

**EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE CORTE Y DE COMPACTACIÓN
DE ARENAS LIMOSAS (SM) Y ARENAS ARCILLOSAS (SC)
CONTAMINADOS CON DERIVADOS DE HIDROCARBURO AL 25%, 50%,
75% Y 100% DE LA POROSIDAD**

**WILSON ÁLVAREZ GÓMEZ
JORGE OMAR CHÁVES SERPA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CÍVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA
2013**

**EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE CORTE Y DE COMPACTACIÓN
DE ARENAS LIMOSAS (SM) Y ARENAS ARCILLOSAS (SC)
CONTAMINADOS CON DERIVADOS DE HIDROCARBURO AL 25%, 50%,
75% Y 100% DE LA POROSIDAD**

**WILSON ÁLVAREZ GÓMEZ
JORGE OMAR CHÁVES SERPA**

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

**DIRECTOR
PhD. MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN**

VISTO BUENO DIRECTOR_____

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CÍVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA**

2013

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por regalarme la oportunidad de vivir una etapa más de mi vida, protegiéndome de los peligros y dándome sabiduría para enfrentar las situaciones adversas de la forma correcta.

A mis padres quienes son mi ejemplo y me educaron para ser siempre una persona íntegra. A mi hermana y mi hermano porque siempre han estado para compartir conmigo alegrías y tristezas toda la vida. A mi sobrina VIOLETA porque es fuente de alegría e inspiración para mejorar cada día. A mi familia en general que siempre está pendiente de mis logros.

A mis abuelos que se que donde estén siempre están enviándome bendiciones, fuerza y compañía en todo momento.

JORGE OMAR CHAVES SERPA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres que me dieron la vida y a Dios que me llevó por el camino del bien y me permitió conocer a las personas adecuadas para decidir estudiar esta bella carrera que me ha dado tantas alegrías.

A el esfuerzo incesante de mi madre TEREZA GOMEZ ROJAS y a mi madrastra ROSA AMELIA MARTINEZ mujeres invencibles que cada día me demostraron que no hay nada imposible y que con sus consejos fortaleció mis principios morales logrando hacer de mí una mejor persona y un mejor profesional.

A mi padre y hermana que siempre me apoyaron y nunca dudaron de mis capacidades y siempre estuvieron alentándome a seguir adelante y nunca flaquear no importaba lo malo que fuera el problema.

WILSON ALVAREZ GOMEZ

AGRADECIMIENTOS

Le doy infinitas gracias a Dios por guiarme por el camino correcto para cumplir con las metas trazadas, dándome fuerzas y sabiduría para crecer como persona todos los días.

Agradezco a mis padres JORGE CHAVEZ Y NANCY SERPA porque siempre mantuvieron la confianza en mis capacidades. Por su apoyo y sacrificio para brindarme todos los días las mejores condiciones durante toda mi etapa universitaria

A la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA por la oportunidad adquirir diversos conocimientos y ayudarme en mi formación integral personal y profesional.

A la PhD MARIA FERNANDA SERRANO por brindarme la oportunidad de participar de esta investigación y su apoyo constante para la realización exitosa del proyecto guiándome en todo momento gracias a su experiencia.

A la ING LUZ MARINA TORRADO por facilitarnos el uso de los laboratorios para la ejecución de esta investigación.

A HELI RUEDA por su orientación y ayuda en cada una de las pruebas realizadas.

A mi compañero WILSON ALVAREZ GOMEZ por su trabajo incansable, dedicación, esfuerzo y disposición para realizar todas las etapas de la investigación y culminar con éxito el paso por la universidad.

JORGE OMAR CHAVES SERPA

AGRADECIMIENTOS

Después de 5 años de esfuerzo, dolores de cabeza, regaños y muchas cosas aprendidas se siente muy bien saber que estas llegando a la meta, que estás por acabar tu carrera como ingeniero civil, que todo aquello que sacrificó tu familia y las personas que te rodean no fue en vano, en este momento sabes que todo valió la pena y no hay nada de que arrepentirse.

Quiero agradecer a mi familia, a los profesores que me apoyaron en lo largo de la carrera como: Claudia Patricia Retamoso, María Fernanda Serrano Guzmán, estas dos docentes sembraron en mí, el hábito de la investigación, de querer conocer un poco más sobre esta hermosa carrera, y mediante sus grupos de investigación aportaron experiencia y conocimientos a mi vida, que son muy valorados y apreciados.

Agradezco a las personas que estuvieron relacionadas en este proyecto como Don Heli Rueda, Luz Marina Torrado por su apoyo a lo largo de esta investigación, todos sus consejos fueron muy acertados y por hacer todo lo posible para que siempre contara con las herramientas necesarias para la realización del presente proyecto.

Para finalizar quiero agradecer de corazón a mi madrastra Rosa Amelia Martínez ya que gracias a ella puede realizar esta carrera y claro está, a mi madre Teresa Gómez Rojas que se esforzó el doble y hasta el triple que las demás personas para que nunca me faltara lo necesario en mi diario vivir.

WILSON ALVAREZ GOMEZ

CONTENIDO

Pág.

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. FORMULACION DEL PROBLEMA	2
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. ALCANCE	4
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	5
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.5. RELEVANCIA DEL ESTUDIO	6
1.6. ORGANIZACIÓN	7
2. CONTEXTO TEÓRICO	8
2.1. ORIGEN DEL SUELO	8
2.1.1. COMPOSICIÓN DEL SUELO	10
2.1.2. QUE ES EL SUELO	11
2.1.3. TIPOS DE SUELOS	12
2.1.4. PRINCIPALES SUELOS EN LA INGENIERIA CIVIL	13
2.1.5. FASES DE SUELO	13
2.1.6. CLASIFICACION DEL SUELO	15
2.1.7. HIDROCARBURO	20
2.1.8. CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS	21
2.2. ARTICULOS RELACIONADOS CON EL PROTECTO A DESARROLLAR QUE RESPALDAN DESDE DIVERSOS PUNTOS DE VISTA LO PLANTEADO EN LA TESIS.	21
2.2.1. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE PETROLEO CRUDO EN LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LOS SUELOS ARCILLOSOS Y ARENOSOS.	21
2.3. ANTECEDENTES	23
2.3.1. SUELOS ARCILLOSOS	23
2.3.2. RESULTADOS OBTENIDOS:	23
2.3.3. SUELOS ORGÁNICOS	25
2.3.4. RESULTADOS OBTENIDOS	25
3. METODOLOGÍA	27
3.1.1. RECOLECCIÓN DEL ACEITE	27

3.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS	28
3.1.3. CONTAMINACIÓN DE LA MUESTRA	29
3.1.4. ENSAYOS REALIZADOS PARA ESCOGER EL TIPO DE MATERIAL PARA EL PROYECTO DE GRADO	32
3.1.5. ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN	32
3.1.6. ENSAYO CORTE DIRECTO	36
4. RESULTADOS OBTENIDOS	44
4.1. ENSAYOS DE CLASIFICACION	44
4.1.1. ARENA ARCILLOSA (SC)	44
4.1.2. ARENA LIMOSA (SM)	46
4.2. ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO	49
4.2.1. ARENA ARCILLOSA (SC)	49
4.2.2. ENSAYOS DE CORTE DIRECTO	71
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	97
5.1. PRÓCTOR	97
5.1.1. ARENA ARCILLOSA (SC)	97
5.1.2. SUELO ARENA LIMOSA (SM)	99
5.2. SUELO ARENA ARCILLOSA (SC) VS SUELO ARENA LIMOSA (SM)	101
5.3. CORTE DIRECTO	102
5.3.1. ARENA ARCILLOSA (SC)	102
5.3.2. SUELO ARENA LIMOSA (SM)	105
5.4. SUELO ARENA ARCILLOSA (SC) VS SUELO ARENA LIMOSA (SM)	108
6. CONCLUSIONES	112
6.1. RESPECTO AL ENSAYO DE COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO	112
6.2. RESPECTO AL ENSAYO DE CORTE DIRECTO	112
7. RECOMENDACIONES	114
8. BIBLIOGRAFÍA	115

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1: PROCESO DE METEORIZACIÓN DE LAS ROCAS.....	9
FIGURA 2: ESQUEMA DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE LOS SUELOS	10
FIGURA 3: COMPONENTES DEL SUELO.....	10
FIGURA 4: COMPOSICIÓN DEL SUELO EN PORCENTAJE	11
FIGURA 5: EJEMPLO DE SUELO INORGÁNICO	12
FIGURA 6: EJEMPLO DE SUELO ORGÁNICO	13
FIGURA 7: FASES DEL SUELO.....	14
FIGURA 8: ESTADOS DEL SUELO	14
FIGURA 9: SISTEMA DE CLASIFICACIÓN UNIFICADO (SUCS).....	17
FIGURA 10: CARTA DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE	19
FIGURA 11: CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN AASHTO.....	20
FIGURA 12: RESULTADOS ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO	24
FIGURA 13: RESULTADOS ENSAYO CORTE DIRECTO.....	24
FIGURA 14: RESULTADOS CORTE DIRECTO A 15 Y 45 DÍAS.	25
FIGURA 15 : RESULTADOS PRÓCTOR MODIFICADO A 15 Y 45 DÍAS.....	26
FIGURA 16 : ARENA LIMOSA (SM) AL 25% VS ARENA LIMOSA (SM) AL 50%.....	27
FIGURA 17: MATERIAL CONTAMINADO AL 25% Y 50%.....	28
FIGURA 18 : MATERIAL VIRGEN	28
FIGURA 19: PROCESO DE CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS.....	29
FIGURA 20 : VERTIMIENTO DEL CRUDO SOBRE EL MATERIAL VIRGEN.....	30
FIGURA 21: MEZCLADO DEL MATERIAL VIRGEN CON EL CRUDO	30
FIGURA 22 : MATERIAL CONTAMINADO AL 50%	30
FIGURA 23: PROCESO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD DEL MATERIAL	33
FIGURA 24: DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE EL USO DE LA ESTUFA ELÉCTRICA.....	33
FIGURA 25: SE OBSERVA EL SECADO DE LA MUESTRA AL SOL.	33
FIGURA 26: MEZCLADO DEL MATERIAL CON EL PORCENTAJE DE AGUA DETERMINADO PARA ALCANZAR LA HUMEDAD ÓPTIMA	34
FIGURA 27: DIFERENCIAS ENTRE LOS SUELOS CONTAMINADOS AL 25% Y 50%.....	34
FIGURA 28 : SE MUESTRA LA COMPACTACIÓN DEL PRÓCTOR MODIFICADO.....	35
FIGURA 29 : SE PUEDE OBSERVAR UN PRÓCTOR TERMINADO, DEBIDAMENTE ENRAZADO.	35
FIGURA 30 : MÁQUINA DE CORTE DIRECTO DIGITAL.....	36
FIGURA 31: MUESTRA PARA ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	37
FIGURA 32 : MUESTRA DEL MATERIAL ARENA ARCILLOSA (SC)	37
FIGURA 33 : MUESTRA DESPUÉS DE SALIR DE LA MÁQUINA DE CORTE DIRECTO	38
FIGURA 34: MUESTRA VISTA DESDE EL LADO LATERAL , DESPUÉS DE SALIR DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	38
FIGURA 35 : MUESTRA FRACTURADA DESPUÉS DE HABÉRSELE REALIZADO EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	38
FIGURA 36 : COMO DEBE QUEDAR LA MUESTRA AL SALIR DEL MOLDE DE LA MÁQUINA DE CORTE DIRECTO, AL TERMINAR EL ENSAYO.....	38

