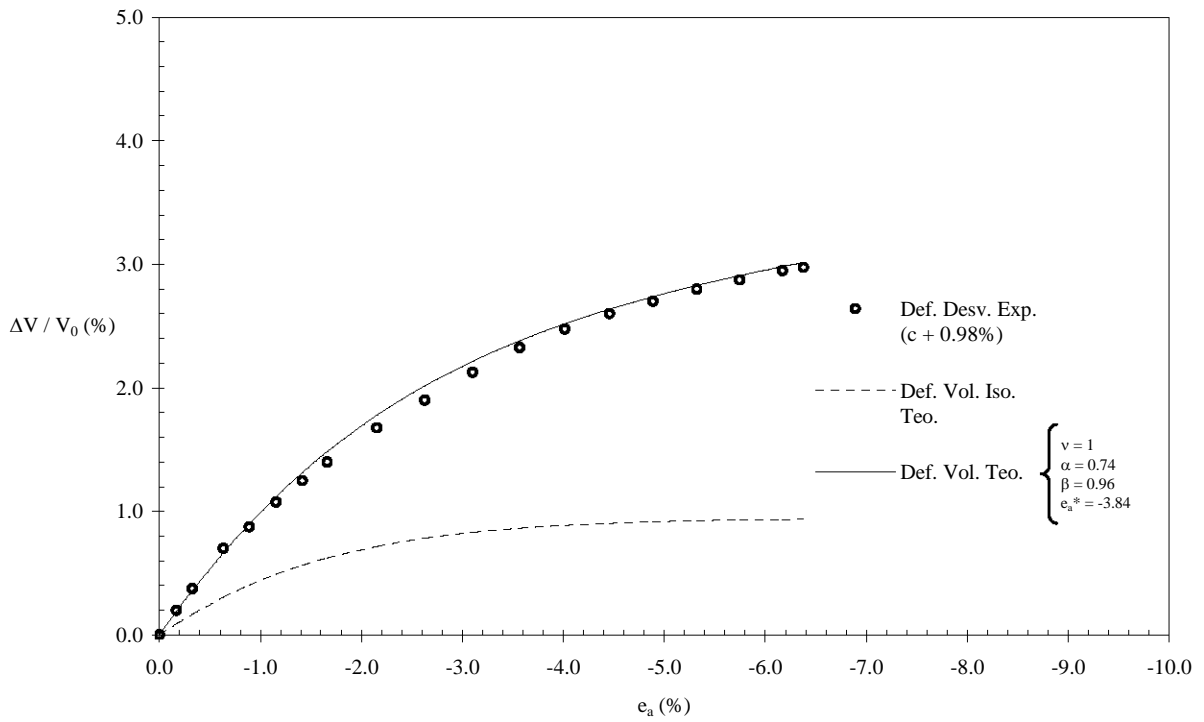
**Fig. 4-16: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 1.0**



**Fig. 4-17: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 1.7**



**Fig. 4-18: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 2.0**



**Fig. 4-19: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 4.0**

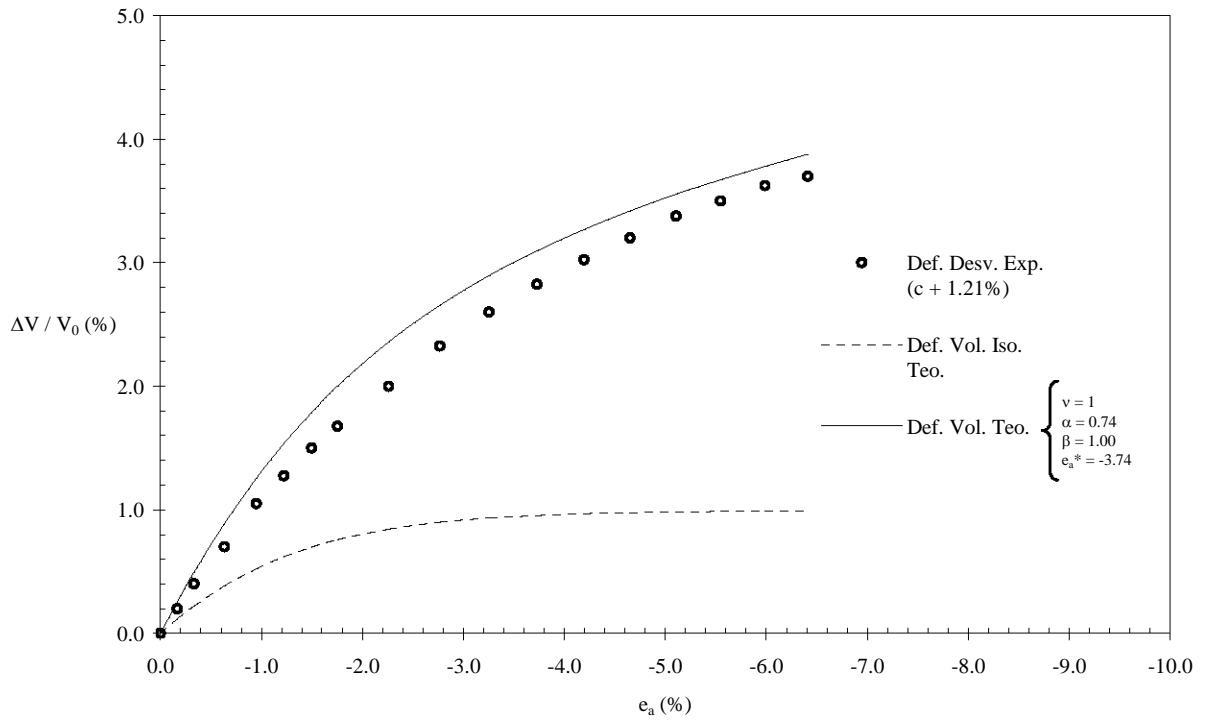


Fig. 4-20: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 8.0

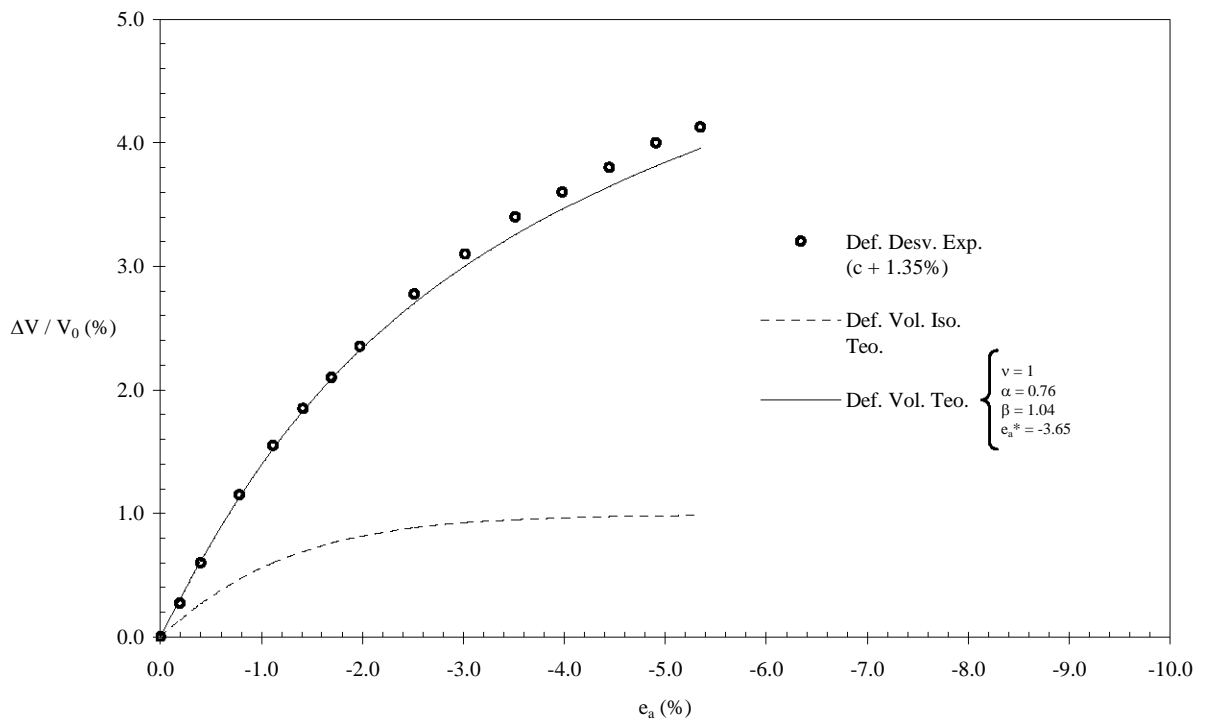
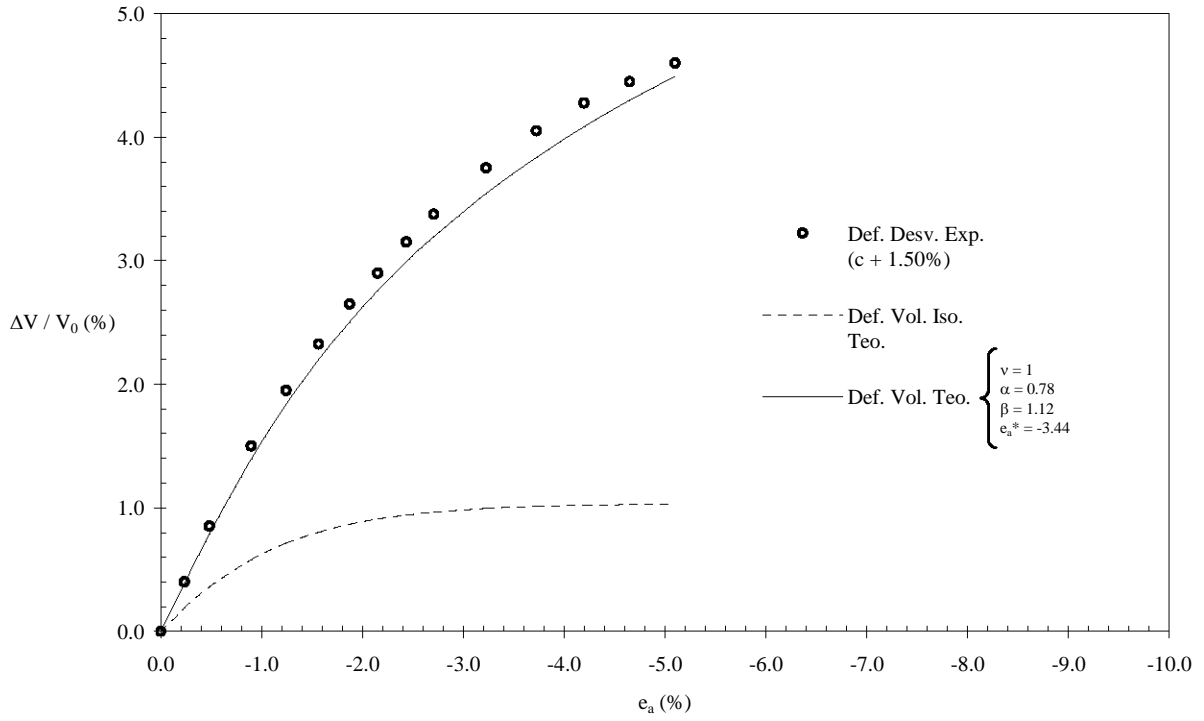
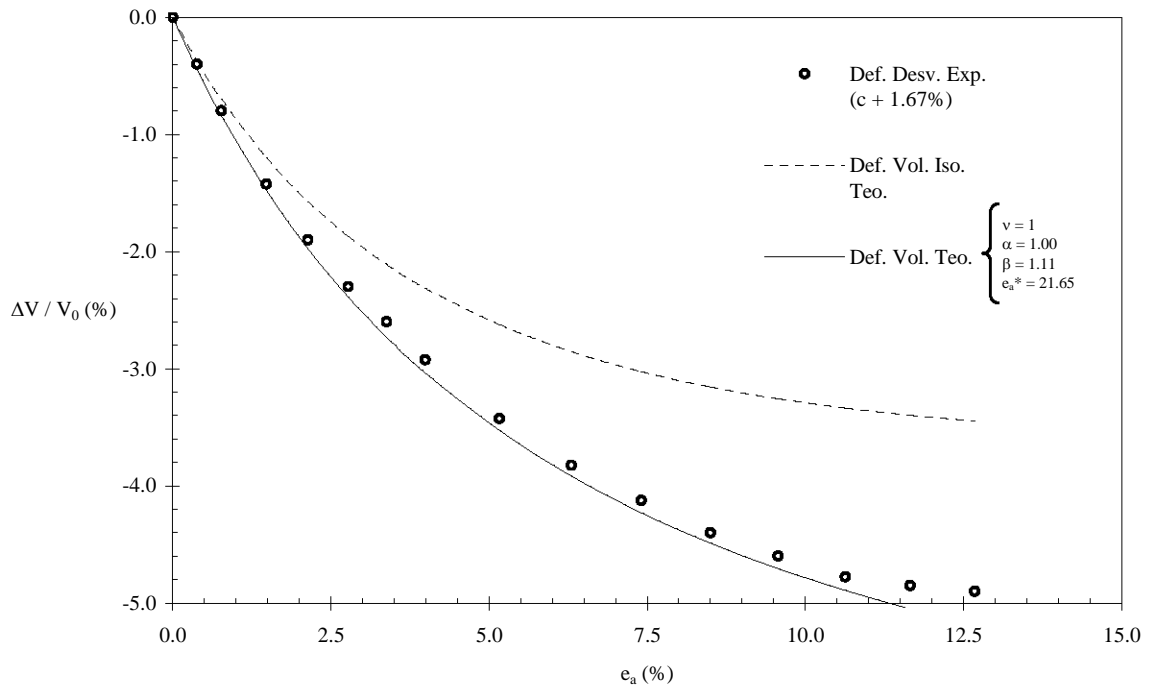


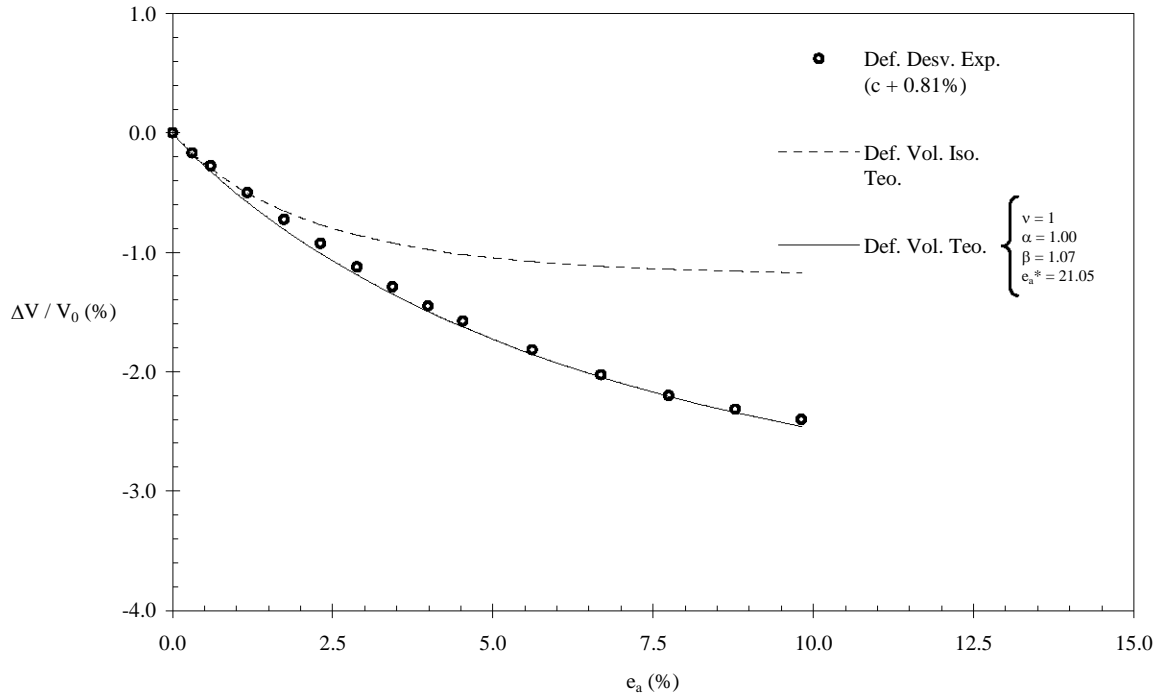
Fig. 4-21: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 12.0



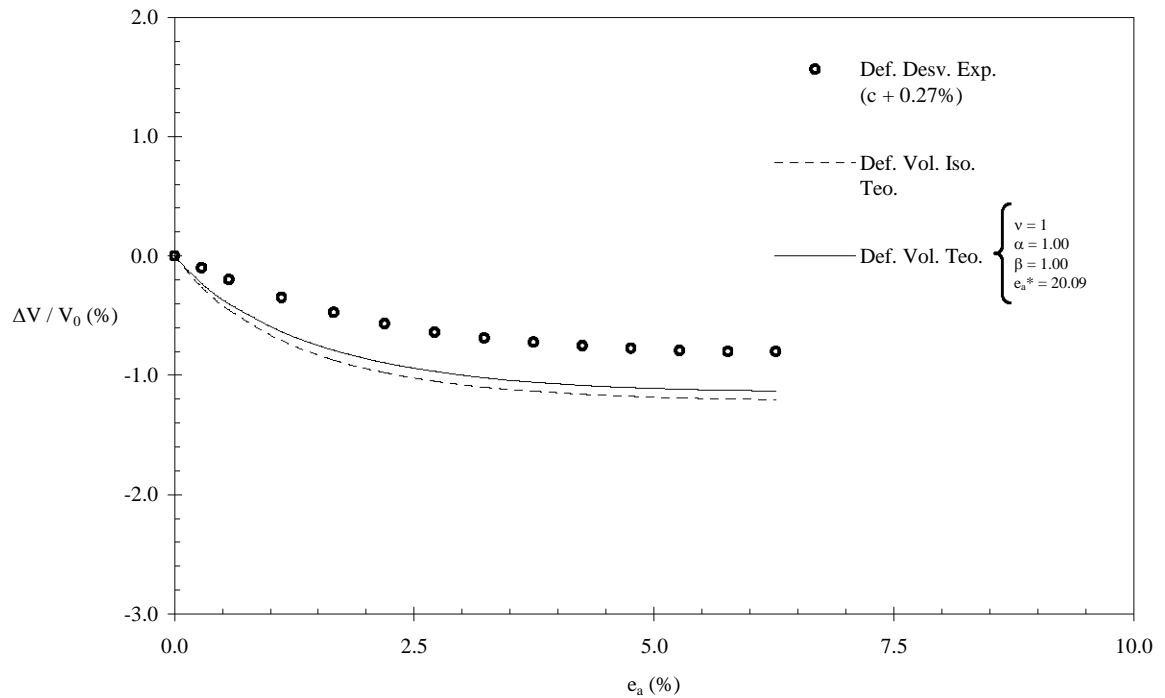
**Fig. 4-22: Curva de cambio volumétrico (RD) OCR = 24.0**



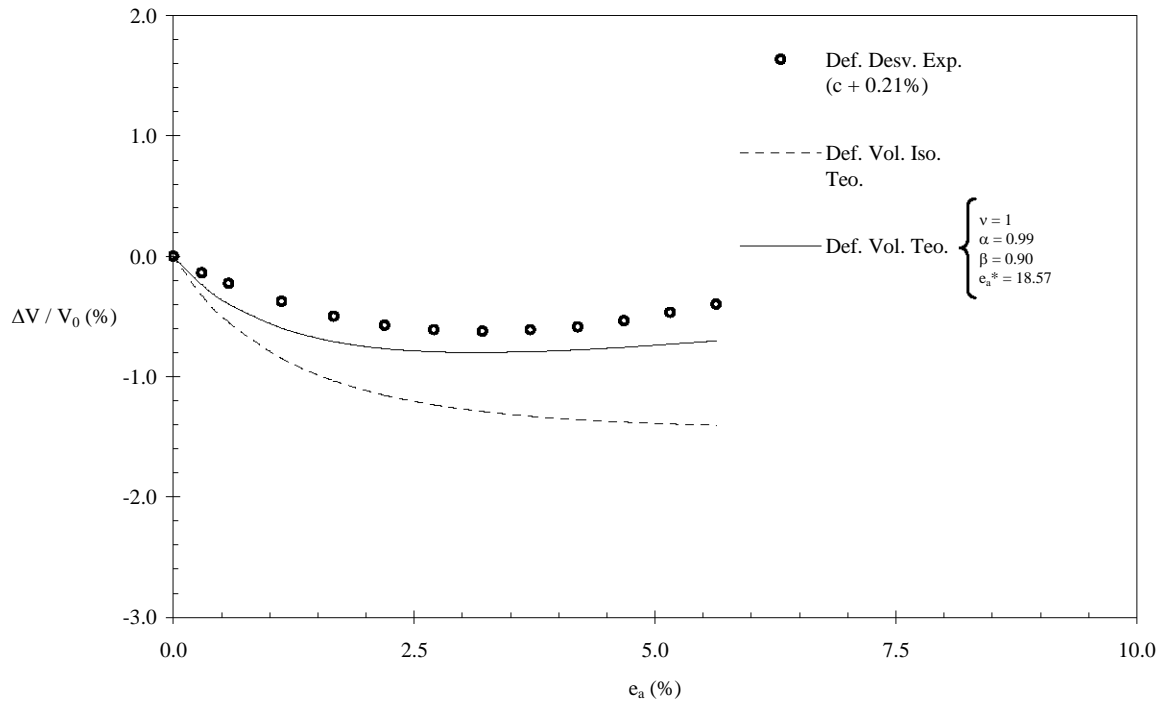
**Fig. 4-23: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 1.0**



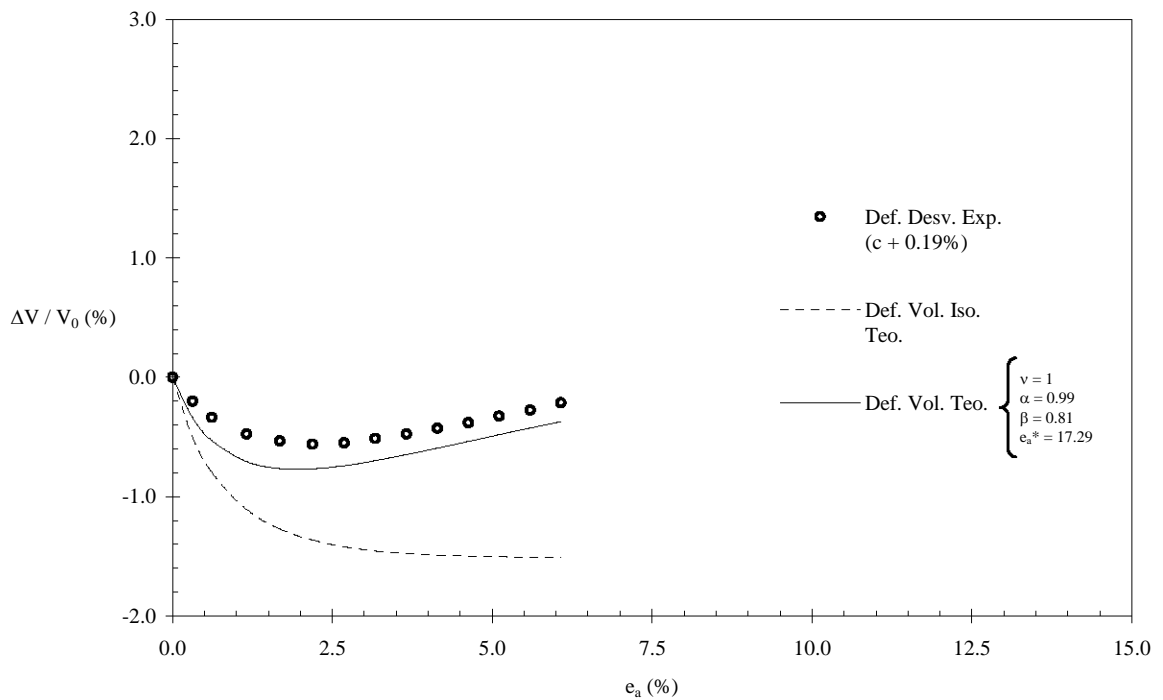
**Fig. 4-24: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 2.0**