FIGURA 37: MÁQUINAS DE CORTE DIRECTO ELECTRÓNICO.	39
FIGURA 38 : PROCEDIMIENTO DE INSERCIÓN DE LOS MOLDES DE LAS PASTILLAS	40
FIGURA 39 : PENETRACIÓN DE LAS MOLDES DE LAS PASTILLAS EN EL PRÓCTOR	40
FIGURA 40: FORMA EN LA QUE DEBEN QUEDAR LAS PASTILLAS DENTRO DEL PRÓCTOR	41
FIGURA 41: EXTRACCIÓN DE LAS PASTILLAS	41
FIGURA 42: GRANULOMETRÍA DE LA ARENA ARCILLOSA (SC).....	45
FIGURA 43: CLASIFICACIONES DE CASAGRANDE PARA LA ARENA ARCILLOSA (SC) ...	46
FIGURA 44: GRANULOMETRÍA DE LA ARENA LIMOSA (SM)	48
FIGURA 45: CLASIFICACIÓN DE CASAGRANDE PARA LA ARENA LIMOSA SM	49
FIGURA 46 : SUELO VIRGEN ENSAYO DE PRÓCTOR 1	50
FIGURA 47: SUELO VIRGEN ENSAYO DE PRÓCTOR 2	50
FIGURA 48 : SUELO VIRGEN ENSAYO DE PRÓCTOR 3.....	51
FIGURA 49: SUELO VIRGEN ENSAYO DE PRÓCTOR 4	51
FIGURA 50: SUELO VIRGEN ENSAYO DE PRÓCTOR 5	52
FIGURA 51: SUELO CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR 1	53
FIGURA 52: SUELO CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR 2.....	54
FIGURA 53: SUELO CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR 3.....	54
FIGURA 54: SUELO CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR 4.....	55
FIGURA 55: SUELO CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR 5.....	55
FIGURA 56: SUELO CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR 1	57
FIGURA 57: SUELO CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR 2.....	57
FIGURA 58: SUELO CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR 3.....	58
FIGURA 59: SUELO CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR 4.....	58
FIGURA 60: SUELO CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR 5.....	59
FIGURA 61 : EXTRACCIÓN DE UNA MUESTRA DEL MATERIAL CONTAMINADO AL 100%.60	
FIGURA 62: EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA DE MATERIAL CONTAMINADO AL 100% 2...60	
FIGURA 63: ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN. ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 1	61
FIGURA 64: ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN. ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 2.....	62
FIGURA 65: ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN. ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 3.....	62
FIGURA 66: ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN. ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 4.....	63
FIGURA 67: ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN. ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 5.....	63
FIGURA 68: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 1	64
FIGURA 69: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 2.....	65
FIGURA 70: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 3.....	65
FIGURA 71: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 4.....	66
FIGURA 72: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 5.....	66
FIGURA 73: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 1	68
FIGURA 74: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 2.....	68

FIGURA 75: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 3.....	69
FIGURA 76: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 4.....	69
FIGURA 77: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50% ENSAYO DE PRÓCTOR MODIFICADO 5.....	70
FIGURA 78: ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 1	71
FIGURA 79: ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 2	72
FIGURA 80: ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 3	73
FIGURA 81: ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 4	73
FIGURA 82: ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 5	74
FIGURA 83: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 1	75
FIGURA 84: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 2	76
FIGURA 85: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 3	77
FIGURA 86: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 4	77
FIGURA 87: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 5	78
FIGURA 88: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 1	80
FIGURA 89: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 2	80
FIGURA 90: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 3	81
FIGURA 91: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 4	82
FIGURA 92: ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 5	82
FIGURA 93: SUELO ARENA LIMOSA (SM) SIN CONTAMINAR, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 1.....	84
FIGURA 94: SUELO ARENA LIMOSA (SM) SIN CONTAMINAR, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 2.....	85
FIGURA 95: SUELO ARENA LIMOSA (SM) SIN CONTAMINAR, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 3.....	85
FIGURA 96: SUELO ARENA LIMOSA (SM) SIN CONTAMINAR, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 4.....	86
FIGURA 97: SUELO ARENA LIMOSA (SM) SIN CONTAMINAR, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 5.....	87
FIGURA 98: SUELO ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 1	88
FIGURA 99: SUELO ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 2	89

FIGURA 100: SUELO ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 3	90
FIGURA 101: SUELO ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 1	92
FIGURA 102: SUELO ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 2	93
FIGURA 103: SUELO ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 3	93
FIGURA 104: SUELO ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 4	94
FIGURA 105: SUELO ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%, ENSAYO DE CORTE DIRECTO 5	95
FIGURA 106: ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE PRÓCTOR EN EL ARENA ARCILLOSA (SC).....	97
FIGURA 107: ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE PRÓCTOR EN LA ARENA ARCILLOSA (SC) RESPECTO AL PESO ESPECÍFICO.	98
FIGURA 108: ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE PRÓCTOR EN EL SUELO ARENA LIMOSA (SM)	99
FIGURA 109: ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE PRÓCTOR EN LA ARENA LIMOSA (SM) RESPECTO AL PESO ESPECÍFICO.	100
FIGURA 110: ARENA LIMOSA (25%) VS ARENA ARCILLOSA (25%) BASADO EN LOS ENSAYOS DE PRÓCTOR MODIFICADO	101
FIGURA 111: ARENA LIMOSA (50%) VS ARENA ARCILLOSA (50%) BASADO EN LOS ENSAYOS DE PRÓCTOR MODIFICADO	102
FIGURA 112: τ PROM (KG/CM ²) VS σ PROM (KG/CM ²)	103
FIGURA 113: ÁNGULO DE FRICCIÓN VS % CONTAMINACIÓN	104
FIGURA 114: COHESIÓN VS % CONTAMINACIÓN.....	105
FIGURA 115: SUELO ARENA LIMOSA (SM)	106
FIGURA 116: ÁNGULO DE FRICCIÓN VS % CONTAMINACIÓN SUELO ARENA LIMOSA (SM)	107
FIGURA 117: COHESIÓN VS % CONTAMINACIÓN SUELO ARENA LIMOSA (SM).....	108
FIGURA 118: ÁNGULO DE FRICCIÓN ARENA ARCILLOSA (SC) VS ARENA LIMOSA (SM)	110
FIGURA 119: COHESIÓN DE LAS ARENA ARCILLOSA (SC) VS ARENA LIMOSA (SM) ...	111

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1: METODOLOGÍA CONTAMINACIÓN MATERIAL	31
TABLA 2: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADA AL 25% CON DIVERSOS INTERVALOS DE TOMA DE LECTURAS	42
TABLA 3: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADA AL 25% CON INTERVALOS DE LECTURAS IDEALES.....	42
TABLA 4: ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50% CON DIVERSOS INTERVALOS DE LECTURAS.....	43
TABLA 5: GRANULOMETRÍA DE LA ARENA ARCILLOSA (SC)	44
TABLA 6 : ÍNDICE DE PLASTICIDAD ARENAS ARCILLOSA (SC)	45
TABLA 7 : GRANULOMETRÍA PARA LA ARENA LIMOSA SM.....	47
TABLA 8 : ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LA ARENA LIMOSA (SM).....	48
TABLA 9: PROMEDIO PRÓCTOR ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN	52
TABLA 10: PROMEDIO PRÓCTOR ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%.....	56
TABLA 11: PROMEDIO PRÓCTOR ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%.....	59
TABLA 12: PROMEDIO PRÓCTOR ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN	64
TABLA 13: PROMEDIO PRÓCTOR ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25%	67
TABLA 14: PROMEDIO PRÓCTOR ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%	70
TABLA 15: CORTE 1 ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN.....	72
TABLA 16: CORTE 2 ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN.....	72
TABLA 17: CORTE 3 ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN.....	73
TABLA 18: CORTE 4 ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN.....	74
TABLA 19: CORTE 5 ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN.....	74
TABLA 20: RESUMEN CORTE DIRECTO ARENA ARCILLOSA (SC) VIRGEN	75
TABLA 21: CORTE 1 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%	76
TABLA 22: CORTE 2 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%	76
TABLA 23: CORTE 3 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%	77
TABLA 24: CORTE 4 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%	78
TABLA 25: CORTE 5 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%	78
TABLA 26: RESUMEN CORTE DIRECTO ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 25%	79
TABLA 27: CORTE 1 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%	80
TABLA 28: CORTE 2 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%	81
TABLA 29: CORTE 3 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%	81
TABLA 30: CORTE 4 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%	82
TABLA 31: CORTE 5 ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%	83
TABLA 32: RESUMEN CORTE DIRECTO ARENA ARCILLOSA (SC) CONTAMINADO AL 50%	83
TABLA 33: CORTE 1 ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN	84
TABLA 34: CORTE 2 ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN	85
TABLA 35: CORTE 3 ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN	86
TABLA 36: CORTE 4 ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN	86
TABLA 37: CORTE 5 ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN	87
TABLA 38: PROMEDIO CORTE ARENA LIMOSA (SM) VIRGEN	87