**Fig. 4-25: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 4.0**

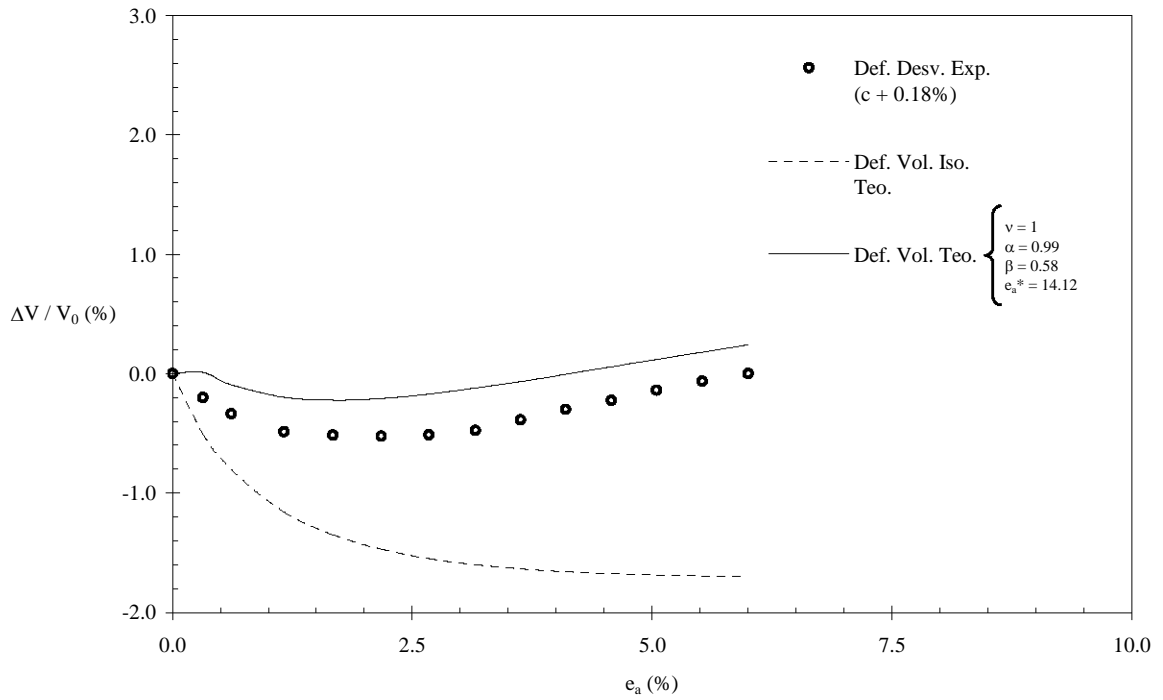


**Fig. 4-26: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 8.0**

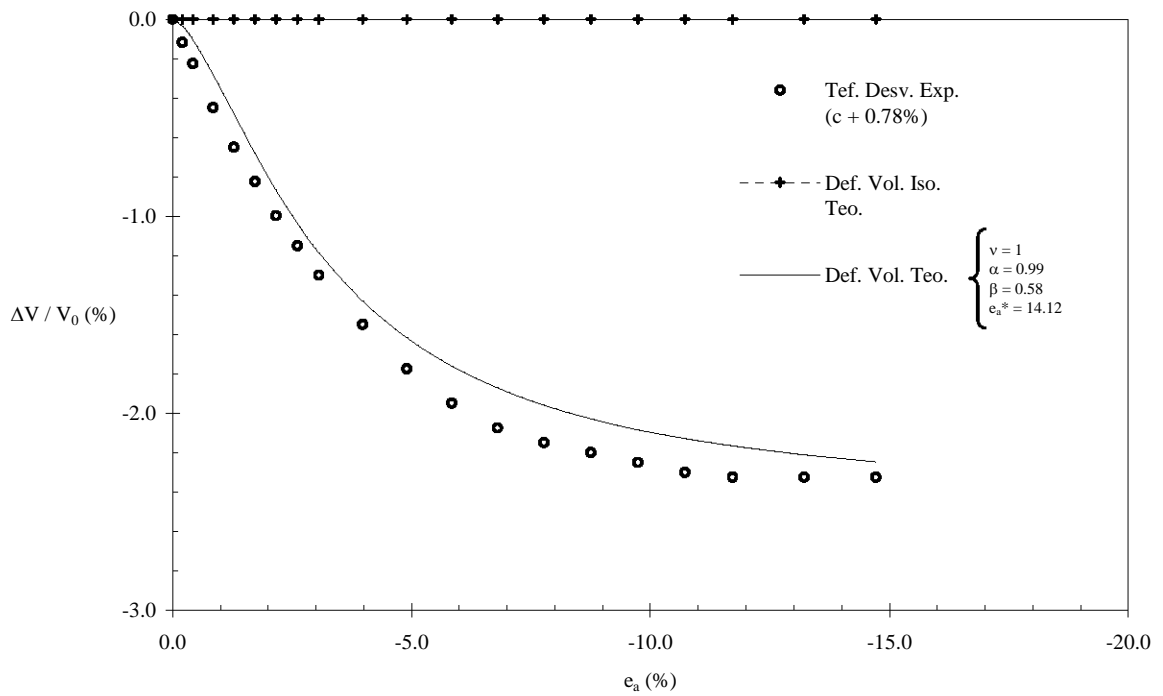


**Fig. 4-27: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 12.0**

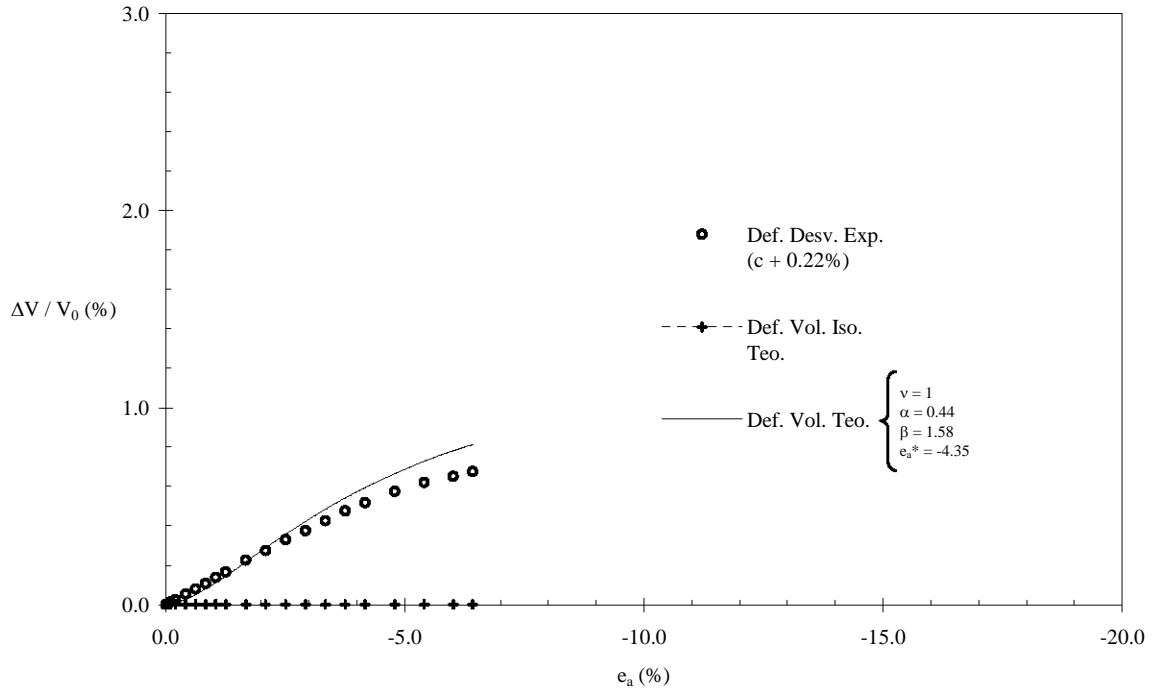




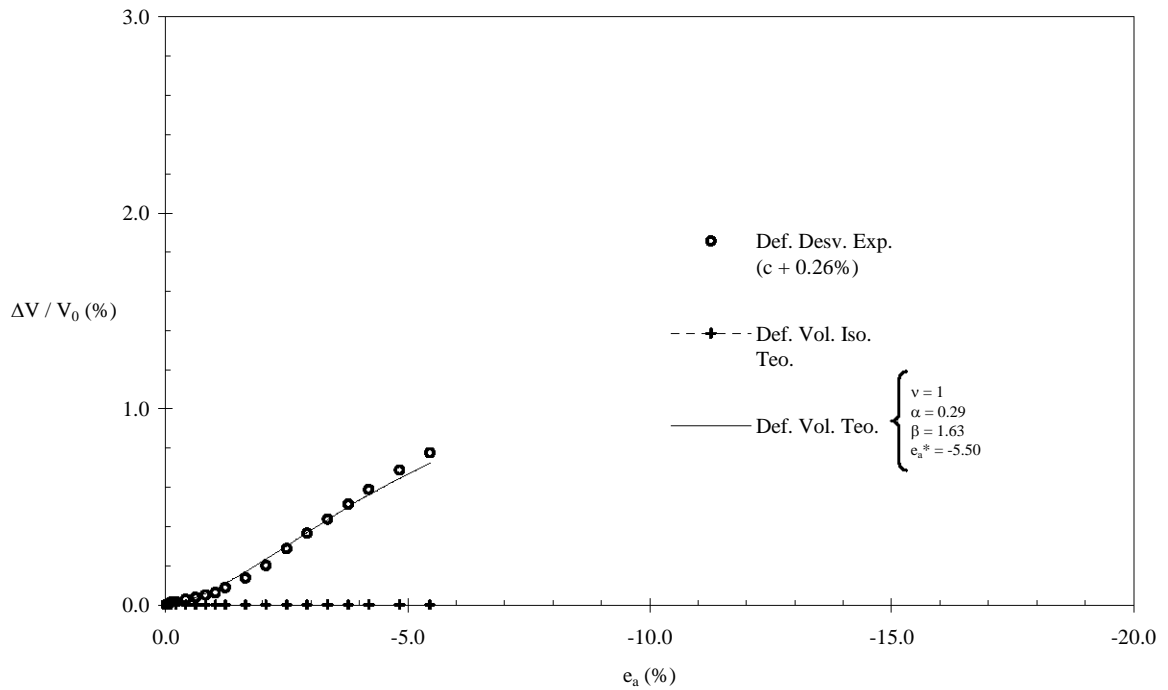
**Fig. 4-28: Curva de cambio volumétrico (RI) OCR = 24.0**



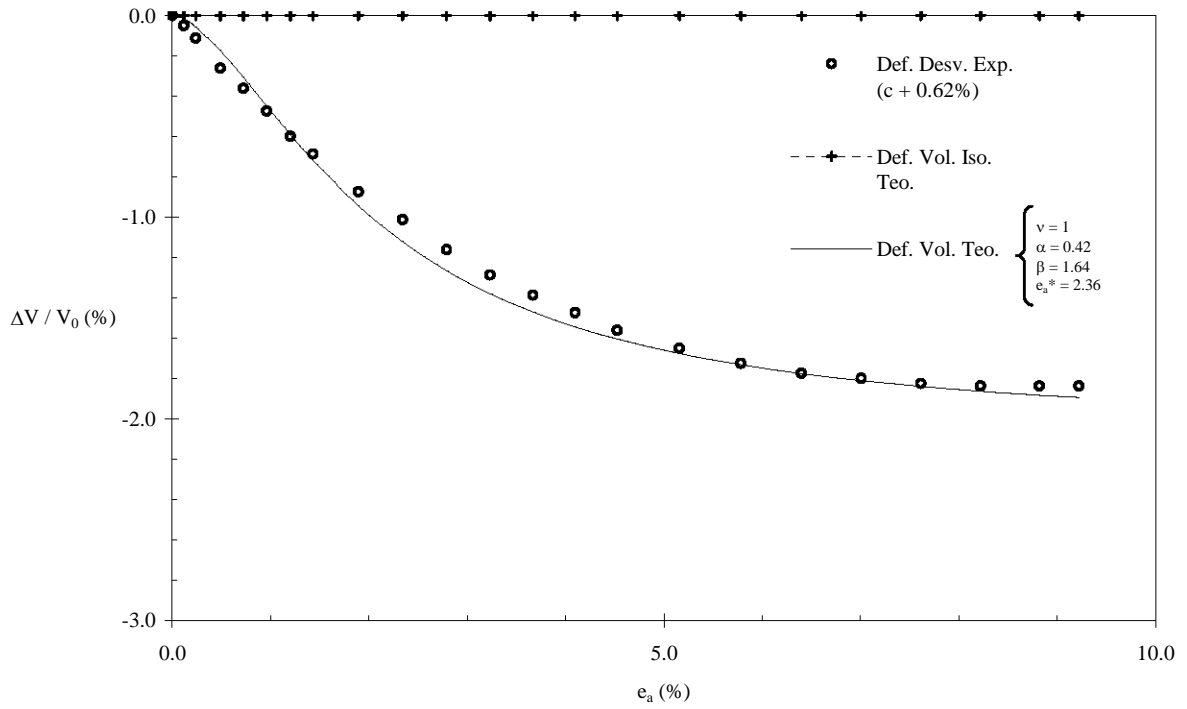
**Fig. 4-29: Curva de cambio volumétrico (CJC) OCR = 1.0**



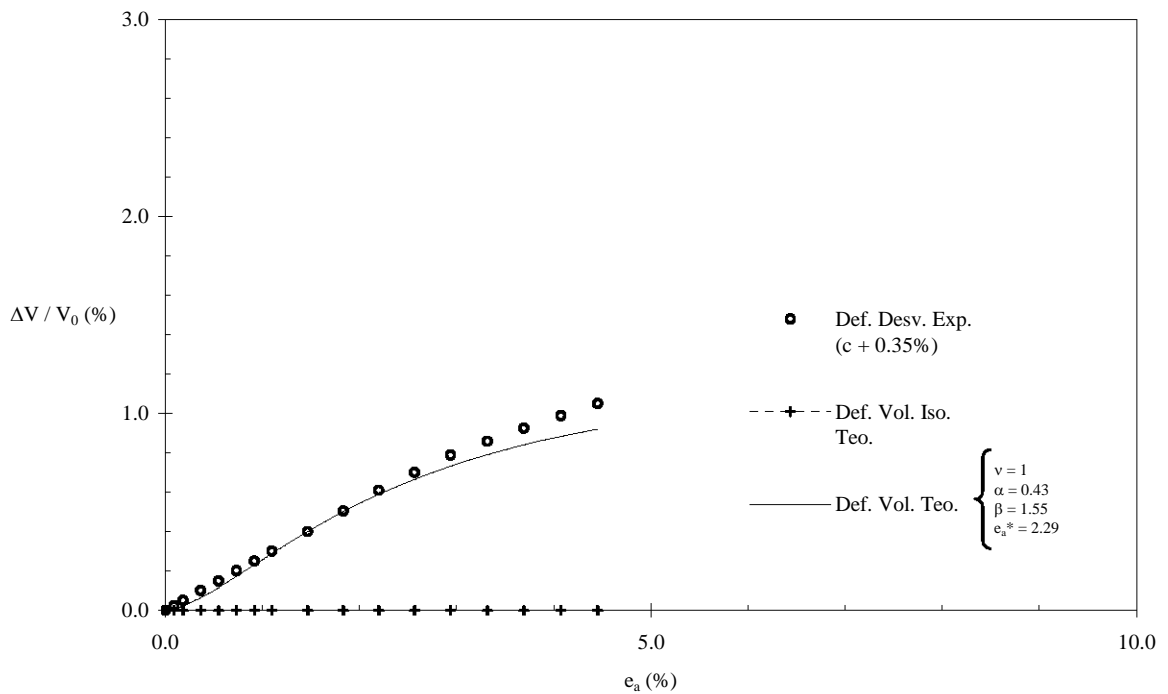
**Fig. 4-30: Curva de cambio volumétrico (CJC) OCR = 4.0**



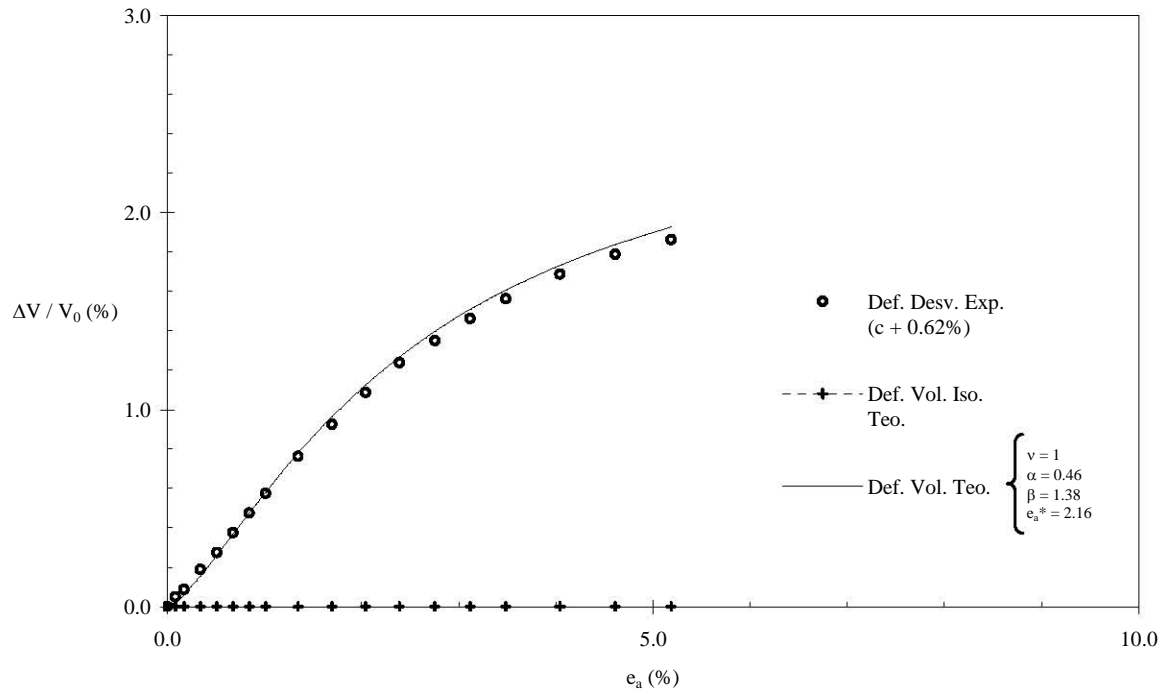
**Fig. 4-31: Curva de cambio volumétrico (CJC) OCR = 12.0**



**Fig. 4-32: Curva de cambio volumétrico (EJC) OCR = 1.0**



**Fig. 4-33: Curva de cambio volumétrico (EJC) OCR = 4.0**



**Fig. 4-34: Curva de cambio volumétrico (EJC) OCR = 12.0**

**Tabla 4-1**

Prueba	OCR	OCF	v	$\alpha$	$\beta$	$e^*$
Axial Incrementado	1.0	1.0	1	0.55	1.50	-7.16
	1.7	1.4	1	0.56	1.48	-7.34
	2.0	1.6	1	0.57	1.48	-7.41
	2.7	1.9	1	0.58	1.47	-7.56
	4.0	2.5	1	0.59	1.45	-7.81
	8.0	4.0	1	0.64	1.40	-8.45
	12.0	5.2	1	0.68	1.36	-8.98
	24.0	8.3	1	0.77	1.26	-10.31
Axial Disminuido	1.0	1.0	1	0.58	1.32	3.02
	1.7	1.4	1	0.58	1.33	3.06
	2.0	1.6	1	0.59	1.33	3.08
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	1	0.60	1.36	3.17
	8.0	4.0	1	0.62	1.40	3.31
	12.0	5.2	1	0.63	1.43	3.43
	24.0	8.3	1	0.67	1.51	3.72

**Tabla 4-2**

Prueba	OCR	OCF	v	$\alpha$	$\beta$	e*
Radial Incrementado	1.0	1.0	1	1.00	1.11	21.65
	1.7	1.4				
	2.0	1.6	1	1.00	1.07	21.05
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	1	1.00	1.00	20.09
	8.0	4.0	1	0.99	0.90	18.57
	12.0	5.2	1	0.99	0.81	17.29
	24.0	8.3	1	0.99	0.58	14.12
Radial Disminuido	1.0	1.0	1	0.74	0.92	-3.95
	1.7	1.4	1	0.74	0.93	-3.92
	2.0	1.6	1	0.74	0.93	-3.91
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	1	0.74	0.96	-3.84
	8.0	4.0	1	0.75	1.00	-3.74
	12.0	5.2	1	0.76	1.04	-3.65
	24.0	8.3	1	0.78	1.12	-3.44

**Tabla 4-3**

Prueba	OCR	OCF	v	$\alpha$	$\beta$	e*
Compresión J = Cte.	1.0	1.0	1	0.52	1.55	-3.71
	1.7	1.4				
	2.0	1.6				
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	1	0.44	1.58	-4.35
	8.0	4.0	1			
	12.0	5.2	1	0.29	1.63	-5.50
	24.0	8.3	1			
Extensión J = Cte.	1.0	1.0	1	0.42	1.64	2.36
	1.7	1.4				
	2.0	1.6				
	2.7	1.9				
	4.0	2.5	1	0.43	1.55	2.29
	8.0	4.0				
	12.0	5.2	1	0.46	1.38	2.16
	24.0	8.3				

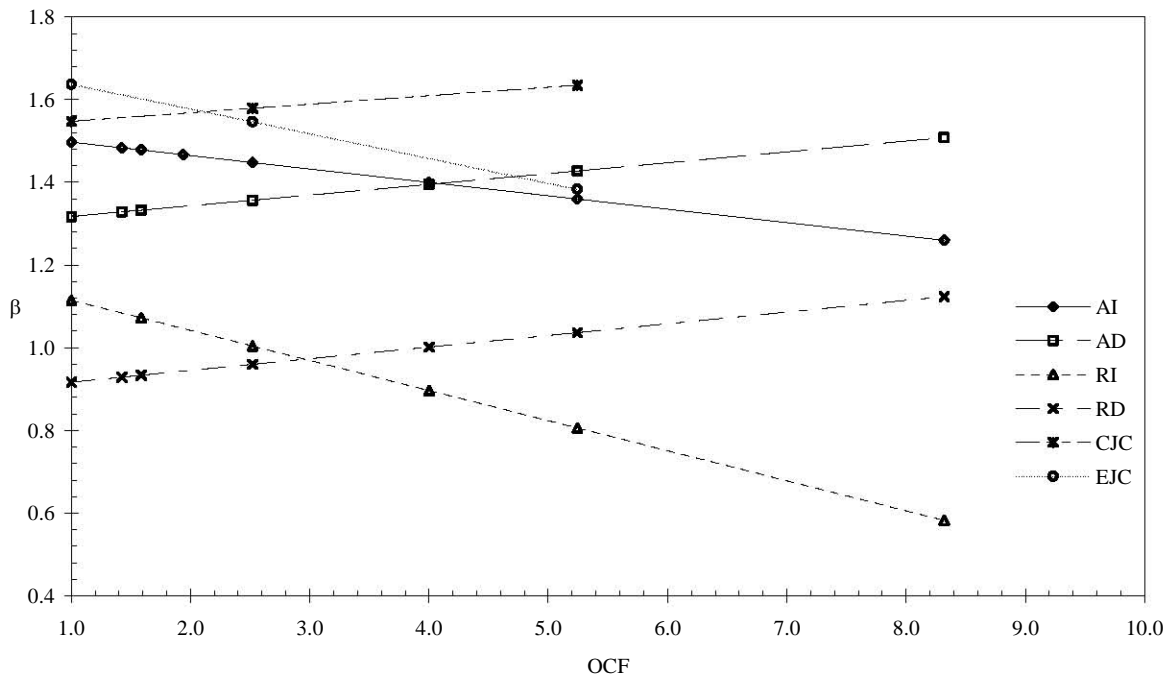


Fig. 4-35: Variación del parámetro  $\beta$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=1$

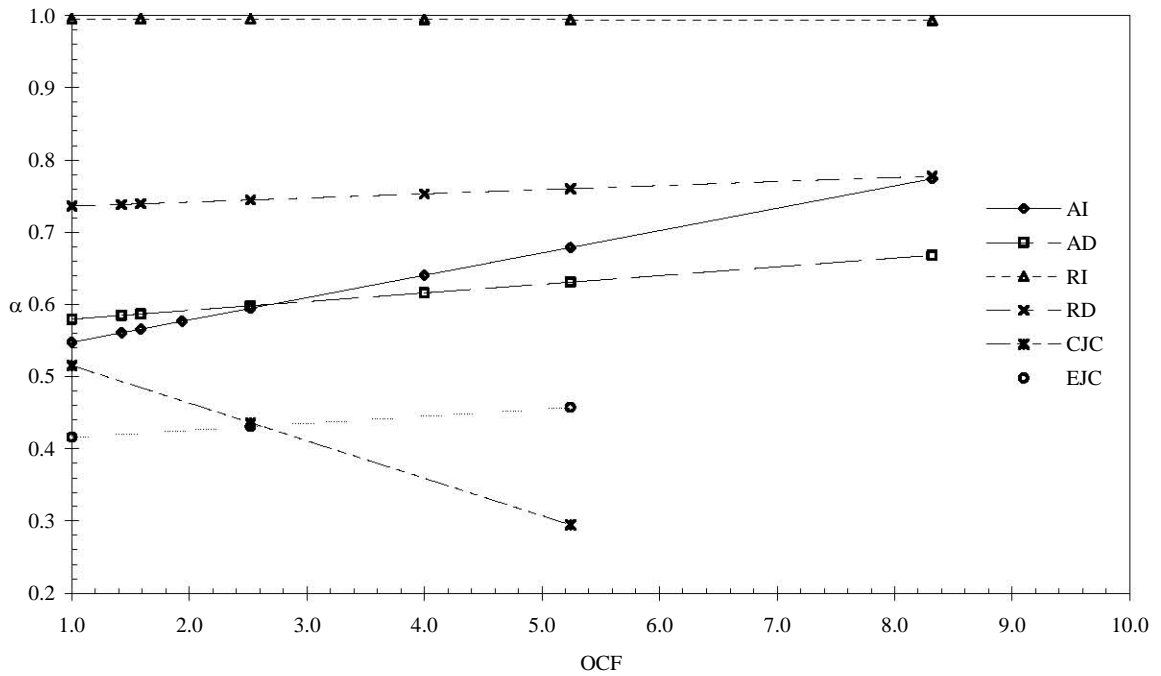


Fig. 4-36: Variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $OCF$  para  $\nu=1$

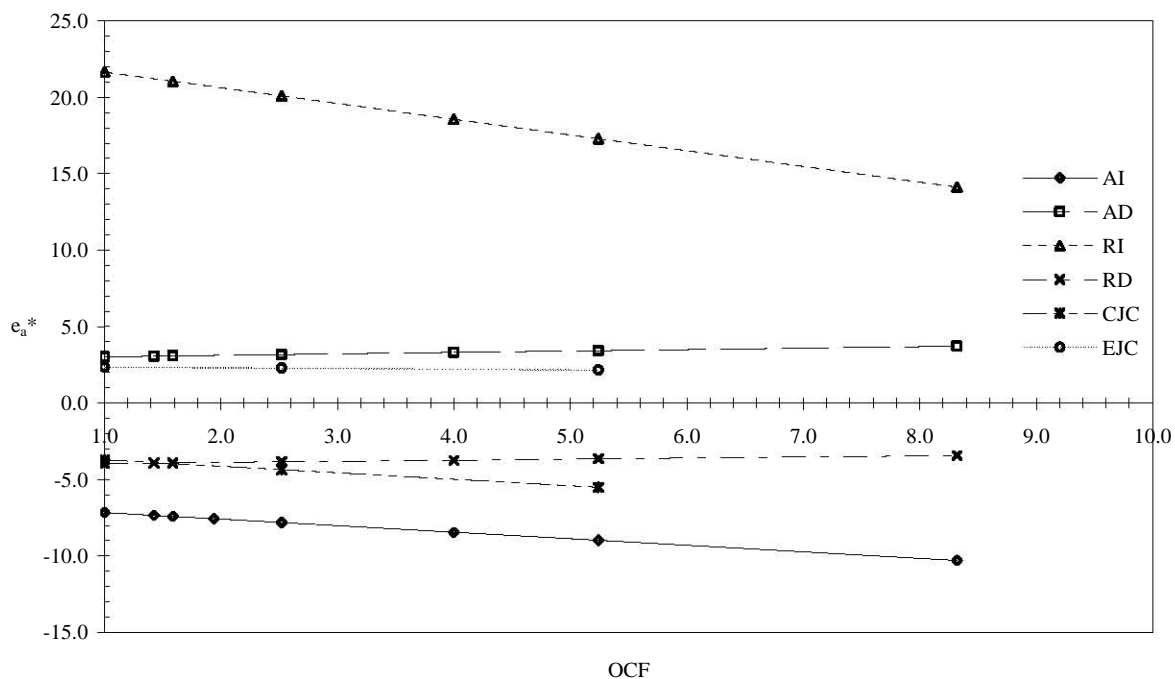


Fig. 4-37: Variación del parámetro  $e_a^*$  respecto al  $OCF$  para  $\nu = 1$

#### 4.2 Variación de los parámetros del PPN respecto al IP pruebas CU.

En el caso de las pruebas CU, el objetivo es el tratar de encontrar una ley de variación de los parámetros  $\mu$ ,  $x_f$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $e_a^*$ , respecto al índice de plasticidad ( $IP$ ) en diferentes tipos de arcillas y nuevamente utilizar las ecuaciones mejoradas.

Para tratar de encontrar esta ley, se tomaron los valores obtenidos de los ajustes del capítulo 3 y se graficaron de acuerdo los esfuerzos confinantes (si se conoce) y el  $IP$

En las tablas 4-4 y 4-5, aparecen los valores de los parámetros de acuerdo al esfuerzo confinante  $\sigma_c$  y al índice de plasticidad y en las figuras 4-38 a 4-47 se muestran estos valores de forma gráfica.