TABLA 39: CORTE 1 ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25%	89
TABLA 40: CORTE 2 ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25%	89
TABLA 41: CORTE 3 ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25%	90
TABLA 42: MUESTRAS DE MATERIAL ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25% QUE NO FALLARON.....	91
TABLA 43: PROMEDIO CORTE ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 25%.....	91
TABLA 44: CORTE 1 ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%	92
TABLA 45: CORTE 2 ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%	93
TABLA 46: CORTE 3 ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%	94
TABLA 47: CORTE 4 ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%	94
TABLA 48: CORTE 5 ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%	95
TABLA 49: MUESTRAS DE MATERIAL ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50% QUE NO FALLARON.....	96
TABLA 50: PROMEDIO CORTE ARENA LIMOSA (SM) CONTAMINADO AL 50%.....	96
TABLA 51: RESULTADOS DE ARENA ARCILLOSA (SC) DEL PRÓCTOR MODIFICADO	97
TABLA 52 : RESULTADOS DE LOS PESOS ESPECÍFICOS DE LOS ENSAYOS DE PRÓCTOR MODIFICADO EN LA ARENA ARCILLOSA (SC).	98
TABLA 53: RESULTADOS DEL SUELO ARENA LIMOSA (SM) DEL PRÓCTOR MODIFICADO	99
TABLA 54 : RESULTADOS DE LOS PESOS ESPECÍFICOS DE LOS ENSAYOS DE PRÓCTOR MODIFICADO EN LA ARENA LIMOSA (SM).	100
TABLA 55: RESULTADOS DE LA ARENA ARCILLOSA (SC) EN EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO	102
TABLA 56: RESULTADOS DEL SUELO ARENA LIMOSA (SM) EN EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO	106
TABLA 57: RESULTADOS DEL ARENA ARCILLOSA (SC).....	109
TABLA 58: RESULTADOS DEL SUELO ARENA LIMOSA (SM).....	109

RESUMEN

TITULO: EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE CORTE Y DE COMPACTACIÓN DE ARENAS LIMOSAS (SM) Y ARENAS ARCILLOSAS (SC) CONTAMINADAS CON DERIVADOS DE HIDROCARBURO AL 25%, 50%, 75% Y 100% DE LA POROSIDAD.

AUTORES: WILSON ALVAREZ GOMEZ
JORGE OMAR CHAVES SERPA

FACULTAD: INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR: PhD. MARIA FERNAND SERRANO GUZMAN

Debido a los procesos de explotación y transporte de hidrocarburos, los suelos se encuentran expuestos a ser contaminados por efecto de los derrames como consecuencia de diferentes problemáticas, ya sean de orden social, técnico o ambiental, en el proceso de transporte. La acción efectiva y rápida cuando se presentan incidentes ayuda para la mitigación de los daños que puedan ser ocasionados, sin embargo, no en todos los casos las soluciones son suficientes para evitar efectos no recuperables sobre el ambiente.

El presente trabajo desarrollo metodologías para comparar los cambios en las propiedades mecánicas evaluadas mediante los ensayos de compactación próctor modificado y corte directo en arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC) debido a la contaminación. Las pruebas se rigieron por las normas del instituto nacional de vías, INVIAS. Los materiales fueron contaminados, cada uno, en porcentajes de 25%, 50%, 75% y 100% de la porosidad con crudo y aceite suministrado por Ecopetrol en marzo del 2013.

Debido al contaminante, los suelos adoptaban características que no eran propias de ellos, por lo cual fue necesario realizar ajustes en la metodología de los ensayos para recrear los eventos de forma más real y precisa.

Los resultados obtenidos mostraron variaciones en las propiedades mecánicas estudiadas, sin embargo el efecto de la contaminación de los hidrocarburos sobre los suelos fue diferente para cada uno.

PALABRAS CLAVES: HIDROCARBUROS, CONTAMINACIÓN, SUELOS, COMPACTACIÓN, CORTE DIRECTO

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE PARAMETERS OF SHEAR AND COMPACTION ON SILTY SAND (SM) AND CLAYEY SAND (SC) CONTAMINATED WITH HYDROCARBON DERIVATIVES TO 25 %, 50 %, 75 % AND 100 % OF POROSITY.

AUTHORS: WILSON ALVAREZ GOMEZ
JORGE OMAR CHAVES SERPA

FACULTY: CIVIL ENGINEERING

DIRECTOR: PhD. MARIA FERNAND SERRANO GUZMAN

Because the processes of exploitation and transportation of hydrocarbons, the soils are liable to be contaminated from spills due to different problems, whether social, technical and environmental, in the transport process. The quick and effective action when incidents occur helps to mitigate the damage that may be caused; however, in all cases the solutions are not enough to prevent unrecoverable effects on the environment.

This paper development methodologies to compare changes in the mechanical properties assessed by the modified próctor compaction and direct shear tests on silty sand and clayey sand due to pollution. The tests were governed by the rules of the Instituto nacional de vias, INVIAS. Soils were contaminated, each one, in percentage of 25%, 50 %, 75 % and 100% of porosity with crude and oil supplied by Ecopetrol in March 2013.

Due to pollution, soils adopted characteristics were not specific to them, then, it was necessary to make adjustments to the methodology of tests to recreate the events more realistically and accurately.

The results showed variations in mechanical properties tested, however the effect of pollution of the hydrocarbons on soils was different for both of them.

KEYWORDS: HYDROCARBONS, POLLUTION, SOILS, COMPACTION, DIRECT SHEAR.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un sitio donde se encuentra diferentes tipos de yacimientos de, entre otros, minerales, carbón, gas o petróleo. Este último puede ser descompuesto en infinidad de actividades, herramientas y productos los cuales ayudan a las necesidades diarias de los seres humanos. No obstante la mayoría de las actividades de exploración, producción y transporte de hidrocarburos se hace en zonas frágiles y de abundante biodiversidad (variedad de especies animales y vegetales). Debido a que el recurso debe ser refinado para su comercialización, este debe ser transportado de la zona de explotación a las refinerías y de estas a los sitios de mercadeo del hidrocarburo.

Por esta razón es necesario de oleoductos que trasladen el hidrocarburo, pero estos sufren con frecuencia averías, ataques de terroristas, entre muchos más problemas, y debido a este inconveniente el hidrocarburo (formado a partir átomos de carbono e hidrogeno) puede afectar seriamente el lugar donde este se derrame y un derrame hace referencia a toda aquella sustancia que es vertida, la cual se pone en contacto con el medio ambiente y no se tiene control de esta.

Un derrame está compuesto por las siguientes fases: evaporación, disolución, sedimentación, biodegradación. Todas estas ocurren cuando el hidrocarburo entra en contacto con el suelo o el agua. Este proyecto estará enfocado a la contaminación del suelo por hidrocarburos y a sus efectos negativos en el mismo.

El objetivo del proyecto es observar y analizar los efectos del hidrocarburo sobre arenas arcillosas (SC) y arenas limosas (SM), sometidos a ensayos de corte directo y compactación, tanto a los suelos vírgenes como contaminados con 25%, 50%, 75% y 100% de la porosidad y así se pueda determinar los cambios que sufre el suelo.

1.1. FORMULACION DEL PROBLEMA

Desde la revolución industrial, la calidad de vida de las personas y el medio ambiente se vieron afectados drásticamente por la explotación de combustibles fósiles, así mismo, las formas de producción de bienes y servicios prestados a las personas cambiaron, para enfocarse en la quema de hidrocarburos, lo cual, en su época parecía la solución a todos los problemas que afrontaban y así la civilización adoptó un sistema de vida de consumo de estos minerales.

Desde la época mencionada anteriormente, se pudo evidenciar un desarrollo mundial abrumador en todo sentido, pero, así mismo esto se ve reflejado en la contaminación de nuestro ecosistema, mediante los derrames de petróleo, las lluvias ácidas, la excesiva cantidad de CO₂ emitida por los automóviles, y aunque se han presentado grandes avances en energías limpias en el mundo con las cuales se pueden ver muy buenos resultados, aún seguimos dependiendo de los combustibles fósiles para nuestro desarrollo.

Al observar esta problemática surgen ciertas preguntas: ¿Qué sucede con todos aquellos suelos que fueron contaminados por los hidrocarburos, ya sea de forma accidental o intencional?, ¿Cómo se ven afectadas sus propiedades mecánicas?, ¿Cómo afectan las estructuras en las cuales fueron utilizados?, entre otros interrogantes.

Por esta razón se quiere realizar un estudio de los suelos (arenas arcillosas (SC) y arenas limosas (SM)) contaminados con hidrocarburos para conocer cómo cambian sus propiedades mecánicas y así tener un punto de partida para saber cómo trabajar con estos suelos y si pueden ser recuperados para la realización de nuevos proyectos.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Debido a la continua explotación de los yacimientos de los combustibles fósiles, y a su producción surgió la necesidad de transportar este recurso por lugares de difícil acceso y largas distancias, de esta manera se llegó a la solución de grandes y extensas tuberías que lo distribuyeran en los lugares que este era requerido; pero debido a problemas internos del país como la guerra, malos diseños y muchas cosas más, se producen derrames de este líquido sobre fuentes hídricas, campos agrícolas y obviamente el suelo.

A causa de este problema surgieron estudios que arrojaron resultados en los cuales se pudo evidenciar que la resistencia del suelo se afecta en gran medida, sin embargo, estos estudios fueron muy superficiales, por esto se quiere hacer un estudio más a fondo para conocer con más precisión las variaciones en las propiedades mecánicas de los suelos contaminados con hidrocarburos.

Al querer conocer un poco más del tema es necesario ampliar la zona de estudio por esta razón es fundamental conocer el impacto que generan los derrames de crudo en los suelos. De esta forma nace la necesidad de crear los procedimientos para la elaboración de ensayos de suelos contaminados con hidrocarburos ya que no existen pruebas parametrizadas para estos.

Con esto se quiere llegar al punto de saber hasta cuando un suelo puede ser recuperado y así mismo como recobrar la resistencia que este poseía anteriormente; de igual forma parametrizar las pruebas y de esta forma dejar un registro para que las personas tenga un punto de guía en este tema, y claro generar una oportunidad para los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana de prestar los servicios de ensayos de este tipo de suelos.

1.3. ALCANCE

En esta investigación se logró determinar las propiedades mecánicas de los suelos contaminados y no contaminados por hidrocarburos parametrizando los ensayos realizados y de esta forma registrando los datos obtenidos de forma aproximada a las condiciones reales del suelo cuando es afectado por la contaminación de hidrocarburos.

En este caso los suelos fueron sometidos a una serie de pruebas de laboratorio tales como: granulometría, límites líquido y plástico, gravedad específica, próctor modificado y corte directo; siendo contaminados con porcentajes del 25%, 50%, 75% y 100% de la porosidad, pero solo los materiales contaminados al 25% y 50% de la porosidad se dejaron trabajar; mientras los materiales contaminados al 75% y 100% de la porosidad quedaron saturados.

El hidrocarburo fue suministrado por Ecopetrol siguiendo los procedimientos de confidencialidad que tiene la compañía para el manejo de muestras con la reserva en las propiedades fisicoquímicas de la misma.