Como se puede observar, no es posible determinar una ley de variación, debido a que solo cuatro pruebas comparten el mismo esfuerzo confinante, estas pruebas aparecen en color azul en la tabla 4-4.

**Tabla 4-4**

Arcilla	$\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	IP	$\nu$	$\mu$	$\alpha$	$\beta$	$e_a^*$	
Weald		25%	2	0.044	0.610	0.370	1.500	-0.021
Caolinita	3.008	30%	2	0.049	0.575	0.640	2.101	-3.764
Caolinita	4.099	30%	2	0.078	0.616	0.544	1.726	-4.347
Caolinita	6.577	30%	2	0.077	0.585	0.528	1.810	-4.100
Caolinita	8.158	30%	2	0.087	0.584	0.546	1.224	-3.931
Caolinita	20.312	30%	2	0.092	0.588	0.565	1.288	-3.135
Caolinita	33.038	30%	2	0.058	0.556	0.429	1.206	-2.806
Caolinita	42.501	30%	2	0.084	0.532	0.508	0.762	-2.189
Caolinita	59.204	30%	2	0.071	0.503	0.490	0.553	-2.030
Caolinita	82.851	30%	2	0.087	0.479	0.479	0.836	-3.373
Caolinita	101.899	30%	2	0.085	0.457	0.478	0.689	-3.379
D.F. Los Álamos A1	1.428	145%	2	0.013	1.524	0.217	3.326	-1.269
D.F. Los Álamos A2	2.243	145%	2	0.020	1.262	0.345	2.257	-1.579
D.F. Los Álamos A3	3.059	145%	2	0.018	1.089	0.433	1.812	-1.579
D.F. Los Álamos A17	2.345	182%	2	0.021	1.199	0.472	1.087	-2.549
D.F. Los Álamos A18	3.059	182%	2	0.016	1.139	0.498	1.271	-2.461
D.F. Los Álamos A4	0.816	210%	2	0.026	0.766	0.600	0.981	-2.748
D.F. Los Álamos A5	1.530	210%	2	0.054	0.795	0.637	0.937	-3.567
D.F. Los Álamos A11	2.039	242%	2	0.016	0.987	0.492	1.517	-2.512
D.F. Los Álamos A12	2.753	242%	2	0.012	0.916	0.495	1.693	-2.218
D.F. Los Álamos A13	3.110	242%	2	0.016	0.987	0.492	1.517	-2.512
D.F. Reconstituida	0.500	281%	2	0.022	1.416	0.423	1.059	-3.664
D.F. Reconstituida	1.000	281%	2	0.022	1.138	0.521	1.111	-3.544
D.F. Reconstituida	1.500	281%	2	0.029	1.068	0.563	0.952	-3.456

Sin embargo, graficando estas cuatro pruebas, podemos intentar trazar algunas curvas suaves, como las mostradas en las figuras 4-48 a 4-52.