De esta manera se conocieron las variaciones en las propiedades mecánicas de las muestras en las pruebas anteriormente mencionadas, ya que se realizó para muestras que no habían sido contaminadas; como también para las que fueron contaminadas. Las propiedades mecánicas evaluadas fueron: Humedad óptima de compactación, peso específico seco, relaciones de humedad – masa unitaria seca, resistencia al corte, ángulo de fricción y cohesión.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar las variaciones en los parámetros de corte y de compactación de arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC) contaminados con derivados de hidrocarburos en concentraciones al 25%, 50%, 75% Y 100% de la porosidad.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades mecánicas de las muestras de arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC).
- Evaluar los parámetros de corte y de compactación de arenas arcillosas (SC) contaminados con hidrocarburo en concentraciones al 25%, 50%, 75% Y 100%de la porosidad
- Evaluar los parámetros de corte y de compactación de arenas limosas (SM) contaminados con hidrocarburo en concentraciones al 25%, 50%, 75% Y 100% de la porosidad
- Documentar los procedimientos de ensayo para los suelos contaminados de acuerdo a las normas técnicas.
- Comparar las variaciones presentadas en las propiedades mecánicas del suelo.

1.5. RELEVANCIA DEL ESTUDIO

Este estudio ha sido cofinanciado por Colciencias según convenio de cooperación Cód. 120056132840 CT-0078-2013. Adicionalmente, en el marco del convenio con Ecopetrol ICP 5211508 serán incluidas en un estudio complementario posterior pruebas de suelos contaminados con glicerina y está programado realizar un curso para hacer la transferencia del conocimiento aprendido a las nuevas generaciones. Este curso se ofrecerá entre el 25 de noviembre y el 6 de diciembre del presente año.

1.6. ORGANIZACIÓN

El presente trabajo está organizado por capítulos la siguiente manera:

El primer capítulo está conformado por: una introducción, justificación, planteamiento del problema, alcance, Objetivo generales y específicos.

El segundo capítulo define los elementos teóricos necesarios para el desarrollo de este trabajo con énfasis en los suelos y los hidrocarburos (aceite).

El tercer capítulo muestra la metodología que se utilizó en la realización del proyecto, ilustrando los procedimientos que se realizaron en los diversos ensayos de laboratorio.

El cuarto y quinto capítulo exponen los resultados obtenidos a lo largo de la investigación y sus respectivos análisis.

El sexto capítulo expone las conclusiones pertinentes a las que se llegaron a lo largo del estudio.

El séptimo capítulo contiene recomendaciones para el desarrollo de proyectos similares.

El octavo capítulo incluye los anexos correspondientes a los cálculos realizados en cada ensayo.

2. CONTEXTO TEÓRICO

Teniendo en cuenta que en el estudio intervienen las variables suelo e hidrocarburo, este capítulo contempla ambos conceptos. Adicionalmente se mencionan los medios por los cuales se pueden causar contaminación por los derivados de hidrocarburos.

2.1. ORÍGEN DEL SUELO

La mayoría de los suelos cubren la tierra están formados por la meteorización de las rocas. Los geólogos emplean el termino meteorización de las rocas para descubrir todos los procesos externos, por medio de los cuales la roca experimenta descomposición química y desintegración física, proceso median el cual masas de roca se rompen en fragmentos pequeños. Esta fragmentación continua es un mero cambio físico y por eso se llama también meteorización mecánica. Por otra parte, la meteorización química de una roca es un proceso de descomposición, mediante el cual los minerales constituidos de rocas allí presentes cambian de composición química. [1]

En la descomposición, los minerales persistentes se transforman en minerales de composición y propiedades físicas diferentes. Es precisa indicar que la desintegración física completa la descomposición, ya que los minerales y partículas rocosas de menor tamaño producidos por meteorización mecánica son mucho más susceptibles al cambio químico que los granos minerales firmemente soldados en grandes masas de roca compacta.[1]

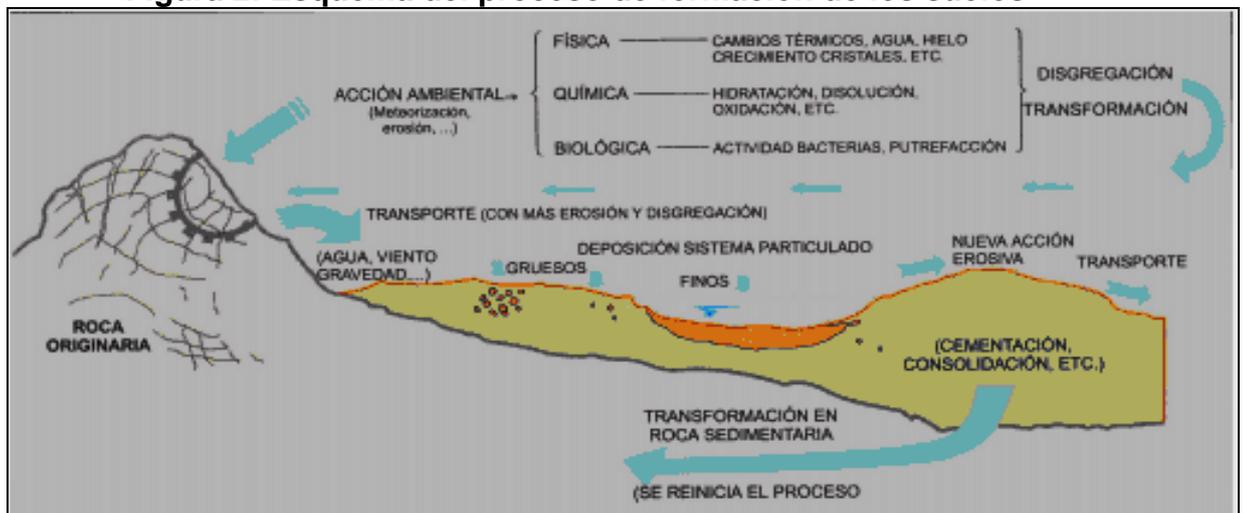
La acción conjunta o individual de estos procesos de meteorización, como se describe en la figura 1, da lugar a un perfil de meteorización de la roca en función de la profundidad, el cual se observa y explica en la siguiente figura, donde el perfil de roca sana ocupa la zona más profunda, transformándose gradualmente a suelo hacia la parte más superficial. [1]

Figura 1: Proceso de meteorización de las rocas

LOVE (1951) LITTLE (1961)	VARGAS (1951)	SOWERS (1954-1963)	CHANDLER (1969)	GEOLOGICAL SCC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)
ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS BASÁLTICAS Y ARENISCAS	ÍGENAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS ÍGNEAS	ÍGENAS Y METAMÓRFICAS
VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	IV COMPLETAMENTE ALTERADA	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA S. RESIDUAL HORIZONTE IB
V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	IV PARCIALMENTE ALTERADA	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL (SAPROLÍTICO) IC
IV ALTAMENTE ALTERADA	CAPAS DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA	III PARCIALMENTE ALTERADA	IV ALTAMENTE ALTERADA	ZONA DE TRANSICIÓN IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
III MODERADAMENTE ALTERADA				III MODERADAMENTE ALTERADA	
II ALGO ALTERADA			II PARCIALMENTE ALTERADA	II DEVILMENTE ALTERADA IB MUY POCO ALTERADA	
I ROCA SANA	ROCA SANA	ROCA INALTERADA	ROCA INALTERADA	IA ROCA SANA	ROCA SANA

Fuente: Tomada y adaptada de [1]

Figura 2: Esquema del proceso de formación de los suelos

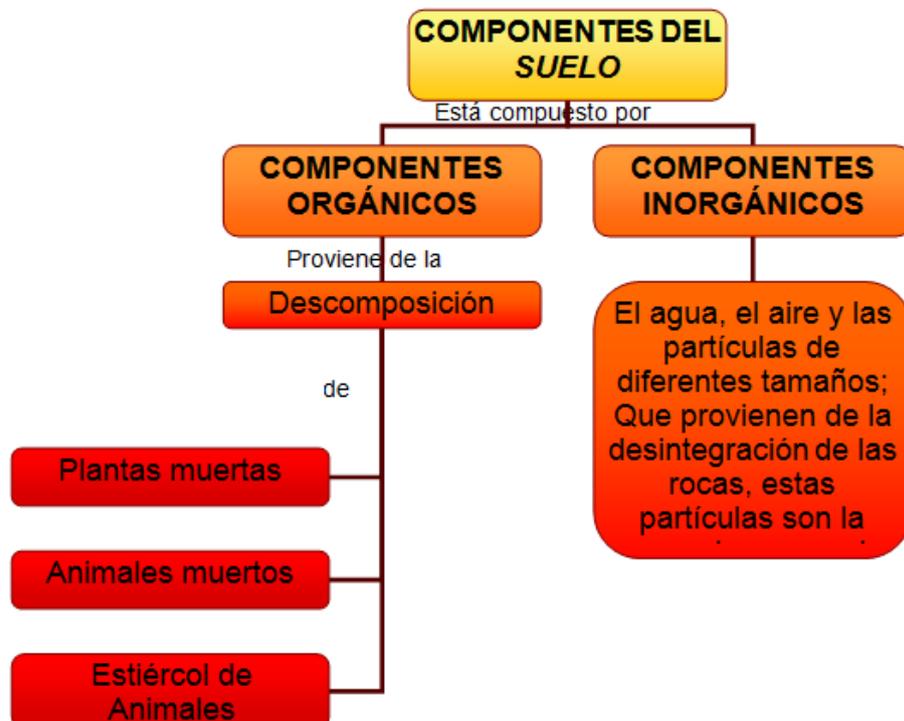


Fuente: [1]

2.1.1. COMPOSICIÓN DEL SUELO

La distribución de los diferentes entes o materias que participan en la composición del suelo será descrita a través de la figura 3, la cual muestra la composición del suelo y así mismo cómo están conformados sus diferentes componentes.