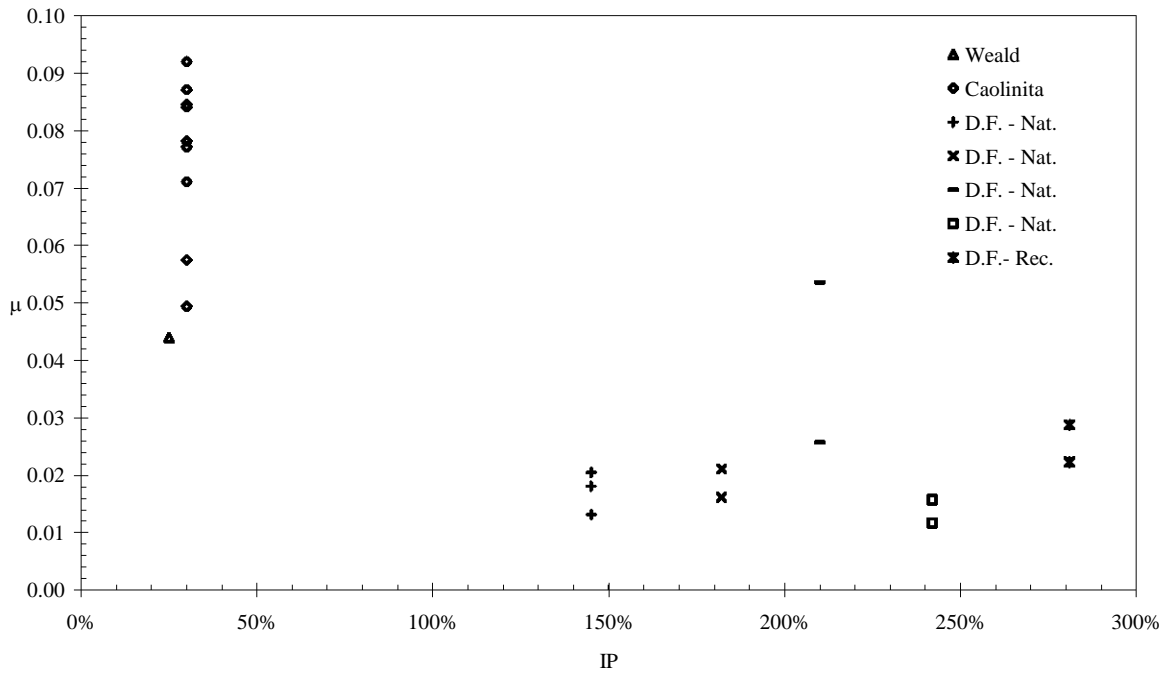


Fig. 4-38: Variación del parámetro  $\mu$  respecto al  $IP$

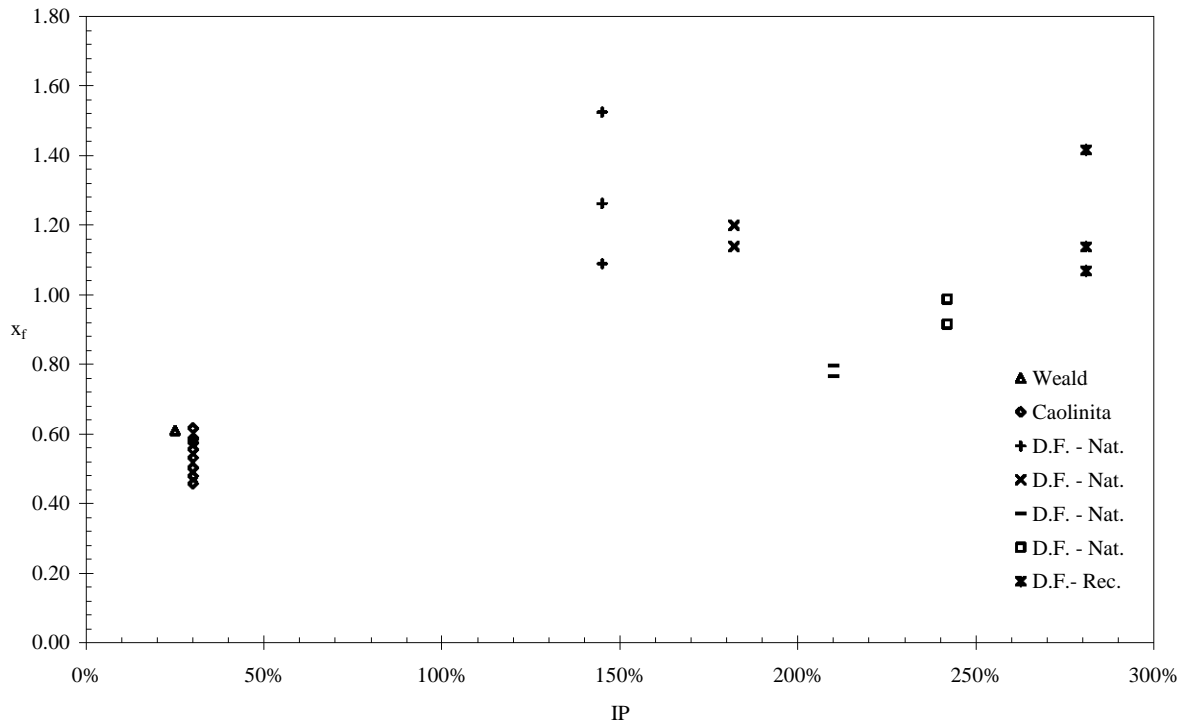


Fig. 4-39: Variación del parámetro  $x_f$  respecto al  $IP$



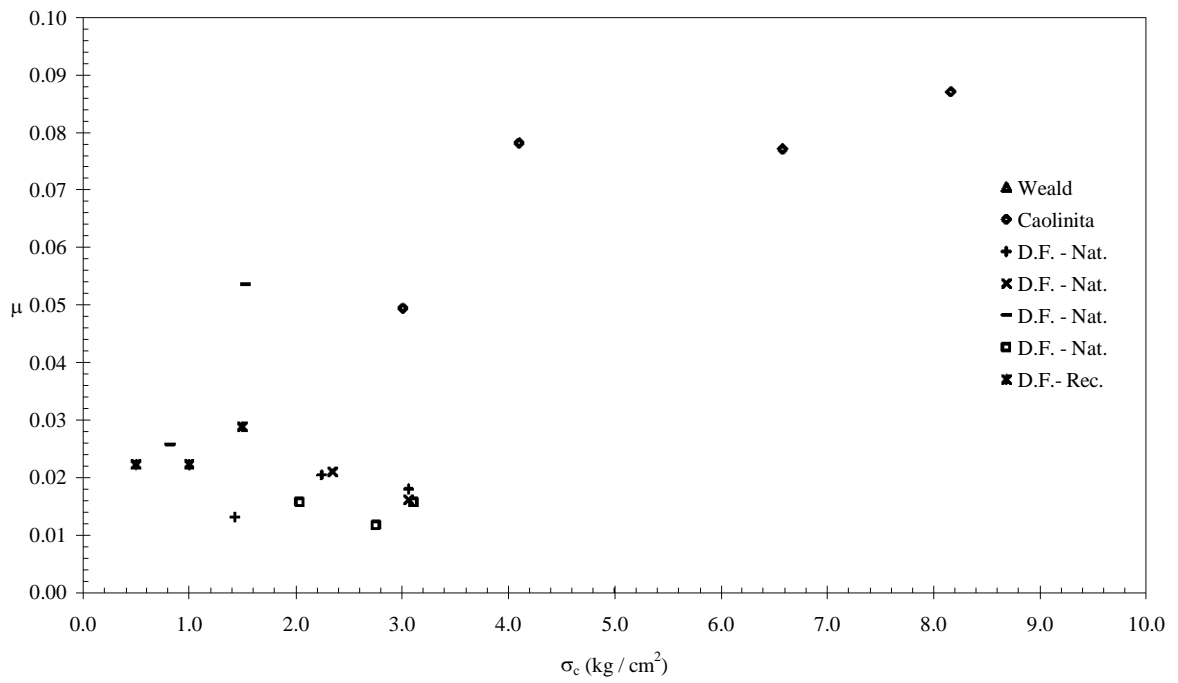


Fig. 4-42: Detalle de la variación del parámetro  $\mu$  respecto al  $\sigma_c$

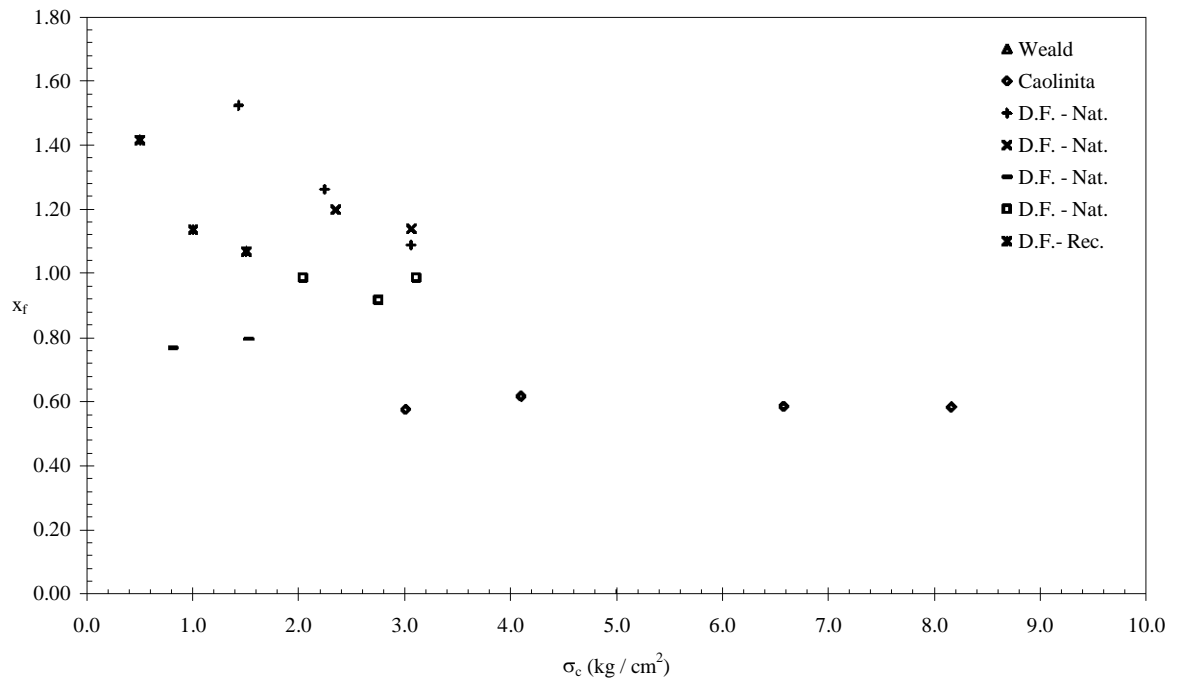


Fig. 4-43: Detalle de la variación del parámetro  $x_f$  respecto al  $\sigma_c$

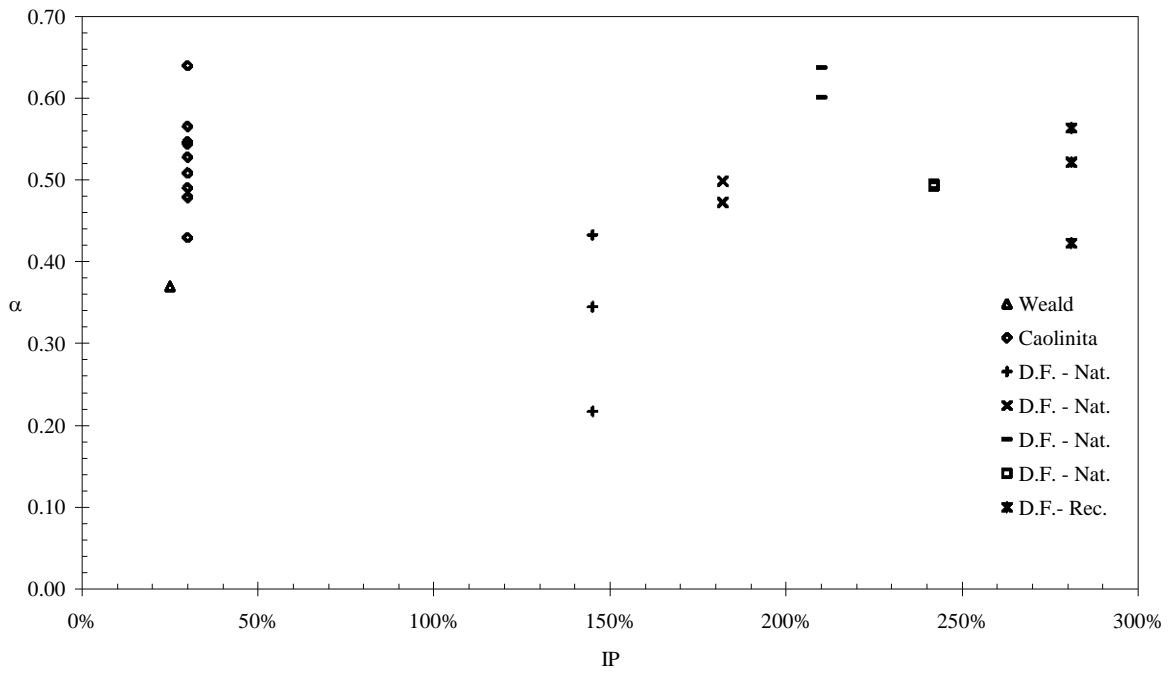


Fig. 4-44: Variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $IP$

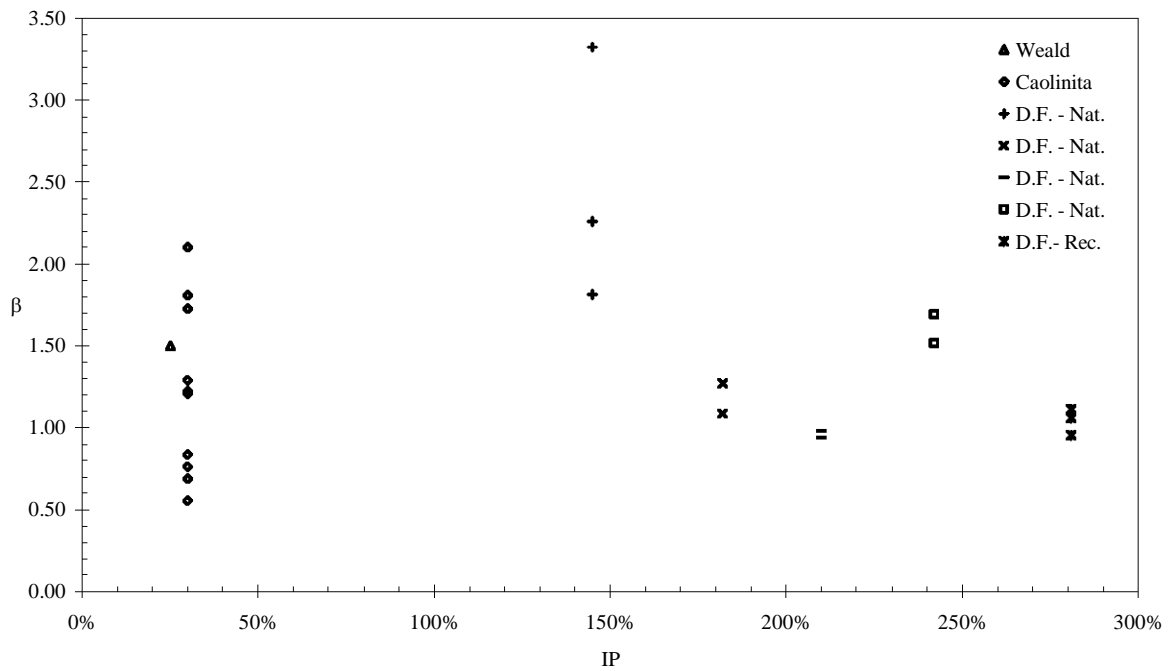


Fig. 4-45: Variación del parámetro  $\beta$  respecto al  $IP$

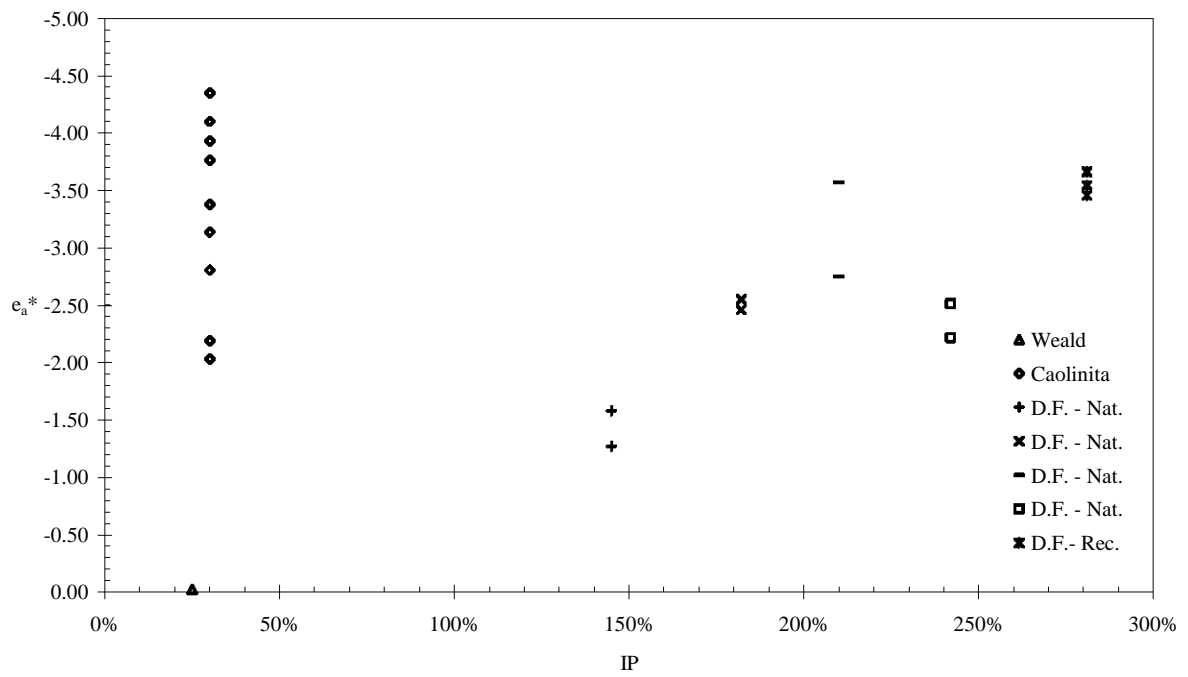


Fig. 4-46: Variación del parámetro  $e_a^*$  respecto al IP

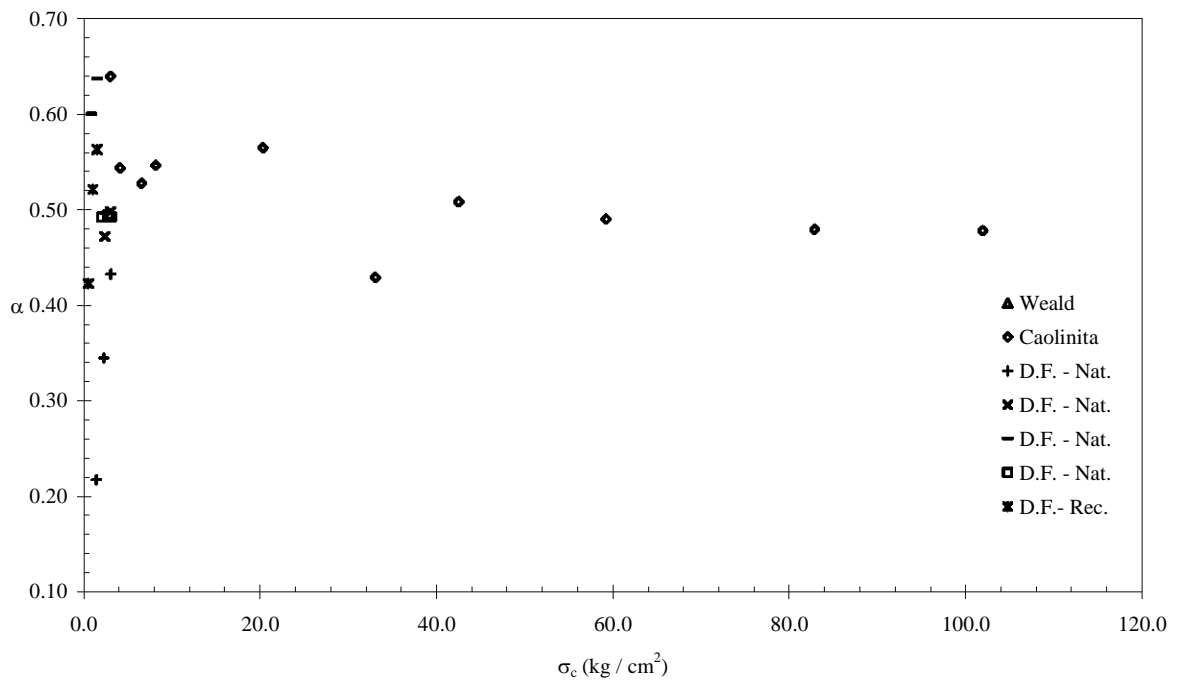


Fig. 4-47: Variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $\sigma_c$

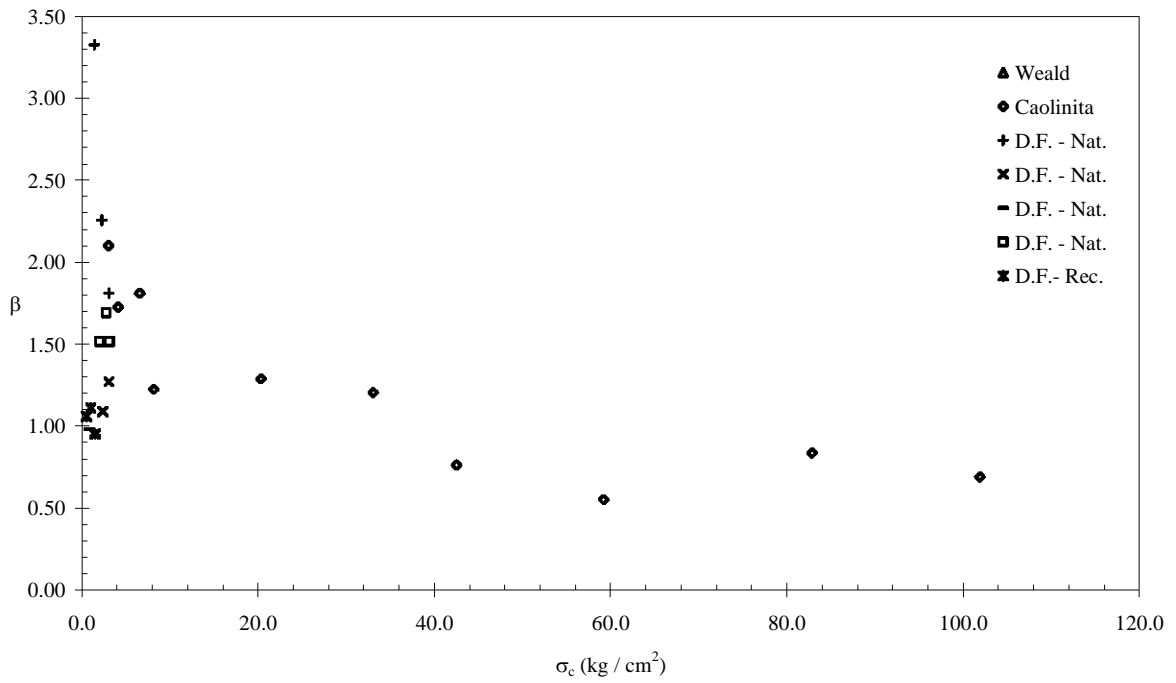


Fig. 4-48: Variación del parámetro  $\beta$  respecto al  $\sigma_c$

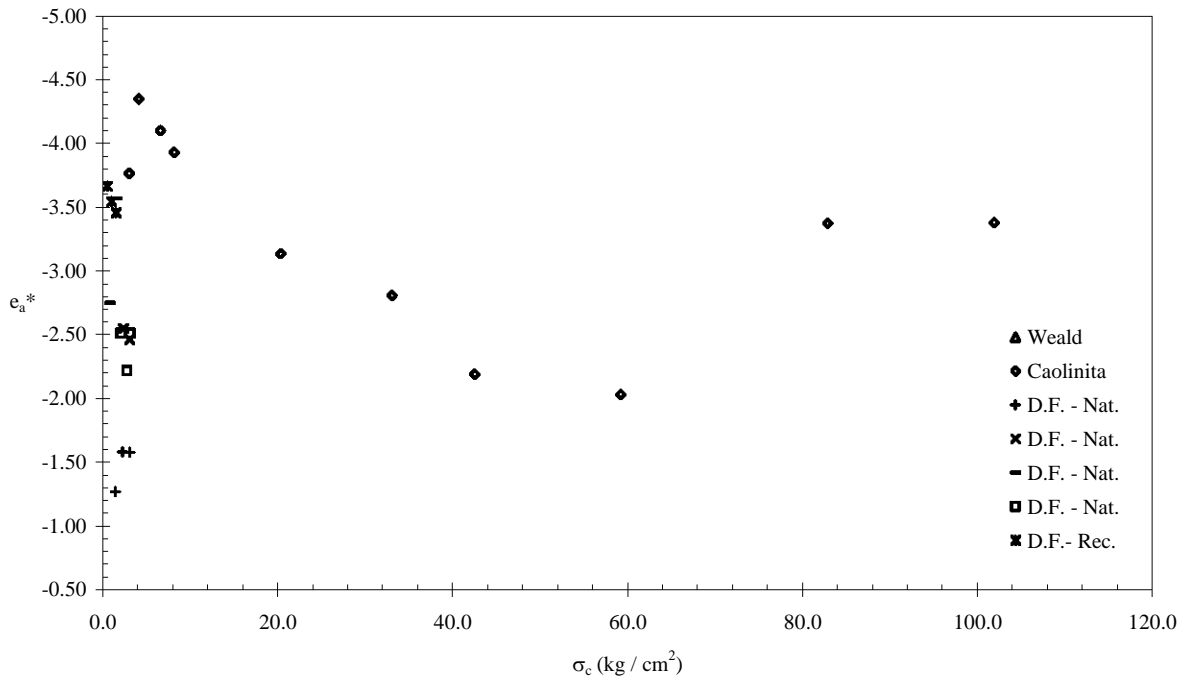


Fig. 4-49: Variación del parámetro  $e_a^*$  respecto al  $\sigma_c$

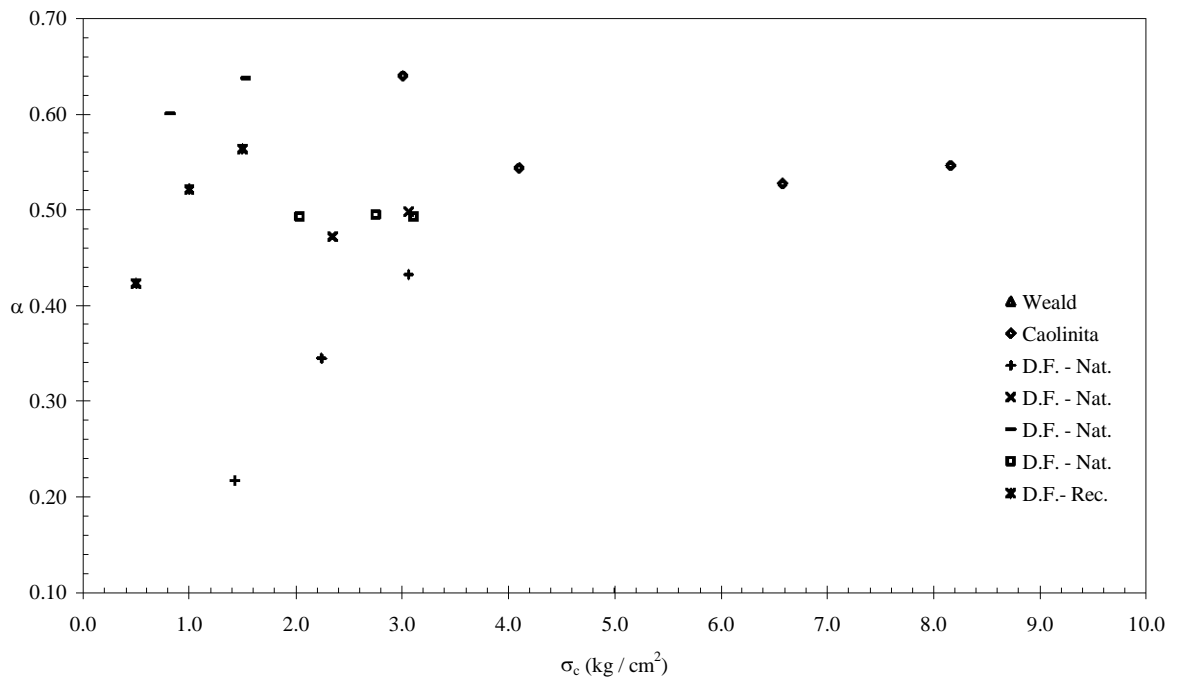


Fig. 4-50: Detalle de la variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $\sigma_c$

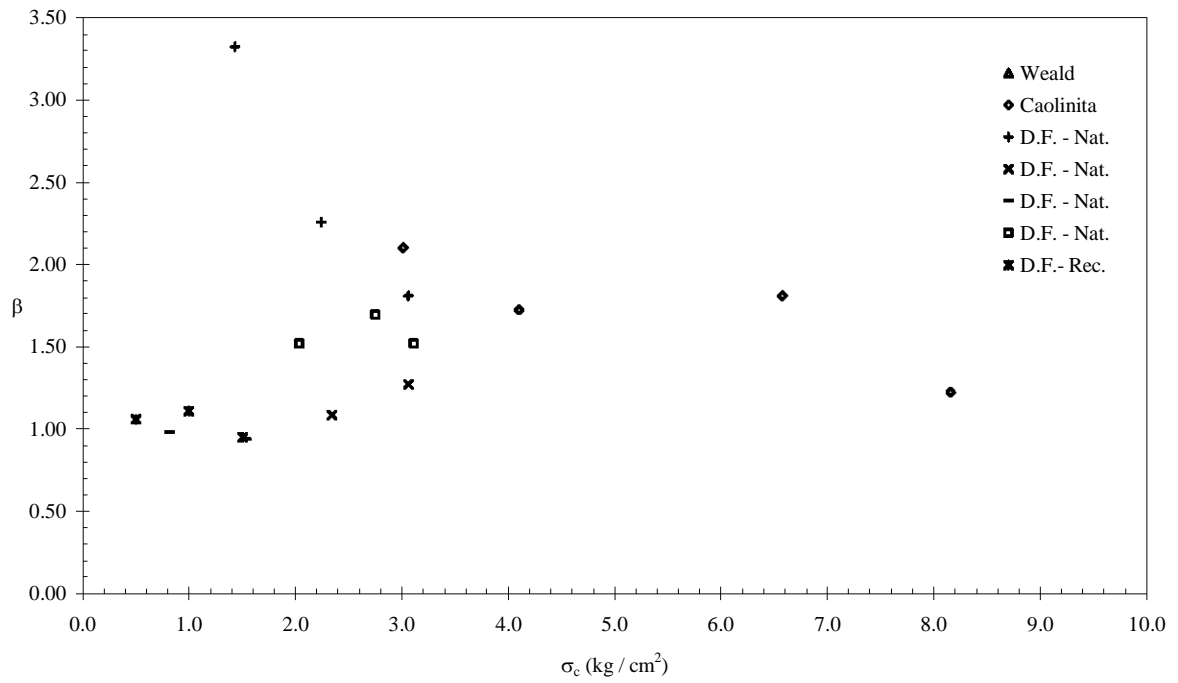
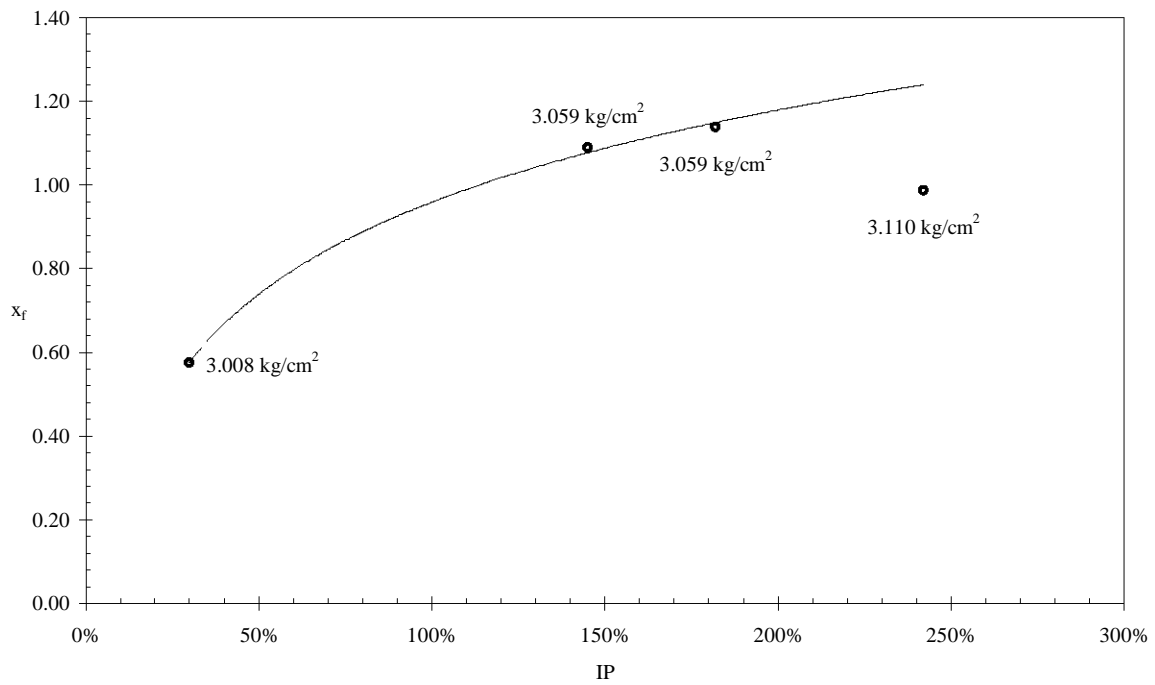


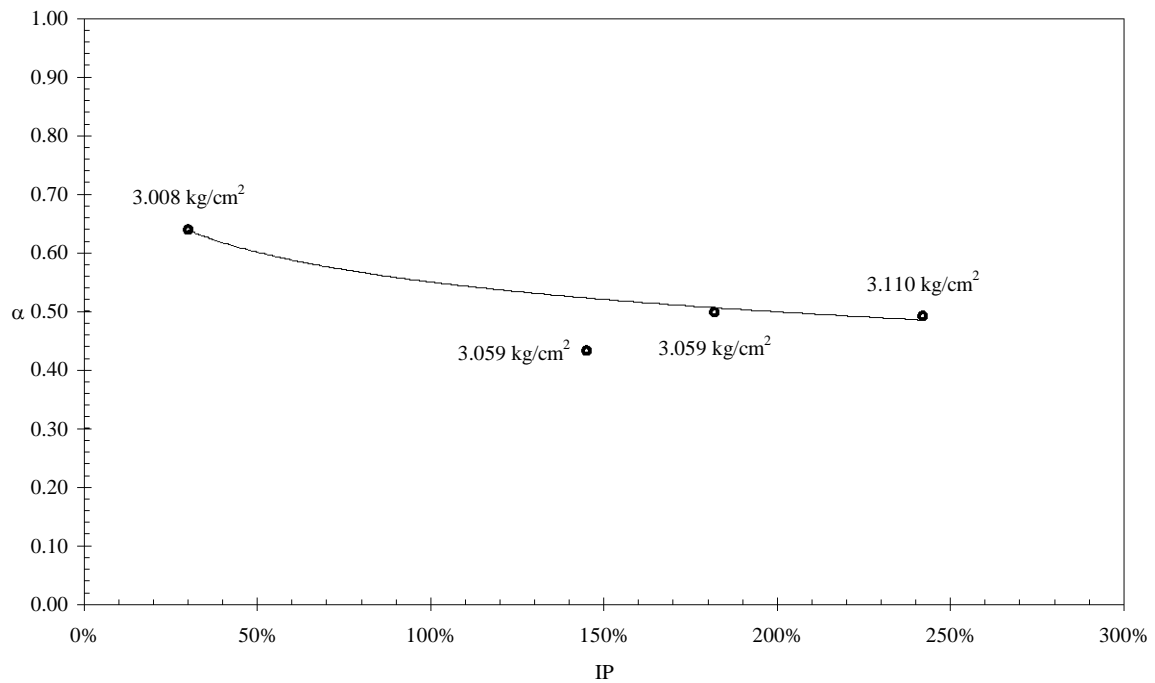
Fig. 4-51: Detalle de la variación del parámetro  $\beta$  respecto al  $\sigma_c$