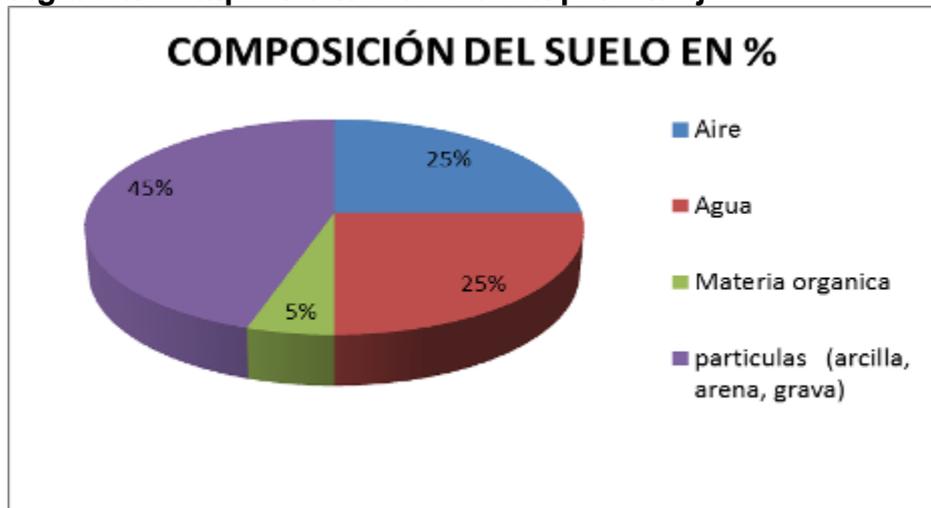
Figura 3: Componentes del suelo



Fuente: Autor

En la figura 4 se puede apreciar la composición del suelo, mediante la distribución de porcentajes los cuales corresponden al aire, agua, materia orgánica partículas.

Figura 4: Composición del suelo en porcentaje



Fuente: Autor

2.1.2. QUE ES EL SUELO

El suelo, propiamente dicho, es la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que se asientan sobre ella. [2]

Entre los diferentes agentes físicos que producen cambios en las rocas para dar paso a la creación del suelo, se pueden encontrar:

- El agua
- El sol
- El viento
- Los glaciares[2]

Los agentes químicos que producen cambios en las rocas para dar paso a la creación del suelo son:

- La oxidación
- La carbonatación
- La hidratación[2]

Como material de construcción es el más abundante del mundo y siempre que se emplee, el ingeniero debe escoger el tipo adecuado así como el método de colocación. [3]

Dada la complejidad e infinita variedad con que los suelos aparecen en la naturaleza, cualquier intento de sistematización científica debe ser precedido por otro de clasificación completa. Un sistema de clasificación que pretenda cubrir las necesidades correspondientes debe estar basado a las propiedades mecánicas de los suelos, por ser estas fundamentales para las aplicaciones ingenieriles. [3]

2.1.3. TIPOS DE SUELOS

De acuerdo al origen del suelo se puede observar dos grandes grupos en los cuales podemos agrupar estos; suelos cuyo origen se debe a la descomposición física o química de las rocas ósea los suelos inorgánicos, y los suelos cuyo origen es orgánico. [2]

2.1.3.1 Suelos inorgánicos

Es el producto del intemperismo de las rocas permanente en el sitio donde se formó, da origen a un suelo residual; en caso contrario, forman un suelo transportado, cualquiera que hay sido el agente transportador (por gravedad: taludes; por agua; por viento; depósitos glaciales.) como se puede apreciar en la figura 5, el color y forma que posee un suelo inorgánico. [2]

Figura 5: Ejemplo de suelo inorgánico



Fuente: [4]

2.1.3.2 Suelos orgánicos

Estos se forman casi siempre in situ. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta, o en su estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico que las propiedades que pudieran derivar de la porción orgánica quedan eliminadas. [2]

En la figura 6 se puede apreciar la tonalidad que posee un suelo orgánico y aquellas características que son superficiales. [2]

Figura 6: Ejemplo de suelo orgánico



Fuente: [5]

2.1.4. PRINCIPALES SUELOS EN LA INGENIERIA CIVIL

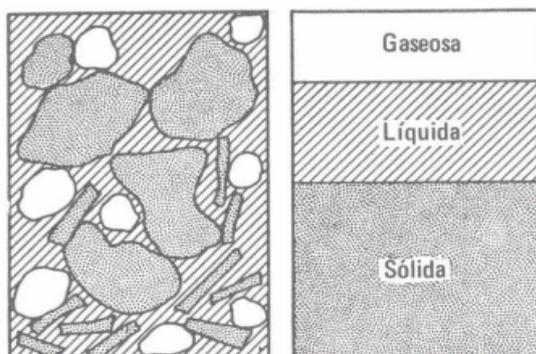
A continuación se describen los suelos más comunes con los nombres generalmente utilizados por el ingeniero civil para su identificación en campo.

- **Gravas:** Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen, son acarreadas por el agua, por esta razón sufren desgaste en sus aristas y son redondas, Este ocupa grandes extensiones por lo usual y suele encontrarse en los lechos, en las márgenes y en los conos de deyección de los ríos. [2]
- **Arenas:** son todos los granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro. Su existencia es análoga a la de las gravas, pues estas suelen encontrarse en los mismos depósitos. [2]
- **Limos:** Son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limos inorgánicos como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. [2]
- **Arcillas:** Se le conoce como arcilla a todas aquellas partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. [2]

2.1.5. FASES DE SUELO

El suelo constituye un sistema de varias fases. La siguiente figura 7 muestra un elemento típico de suelo que contiene las 3 fases que caracterizan el suelo: La sólida (partículas minerales), líquida (agua) y gaseosa (aire o gases). [1]

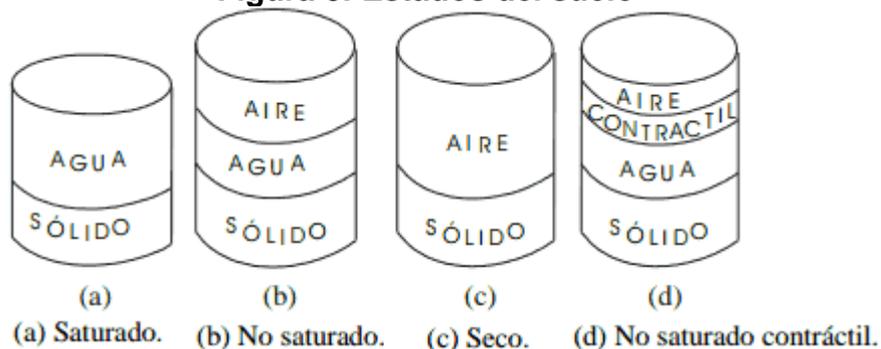
Figura 7: Fases del suelo



Fuente: [1]

En la figura 8 se puede apreciar los diferentes estados del suelo, al entrar en contacto con el agua, aire, entre otras.

Figura 8: Estados del suelo



Fuente: [6]

- **Suelo saturado:** Este estado del suelo contiene únicamente dos fases, la sólida y líquida, se le conoce como saturado porque todos los espacios vacíos están llenos de agua. [6]
- **Suelo no saturado:** Este es conocido también como suelo húmedo. Posee la fase sólida, líquida y gaseosa simultáneamente. Los vacíos están ocupados por aire y agua. [6]
- **Suelo seco:** Este suelo solo cuenta con dos fases, la fase sólida y gaseosa, es decir que el suelo no contiene agua. [6]
- **Suelo no saturado contráctil:** Este incluye las tres fases ya conocida aparte de otras denomina contráctil. Esta cuarta fase es independiente y llega originalmente como resultado de la interface aire-agua, su problema predominante es su expansión y contracción, por lo que su estudio entra en otra categoría de la mecánica de suelos. [6]

2.1.6. CLASIFICACION DEL SUELO

Debido a la necesidad de conocer con qué tipo de suelo contamos bajo nuestros pies, para emplearlos en determinadas tareas nace la necesidad de clasificarlos mediante sistemas; algunos de estos son: [7]

- Sistema de clasificación Unificado USCS -> No está diseñado para ser limitado a ninguna clase de proyecto.
- Sistema de clasificación AASHTO -> Está diseñado para la construcción de carreteras.
- Sistemas de clasificación de aeropuertos [7]

2.1.6.1 Sistema de clasificación Unificado SUCS

Este sistema está basado en el de aeropuertos, hasta el grado que puede decirse que el mismo con ligeras modificaciones.

El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas. [7]

Los suelos gruesos en este tipo de clasificación se conocen como:

- Gravas y suelos en que predominan estas. Su símbolo genérico G (gravel)
- Arenas y suelos arenosos. Símbolos genéricas S (sand) [7]

Las gravas y las arenas se separan con la malla No 4 de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla No 4, y es del grupo genérico S, en caso contrario. [7]

Los suelos finos se agrupan de manera similar a lo de los suelos gruesos y se utiliza una simbología de letras en mayúsculas y da lugar a las siguientes divisiones:

- Limos inorgánicos, de símbolo genérico M
- Arcilla inorgánicas, de símbolo genérico C
- Limos y arcillas orgánicas, de símbolo genérico O [7]

Debido a estas divisiones de suelos estos tienden a tener subdivisiones las cuáles se interpretan y clasifican de la siguiente forma como lo explica la siguiente figura 9. Los gruesos se clasifican en: Arenas y gravas bien gradadas SW y GW (sand well graded y gravel well graded), Arenas y gravas mal gradadas SP Y SG (sand por graded y gravel por graded), Arenas limosas y gravas limosas SM y GM (sand mo y gravel mo) y Arenas arcillosas y gravas arcillosas SC y GC (sand clay y gravel clay). En la división de finos los clasifican en: Arcillas de alta y baja compresibilidad CH y CL (clay high compressibility y clay low compressibility), limos de alta y baja compresibilidad MH y ML (Mo high compressibility y Mo low compressibility), Orgánicos de alta y baja compresibilidad OH y OL (organic high compressibility y organic low compressibility) y por último los suelos altamente orgánicos o turba Pt. [7]

Figura 9: Sistema de clasificación unificado (SUCS)

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO			
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	<p>Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5%>GW,GP,SW,SP. >12%>GM,GC,SM,SC. 5 al 12%>casos límite que requieren usar doble símbolo.</p>			
			GP Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3 No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.		
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.		
			GC Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.		
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3 Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.		
						SP Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM Arenas limosas, mezclas de arena y limo.			Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan	
						SC Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.
			Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50			ML Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plasticidad.	
	OL Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.						
Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	MH Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.						
			CH Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.				
			OH Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.				
Suelos muy orgánicos		PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.				

Fuente: Tomada y adaptada de [7]

2.1.6.2 Sistemas de clasificación de aeropuertos

El sistema de aeropuertos fue propuesto originalmente en 1942 y se adoptó en enseguida por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de América quien lo aplico principalmente, en la construcción de aeropistas. [7]

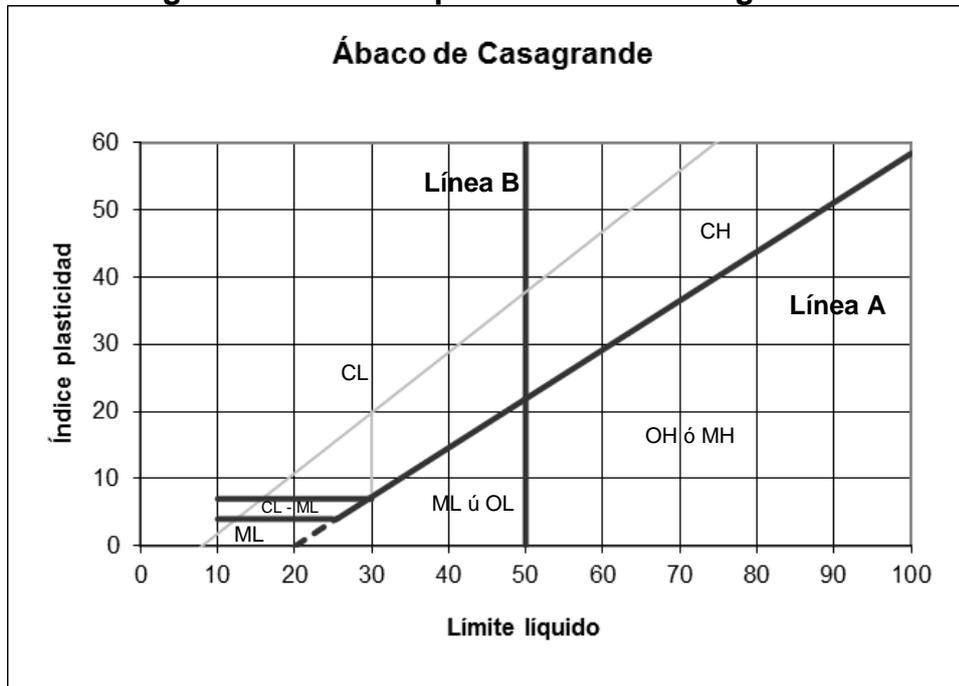
El sistema divide a los suelos en dos grandes fracciones: la gruesa formada por partículas mayores que la malla No 200 (0.074 mm) y menores que la malla de 3" (7.62 cm) y la fina, formada por las partículas que pasa la malla No 200. [7]

La fracción gruesa se subdivide en gravas y arenas, teniendo como frontera la malla No 4 (4.76 mm). Subdivisiones que tienen en cuenta el contenido y naturaleza de los finos. [7]

La fracción fina se subdivide en grupos, tomando en cuenta sus características de plasticidad, las cuales están relacionadas con las propiedades mecánicas e hidráulicas. Las propiedades más importantes son esfuerzo-deformación, resistencia, compresibilidad, permeabilidad entre otras. [7]

Casagrande usaba una carta de plasticidad (gráfica de límite líquido vs índice de plasticidad) y donde clasificaba los suelos en 5 categorías las cuales se puede observar e interpretar en la figura 10: arenas finas y arenas arcillosas SF y SC (Sand fines y Sand clay), Arcillas de baja compresibilidad CL (Clay low compressibility), Arcillas de alta compresibilidad CH (Clay high compressibility), limos de baja compresibilidad y materia orgánica de baja compresibilidad ML y OL (Low compressibility y Organic low compressibility) y la última categoría son los limos y los orgánicos de alta compresibilidad MH y OH (High compressibility y Organic high compressibility). Las arcillas siempre van ubicadas por encima de la línea A mientras que los limos y orgánicos por debajo de la línea A de la carta de plasticidad cuyo principal uso es situar en ella un suelo desconocido por medio de parámetros que definen su plasticidad. [7]

Figura 10: Carta de plasticidad de Casagrande



Fuente: Tomada y adaptada de [8]

2.1.6.3 Sistema de clasificación AASHTO

El otro sistema de clasificación es el método AASHTO De acuerdo con este sistema y con base en su comportamiento, los suelos están clasificados en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8. En este sistema de clasificación los suelos inorgánicos se clasifican en siete grupos que van del A-1 al A-7. Estos a su vez se dividen en un total de doce subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8. En la figura 11 podremos observar como clasifica el sistema aashto los suelos y como los subdivide a la vez. [7]

Figura 11: Clasificación de suelos según AASHTO

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz Nº 200)							Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz Nº 200)			
	A-1		A-3	A-2-4				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa: Nº 10 (2mm) Nº 40 (0,425mm) Nº 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máx				- - 36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40 Límite líquido Índice de plasticidad	- 6 máx		- NP (1)	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín (2) 11 mín
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno							Pobre a malo			

(1): No plástico

(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Fuente: Tomada y adaptada de [9]

2.1.7. HIDROCARBURO

Los hidrocarburos son los compuestos orgánicos más simples ya que solo se componen de carbono e hidrogeno. Los hidrocarburos se clasifican en cuatro tipos generales de acuerdo con el tipo de enlace carbono-carbono de sus moléculas, los cuales son: Alcanos, Alquenos, Alquinos y Aromáticos. [10]

El petróleo y el gas natural (hidrocarburos naturales) están constituidos casi exclusivamente por hidrocarburos, mezclado en proporciones diversas entre si junto con otros elementos químicos. Los hidrocarburos naturales se originan como consecuencia de la degradación aeróbica y anaeróbica de la materia orgánica, en unas determinadas condiciones de presión y temperatura, reacciones que desprende el oxígeno, nitrógeno y azufre que forman parte de los compuestos volátiles de los hidrocarburos. En una primera fase esta degradación da lugar a un producto intermedio que recibe el nombre de kerogeno, que posteriormente se transforma en los denominados hidrocarburos naturales dentro de las rocas arcillosas que lo contienen (rocas madre). Sin embargo para poder ser extraídos deben migrar a rocas porosas y permeables como las areniscas y dolomitas (rocas almacén) y quedar atrapadas en ellas mediante un mecanismo que impida su salida a la superficie, pues si esto ocurre se oxidan y volatizan perdiendo todo interés como fuente de energía. [11]

2.1.8. CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS

La primera acción que se debe considerar al producirse un derrame por hidrocarburos en tierra es la de detener el esparcimiento del mismo lo más cerca posible de su origen y evaluar detalladamente la situación a la que nos enfrentamos con la finalidad de determinar cuál es el posible movimiento de la mancha, extensión superficial, su filtración en el suelo y la posibilidad de contaminación de aguas superficiales o subterráneas. [11]

Esta evaluación nos permitirá definir las acciones a tomar para minimizar el impacto ambiental del derrame en base a una utilización óptima de los recursos técnicos de los que se dispone, a efectos de: [11]

- Contener el hidrocarburo lo más cerca posible de su fuente
- La recolección del mismo.
- La protección de las áreas sensibles.
- La limpieza del área contaminada.
- La restauración de las áreas afectadas. [11]

2.2. ARTICULOS RELACIONADOS CON EL PROTECTO A DESARROLLAR QUE RESPALDAN DESDE DIVERSOS PUNTOS DE VISTA LO PLANTEADO EN LA TESIS.

2.2.1. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE PETROLEO CRUDO EN LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LOS SUELOS ARCILLOSOS Y ARENOSOS.

Los derrames de petróleo ocurren en la gran mayoría de los casos como accidentes, ya sea en las etapas de exploración, de transporte o de almacenamiento, las fugas ocurren y, es probable que los suelos donde suceden estos derrames resulten también contaminados, en cuyo caso se requieren mayores esfuerzos para la recuperación de estos sitios. Muchas propuestas han sido evaluadas por las compañías para la restauración o para dar un uso a los suelos altamente contaminados por derrame o drenaje de petróleo, entre las cuales se contempla el uso del suelo como material de carpetas asfálticas que junto con agregados o agentes consolidantes puedan servir para pavimentar vías o parqueaderos. [12]

Otros métodos incluyen el almacenamiento en canteras, incineración, métodos biológicos, métodos de absorción, métodos de lavado de suelos y métodos de aislamiento y separación por sistemas de centrifugado y a través de filtros. La extensión de la contaminación depende de las propiedades químicas del contaminante y de las propiedades del suelo. Es también importante a la hora de pensar en un tratamiento adecuado para suelos contaminados conocer el comportamiento y las propiedades geotécnicas del suelo en cuestión. Conocer

la geotecnia es importante pues cuando los derrames se extienden a los alrededores es posible determinar el daño real que se hace a las estructuras existentes. [12]

Alsanad y sus colegas (1995, 1997) llevó a cabo un programa de pruebas de laboratorio para determinar la influencia de la contaminación del petróleo y el envejecimiento en las propiedades geotécnicas y el comportamiento de la arena de Kuwait. Usaron arena contaminada artificialmente con diferentes porcentajes de contaminación para determinar los efectos de la contaminación del petróleo en parámetros como la fuerza, compresibilidad, permeabilidad, y la compactación características de la arena. [13]

Aiban (1998) investigó el efecto de la temperatura sobre la resistencia, permeabilidad y compresibilidad de una arena contaminada con petróleo obtenido desde el este de Arabia Saudita. Él encontró que la compresibilidad y la deformación permanente de la arena contaminada con petróleo aumentó a medida que la temperatura aumenta por encima de la temperatura ambiente y los parámetros de resistencia al corte no eran sensibles a la temperatura de ensayo cuando las muestras eran compactadas a sus densidades máximas secas. [14]

Evgin y Das (1992) llevaron a cabo ensayos triaxiales en limpio y el petróleo contaminado con arena de cuarzo. Ellos encontraron que la completa saturación con aceite de motor causó una reducción significativa en el ángulo de fricción de ambas arenas sueltas y densas y un drástico aumento de deformaciones volumétricas. También mostraron mediante el análisis de elementos finitos que la solución de equilibrio aumenta debido a la contaminación por petróleo. [15]

Shin y Das (2001) estudiado la capacidad de carga de la arena contaminada no saturada. El contenido de petróleo en sus muestras de ensayo varió de cero a 6 %. Con base en sus resultados de la prueba, la contaminación del aceite reduce drásticamente la capacidad de carga de arena. [16]

La compresibilidad de los suelos de grano fino contaminados fue examinada por pruebas de consolidación (Meegoda y Ratnaweera, mensaje, 1994). En este estudio, dos suelos artificiales eran seleccionados para representar a la arcilla de low plasticity y arcilla de alta plasticidad. Se emplean glicerol y productos químicos propanol. Los resultados revelaron un aumento de la compresibilidad, que fue controlado por medios mecánicos y fisicoquímicas. Estos trabajadores proponen factores de corrección a en cuenta el cambio en el índice de compresión causada por viscosidad del fluido de los poros. [17]

Otros estudios se limitan al comportamiento de forma natural depositado arenas bituminosas (Carrigy, 1967; Ola, 1991). Estas arenas son mezclados con betún y se encuentran en diferentes profundidades bajo presión de

sobrecarga. Su comportamiento es similar a la de la piedra arenisca suave y los conceptos convencionales de esfuerzo efectivo utilizados en mecánica de suelos son aplicables. Ellos tienen una fuerza inferior a arenas limpias comparables con la posible presencia de la cohesión interceptada (Carrigy, 1967; Ola, 1991). [18],[19].