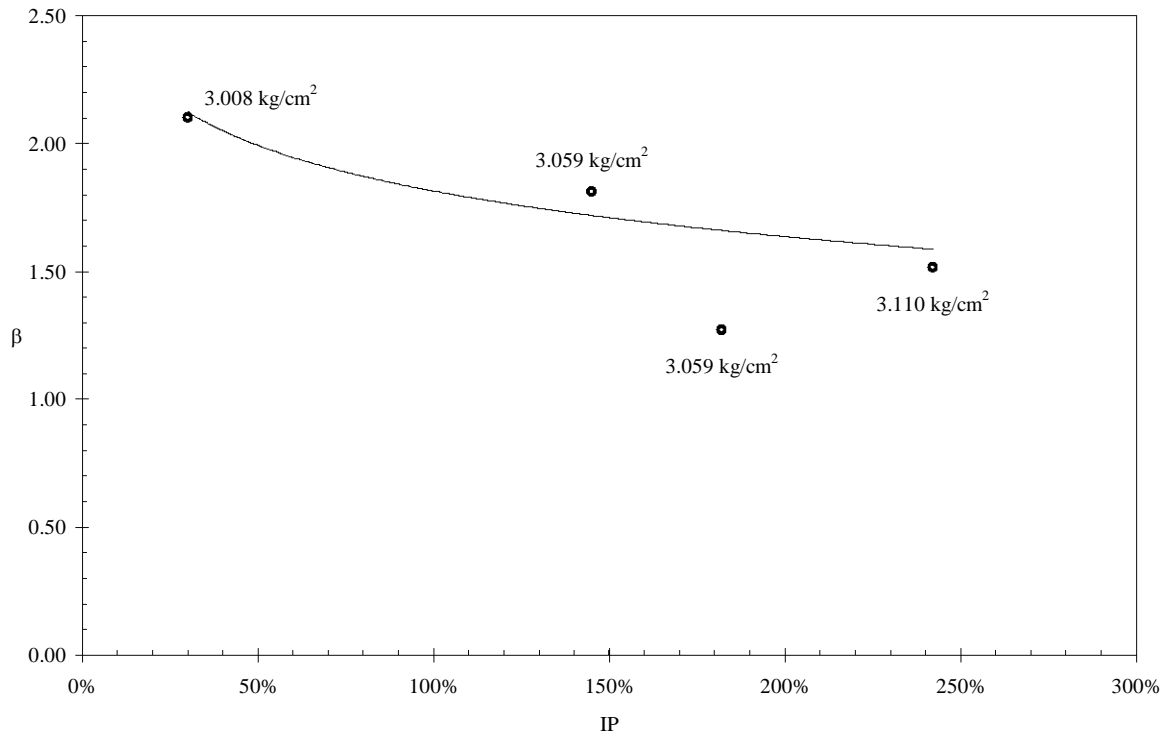




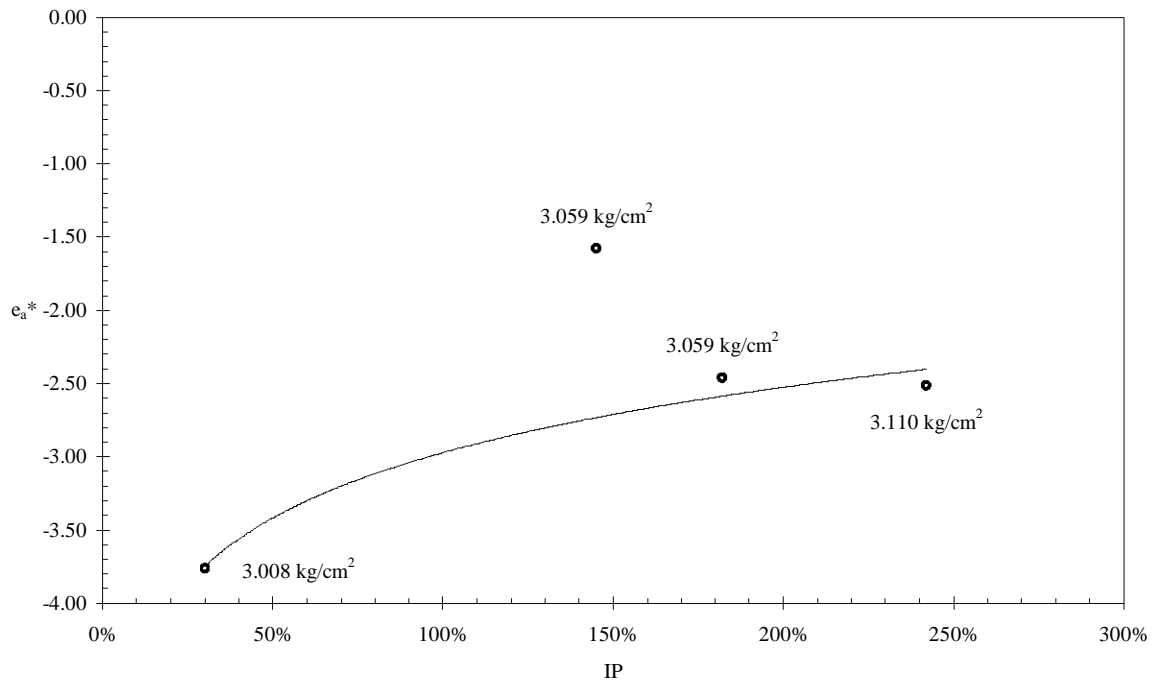
**Fig. 4-54: Variación del parámetro  $x_f$  respecto al  $IP$  para  $\sigma_c \approx \text{cte}$ .**



**Fig. 4-55: Variación del parámetro  $\alpha$  respecto al  $IP$  para  $\sigma_c \approx \text{cte}$ .**



**Fig. 4-56: Variación del parámetro  $\beta$  respecto al  $IP$  para  $\sigma_c \approx \text{cte}$ .**



**Fig. 4-57: Variación del parámetro  $e_a^*$  respecto al  $IP$  para  $\sigma_c \approx \text{cte}$ .**

## 5 CONCLUSIONES.

Como se puede observar en la ec. 2.1-61, la función de sensibilidad “y” es una función en términos de una relación de deformaciones desviadoras naturales, lo que permite su uso tanto en la región pre-pico como en la pos-pico, debido a que la deformación es una variable monotónica, es decir que sólo crece durante el desarrollo de una prueba triaxial típica, además de que su obtención está basada en el PPN, la función se encontraba definida en términos de esfuerzos ec. 2.1-51, lo que hacía imposible su utilización en las regiones pos-pico, además de ser una ecuación de tipo empírica. Ésta es la mejora que se incorpora en los ajustes efectuados a las pruebas realizadas en la arcilla de Weald, las cuales ya habían sido interpretadas anteriormente utilizando la función de sensibilidad en términos de esfuerzos (Juárez Badillo 1965 y 1969).

Cabe señalar que ninguna de las curvas esfuerzo – deformación experimentales de la arcilla de Weald presentó pico, siendo descritas por la función normal pre – pico ( $y_N$ ), así como las de la arcilla de la ciudad de México reconstituida y las de la arcilla caolinita con esfuerzos confinantes bajos.

El valor  $x_f$  se incremento con el OCF como se esperaba, a excepción de algunos ensayos CD, principalmente en los que se realizaron variando el esfuerzo radial. Los valores de este parámetro en las pruebas drenadas AI se incrementaron de 1.18 a 1.62 para un OCF = 1 a 8.32 (OCR = 1 a 24), para las pruebas AD se incremento de 0.56 a 0.76, para las pruebas RI,  $x_f$  varió de 1.29 a 2.06; para las pruebas RD  $x_f$  varió de 0.53 a 0.60 (Fig. 3-33) y para las pruebas no drenadas de compresión  $x_f$  varió de 0.61 a 3.32 y para las de extensión  $x_f$  varió de 0.49 a 3.34 (Fig. 3-3).

El valor de  $\mu$  crece en general con el OCF tanto para las pruebas CU como CD, sin embargo, para algunas pruebas drenadas el valor de este parámetro disminuyó respecto al valor anterior del OCF involucrado en la prueba(Fig. 3-31), no así en las pruebas no drenadas, en las cuales esta situación no se presentó (Fig. 3-2).

El valor del parámetro  $\alpha$  presenta un comportamiento similar a  $\mu$  respecto al OCF en lo que respecta a las pruebas CU, sin embargo en los ensayos CD, esto no fue tan claro, razón por la cual se realizó un segundo ajuste de curvas suponiendo un comportamiento de tipo lineal, esto por ser lo mas simple, lo que permitió vislumbrar un crecimiento del parámetro respecto al OCF; sin embargo, suposiciones de otro tipo de comportamientos como el logarítmico podría arrojar mejores resultados (Fig. 4-36 y Tablas 4-1 a 3).

El parámetro  $\beta$  en las pruebas CU, fue constante con un valor de 1.5 (Fig. 3-5), pero en los ensayos CD, a pesar de que se contempló la posibilidad de que el parámetro fuese igualmente constante, esto no mejoró los ajustes de las curvas teóricas, por lo que se optó por suponer que el parámetro varía de forma lineal, de donde podemos decir que aparentemente el valor de  $\mu$  aumenta para ciertas trayectorias de esfuerzos y disminuye para otras (Fig. 4-35 y Tablas 4-1 a 3).

El valor de  $e_a^*$  crece respecto al OCF en las pruebas CU y en las CD, para las trayectorias AI, AD y CJC, y disminuye en las pruebas RI, RD y EJC, por lo que podemos decir que dicho comportamiento, de aumento o disminución, está influenciado por el tipo de trayectoria de esfuerzos que se utilice (Fig. 4-37 y Tablas 4-1 a 3).

En cuanto a la variación de los parámetros respecto al  $IP$ , no fue posible determinar una ley de variación, debido a que sólo cuatro pruebas fueron realizadas al mismo esfuerzo confinante, un ensayo en la arcilla caolinita y tres de la arcilla de la ciudad de México en estado natural. Evidente es que el  $IP$  es de gran importancia para tratar de agrupar los materiales en función de los parámetros de ajuste; sin embargo, se requiere un mayor número de ensayos en arcilla con diferentes  $IP$  para poder definir una cierta ley de variación.

Por último, nuevamente queda de manifiesto la gran capacidad del Principio de Proporcionalidad Natural, para poder reproducir el comportamiento de los geométricos en pruebas triaxiales; sin embargo, es necesario generar una gran base de datos sobre pruebas triaxiales tanto CU como CD, agrupándolas según su trayectoria de esfuerzos, su  $IP$  y su esfuerzo de confinamiento  $\sigma_c$ , para poder reconocer algún tipo de comportamiento, la cantidad de datos que se manejaron en este trabajo es insuficiente para poder llegar a resultados concluyentes; sin embargo, la información contenida en esta tesis puede ser de utilidad al establecer tendencias de variación de los parámetros involucrados en las ecuaciones teóricas derivadas del PPN.

## 6 REFERENCIAS.

Henkel, D.J. EUA 1960, "The shear strength of saturated remolded clays, ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, pp 533-534.

Hernández C. V. México 1992, "Presión de poro por carga dinámica en arcilla reconstituida de la Ciudad de México, Tesis de Maestría.

Juárez-Badillo, E. (1963). Pore pressure function in saturated soils. Symposium on Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM Special Technical Publication No. 361, Ottawa, Canada, pp 226-249.

Juárez-Badillo, E. (1963). Compressibility of Soils. Simposio del Instituto de Ciencias de la India sobre "Behavior of Soil Under Stress, Bangalore", India.

Juárez-Badillo, E. (1969). Pore pressure and compressibility theory for saturated clays. Specialty session No. 12 on advances in Consolidation theories for Clays, University of Waterloo, Canada, pp 99-116.

Juarez – Badillo, E. 1974 Theory of natural deformation. First Australian Conference on Engineering Materials. The University of New South Wales, Kensington, pp. 465 – 495.

Juárez-Badillo, E. 1975. Constitutive relationships for soils. Symposium on Recent Developments in the Analysis of Soil Behavior and the Application to Geotechnical Structures. The University of New South Wales, Kensington, Australia, pp. 231 – 257.

Juárez-Badillo, E. (1981). General Compressibility equation for soils. X International conference on soil mechanics and foundation engineering, Stockholm, Vol. 1, pp. 171-178.

Juárez-Badillo, E. (1985a). General time volume change equation for soils. XI International conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, Vol. 2, pp. 519-530.

Juárez-Badillo, E. (1985b). General volumetric constitutive equation for geomaterials. Constitutive laws of soils, Report of ISSMFE Subcommittee on Constitutive laws of soils and proceedings of discussion session 1A XI ICSMFE, Japan, pp. 131-135.

Juárez-Badillo, E. (1990). General stress-strain-time equation for soils. Internal report, DEPFI, UNAM, México.

Juárez-Badillo, E. (1994b). Deviatoric stress-strain equation for soils. XIII International conference on soil Mechanics and foundation engineering, New Delhi, India, Vol. 1, pp 349-356.

Juárez-Badillo, E. (1995). General deviatoric stress-strain theory for soils. X Panamerican conference on soil Mechanics and foundation engineering, Guadalajara, México, Vol. 1, pp 204-214.

Juárez-Badillo, E. y Rivera-Constantino, R. 2004. Weald clay. Mathematical characterization of it's undrained behavior.

Juárez Badillo y Rico Rodríguez. (1975), "Comportamiento mecánico de los suelos en la prueba triaxial.", Mecánica de suelos Tomo I, Tercera Edición, Editorial Limusa, pp. 501 – 525.

Mendoza M., Romo M. y Hernández V. (1990) "Características mecánicas de muestras de arcilla inalterada y reconstituida de la Ciudad de México: un análisis comparativo", XV Reunión de Mecánica de Suelos, San Luís Potosí S.L.P., Noviembre.

Nava M. Héctor., México 2004 "Modelación de pruebas de compresión triaxial CU y CD en una arcilla de la Ciudad de México, utilizando un modelo elasto – plástico y el principio de proporcionalidad natural.", Tesis de Maestría.

Rojas, E. Y Romo, M. P. (1993), Modelos Constitutivos utilizados en Geotecnia, UNAM, Instituto de ingeniería, SerieD-36.