El objetivo de este estudio ha sido realizar laboratorio programas de pruebas para determinar los efectos de la contaminación por crudo, los que suelen causar la contaminación del suelo en diferentes partes de Irán debido a las fugas, en propiedades geotécnicas en tres tipos de suelo de CL, SP, y son SM los cuales son tomados de las playas de Bushehr, en el sur de Irán. Estas propiedades incluyen límites de Atterberg, permeabilidad y parámetros de resistencia (resistencia a la compresión axial y dirigir ensayos de corte), y características de compactación. [12]

2.3. ANTECEDENTES

Al iniciar una indagación previa sobre las investigaciones o proyectos relacionados con los suelos contaminados con hidrocarburos, se encontró que en la Universidad Pontificia Bolivariana se han realizado trabajos de grado orientados hacia las variaciones de las propiedades mecánicas de los suelos contaminados por hidrocarburos, con periodos determinados de contaminación.

2.3.1. Suelos arcillosos

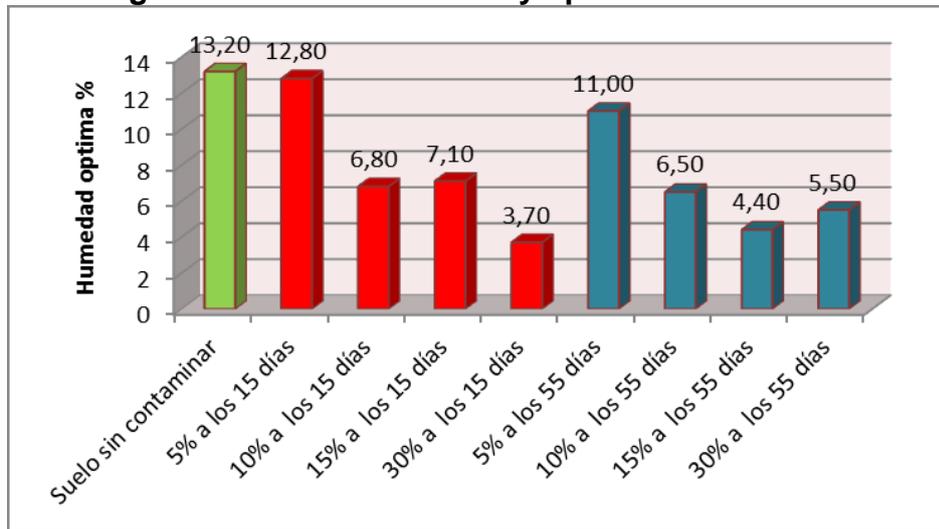
En este proyecto se analizaron los cambios de las propiedades mecánicas de los suelos afectados por hidrocarburos, estos fueron sometidos a periodos de 15 y 55 días de contaminación para la realización de sus respectivos ensayos. La contaminación del suelo se hizo con diferentes concentraciones y para cada periodo de tiempo: 5%, 10%, 15% y 30%. [20]

2.3.2. Resultados Obtenidos:

➤ Próctor modificado

Se observó que en los resultados del ensayo de próctor modificado hubo una tendencia descendente en relación a la humedad óptima, en el periodo de 15 días de incubación la menor humedad se presentó en el 30%, sin embargo, en el periodo de 55 días la menor humedad se presentó en la concentración del 15%, se pudo inferir que hay una relación inversamente proporcional a medida que aumentaron las concentraciones disminuyó la humedad óptima en el suelo. La figura 12 muestra los resultados de los ensayos de compactación próctor modificado. [20]

Figura 12: Resultados ensayo próctor modificado



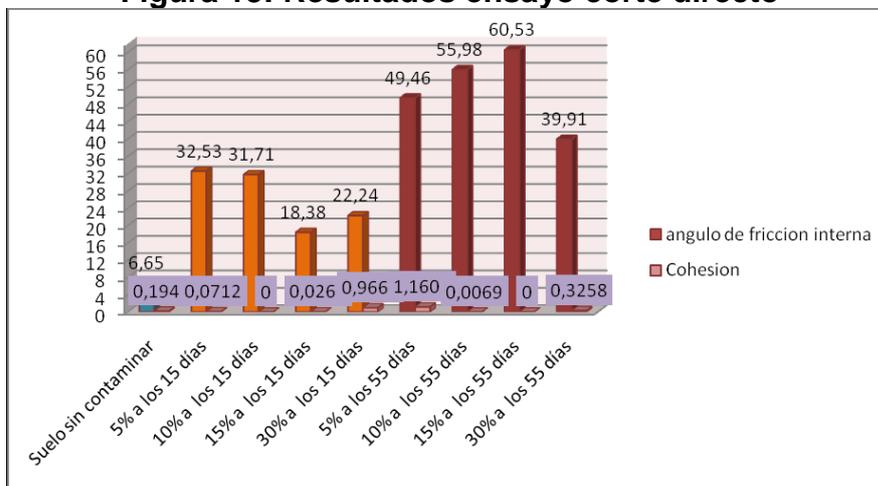
Fuente: Directa de [20]

➤ **Corte directo**

El suelo no contaminado tuvo ángulo de fricción muy pequeño a medida que aumentaban las concentraciones de crudo y los periodos, también lo hacía el ángulo de fricción. Los resultados de cohesión se pudo observar una gran fluctuación en los datos, sin seguir un patrón específico. [20]

De acuerdo a los resultados obtenidos a los 15 días de la contaminación con crudo, se observó una disminución en el ángulo de fricción interna en los suelos contaminados; a los 55 días de la contaminación se mostró una tendencia ascendente en relación a ángulo de fricción interna; sin embargo esta disminuyó abruptamente en el suelo del 30% a los 55 días. La figura 13 muestra los resultados de los ensayos de corte directo. [20]

Figura 13: Resultados ensayo corte directo



Fuente: Directa de [20]

2.3.3. Suelos orgánicos

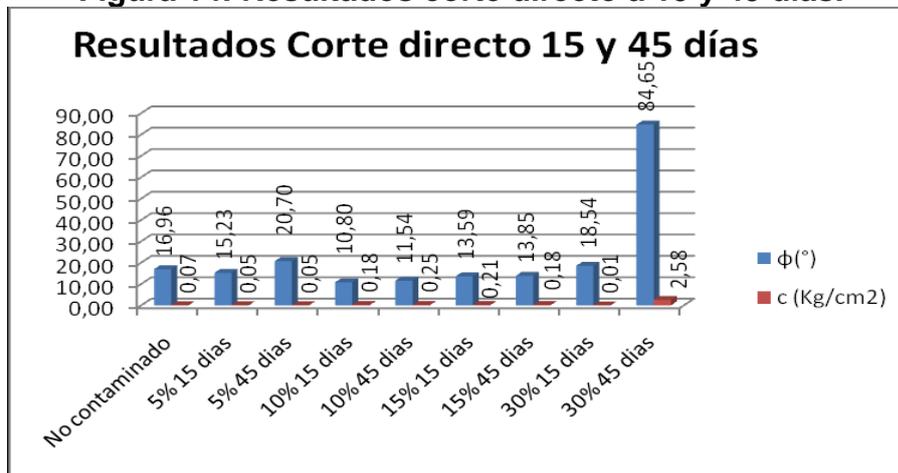
En este trabajo se desarrolló una metodología con la cual se compararon los cambios en las propiedades mecánicas de suelos tipo orgánico afectados por derrame de crudo. En el estudio, se trabajó con las normas del Instituto Nacional de Vías (INVE). Para la selección del suelo, fue ajustado partiendo de una composición de 60% abono orgánico y 40% suelo SC (arena arcillosa). Posteriormente, la muestra de suelo se mezcló con crudo suministrado por Ecopetrol en febrero del 2011. Se realizó la contaminación con unas concentraciones por porcentaje en peso de 5, 10, 15 y 30. Finalmente se realizaron los ensayos a los 15 y 45 días posteriores a la contaminación en cada uno de los cuatro casos. El ajuste del material se realizó para facilitar las condiciones experimentales, debido a que en el mercado no es tan común encontrar una capa de suelo uniforme de naturaleza orgánica. [20]

2.3.4. Resultados obtenidos

➤ Resistencia al corte

Se observan los pequeños valores de cohesión muy cercanos a cero lo cual clasifica las muestras como arenas, sin embargo para ser catalogadas de esta manera, tienen que presentarse ángulos de fricción elevados. En este estudio dichos ángulos presentan valores moderados. La figura 14 muestra los resultados de corte directo a 15 y 45 días. [20]

Figura 14: Resultados corte directo a 15 y 45 días.



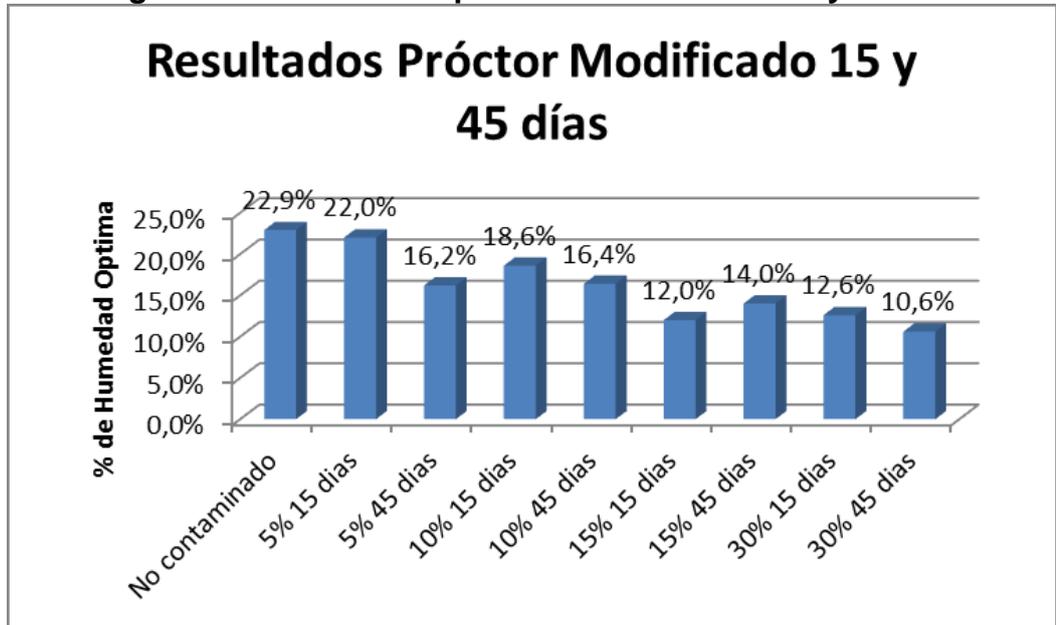
Fuente: Directa de [20]

➤ Próctor modificado

Se observa claramente la disminución del porcentaje de humedad óptima de los suelos, lo que demuestra que el porcentaje de contaminación con crudo y el tiempo de reposo del suelo contaminado, influye directamente en su

compactación, modificando la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcance su humedad óptima. La figura 15 muestra los resultados del ensayo de próctor modificado a 15 y 45 días. [20]

Figura 15 : Resultados próctor modificado a 15 y 45 días.



Fuente: Directa de [20]

3. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos trazados en este proyecto, y responder a su vez a la pregunta problema, se ejecutarán unos pasos que permitirán dar respuesta al interrogante principal de esta investigación.

Como lo describe el título de nuestra tesis está enfocada a Evaluar las variaciones en los parámetros de corte y de compactación de arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC) contaminados con derivados de hidrocarburos en concentraciones al 25%, 50%, 75% Y 100% de la porosidad.

Fue necesario realizar múltiples apiques para garantizar que alguna muestra cumpliera con la naturaleza de las arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC); para los procedimientos de los ensayos de caracterización fue necesario utilizar la Norma INVIAS del 2007.

En la figura 16 se observa el material arena limosa (SM) contaminado al 25% vs arena limosa (SM) contaminado al 50%

Figura 16 : Arena limosa (SM) al 25% vs arena limosa (SM) al 50%



Fuente: Autor

3.1.1. RECOLECCIÓN DEL ACEITE

El crudo fue suministrado por la entidad Ecopetrol, pero debido a que el crudo no era suficiente para la elaboración del proyecto, este fue mezclado con aceite para incrementar su cantidad.

3.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Para la contaminación de las arenas limosas (SM) y las arenas arcillosas (SC), se adquirieron 4 vasijas plásticas con su respectiva tapa para el material virgen y se adquirieron 4 vasijas rojas de 1m*50cm para depositar el material contaminado para garantizar una mejor incubación, en dichas vasijas se almacenaron las diferentes muestras con su respectiva concentración de aceite debidamente marcadas.

En la figura 17 y 18 se aprecia el material que fue depositado tanto en las vasijas azules como rojas, en las cuales era pesado debidamente para después ser contaminado.

Figura 17: Material contaminado al 25% y 50%



Fuente: Autor

Figura 18 : Material virgen



Fuente: Autor

3.1.3. CONTAMINACIÓN DE LA MUESTRA

Primero se realizaron los ensayos de granulometría, límite líquido, límite plástico, corte directo, y próctor modificado, para realizar la caracterización mecánica de las arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC).

Posteriormente se procedió a contaminar el material con sus respectivas concentraciones, utilizando 300000 g de material para cada porcentaje (25%, 50%, 75% y 100%). Esta mezcla se realizó en tres capas iguales de suelo y de aceite mezclándose con la ayuda de la herramienta menor, hasta que esta estuviera homogénea.

Se dejó el material dos semanas dentro de las vasijas para que de esta manera el contaminante se adhiriera al suelo.

En la figura 19 se observa el proceso de contaminar el suelo con el crudo

Figura 19: Proceso de contaminación de los suelos.



Fuente: Autor

En la figura 20 se observa el momento en que se adiciona el crudo al material virgen, para posteriormente ser mezclado.

Figura 20 : Vertimiento del crudo sobre el material virgen.



Fuente: Autor

En la figura 21 que se le realizaba al material virgen al ser contaminado con x% de crudo.

Figura 21: mezclado del material virgen con el crudo



Fuente: Autor

En la figura 22 se aprecia el resultado final después de mezclar 3 capas de crudo con el suelo virgen, este debe tener un color homogéneo.

Figura 22 : Material contaminado al 50%



Fuente: Autor

Al contaminar los dos materiales, se presentaron dificultades en los porcentajes del 75% y 100% debido que el porcentaje de crudo era muy elevado el material tendía a saturarse muy rápido dificultando la mezcla de este.

En la tabla 1 muestra el esquema y metodología que se utilizó para encontrar los porcentajes de crudo respectivos para adicionar a cada material.

Tabla 1: Metodología contaminación material

Suelo no contaminado							
Ensayos	Material		Repetitividad de ensayo	Material por ensayo gr	Material total gr		
	S. arcilloso	S. limoso					
Proctor	1	1	5	7000	35000		
Corte directo	1	1	5	8000	40000		
				Total	75000		

Suelo contaminado							
Ensayos	Material		Repetitividad de ensayo	Material por ensayo gr	Material total gr		
	S. arcilloso	S. limoso					
Proctor	4	4	5	7000	140000		
Corte directo	4	4	5	8000	160000		
				Total	300000		

Crudo								
Concentracion	Material por concentracion gr		Material/ Porosidad		Porcentaje según la porosidad		Peso en crudo por concentracion gr	
	S. arcilloso	S. limoso	S. arcilloso	S. limoso	S. arcilloso	S. limoso	S. arcilloso	S. limoso
25%	300000	300000	27%	28%	7%	7%	20250.00	21000.00
50%	300000	300000			14%	14%	40500.00	42000.00
75%	300000	300000			20%	21%	60750.00	63000.00
100%	300000	300000			27%	28%	81000.00	84000.00
						Subtotal	202500.00	210000.00
						Total	412500.00	

Fuente: Autor

3.1.4. ENSAYOS REALIZADOS PARA ESCOGER EL TIPO DE MATERIAL PARA EL PROYECTO DE GRADO

Se mencionan los ensayos que se realizaron para determinar si los suelos con los que se contaban, eran aquellos que se habían planteado desde el inicio del proyecto, por lo tanto era necesario realizar los siguientes ensayos:

3.1.4.1 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO

Este ensayo se le realizó a una muestra de arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC) sin contaminante, con el fin de obtener su respectiva clasificación y conocer si era el material que se buscaba para este proyecto. Después de conocer el tipo de material este, fue tamizado en su totalidad a través del N4 para poder realizar los ensayos de corte directo y próctor modificado.

3.1.4.2 ENSAYO LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO

Para la ejecución de estos ensayos fue necesario exponer a los suelos no contaminados a este ensayo para determinar su propiedad y su clasificación y así definir que eran arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC).

3.1.5. ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN

Para el ensayo de Próctor Modificado se utilizó una muestra representativa de suelo (7000 g). Antes de efectuar el ensayo fue necesario secar una muestra para hallar la humedad natural con la que se encontraba el material, se optó por utilizar un pequeño recipiente, el cual se conocía su peso, y de esta manera este era llevado a la estufa eléctrica, en la cual se debía estar muy pendiente, debido a que el material contaba con altas concentraciones de crudo (25%, 50%, 75% y 100%) y se consideró peligroso hacer uso del horno para el secado.

En las figuras 23 y 24 se aprecia la forma en la que determinaban la humedad de los materiales contaminados y vírgenes del proyecto; mediante una estufa eléctrica, un platón con material, y movimientos de este alrededor del fogón para que no se calcinara el material.

Figura 23: Proceso para determinar la humedad del material



Fuente: Autor

Figura 24: Determinación de la humedad del suelo mediante el uso de la estufa eléctrica



Fuente: Autor

Este procedimiento se realizó para el material contaminado como para el material virgen; Pero debido a que el material arena arcillosa (SC) se encontraba por encima de humedad natural fue necesario que este, fuera extendido en bandeja, expuestas al sol para que de esta manera se secara como se muestra en la figura 25.

Figura 25: Se observa el secado de la muestra al sol.



Fuente: Autor

Al tener el material seco, se procede a tamizarlo a través del tamiz N4, para de esta manera eliminar todas las piedras de mayor diámetro al de rejilla mencionada anteriormente, este procedimiento se realizó para los dos materiales.

Previamente el material ya había sido contaminado y distribuido en las vasijas mencionadas con anterioridad, se procede a realizar el ensayo de próctor modificado, el cual consiste en realizar determinada cantidad de próctor, es decir está ligada directamente a la humedad de estos, puesto que esta representa una curva y hasta que esta no descienda, el ensayo no se ha culminado.

En la figura 26 se muestra el proceso de distribución del agua agregada al material para la realización del próctor.

Figura 26: Mezclado del material con el porcentaje de agua determinado para alcanzar la humedad óptima



Fuente: Autor

En la figura 27 se hace referencia a la diferencia del material contaminado al 50% vs contaminado al 25%.

Figura 27: Diferencias entre los suelos contaminados al 25% y 50%



Fuente: Autor

El ensayo consiste en pesar 7 Kg, al conseguirlos determinar la humedad del material como se explicó con anterioridad, seguido se procede a distribuir la cantidad de agua necesaria, para que este material alcance su humedad óptima o si el caso inverso dejarlo secar; paso seguido se mezcla el material hasta que este se va homogéneo, para que así se proceda a realizar el próctor el cual consiste en 5 capas de material distribuidas sobre molde, pero este trabajo consiste en hallar la manera adecuada para manejar este material y así poder trabajarlo, por esta razón se determinó mediante ensayo y error, que la mejor forma de realizar este ensayo fue, adicionar la primera capa más gruesa que las demás y la última capa es la más delgada de todas, de esta manera se lograba extraer las pastillas en mejor estado. Cada capa era golpeada 55 veces de forma que los golpes fueran distribuidos en toda la superficie del suelo.

Figura 28 : se muestra la compactación del próctor modificado.



Fuente: Autor

Figura 29 : se puede observar un próctor terminado, debidamente enrazado.



Fuente: Autor

Al haber enrasado el material y retirar la parte de arriba de esta se obtiene el próctor de esta forma este es pesado y consignado en su respectiva hoja de cálculo, se continua realizando este ensayo aumentando el % (0%,1%,3%) para la arena arcillosa (SC); y para la arena limosa (SM) (0%,3%,6%) de agua hasta que la curva descienda. Cuando esta lo hace se calcula la humedad óptima de este y al tener la cantidad determinadas de ensayos de cada % y material virgen se promedian y así obtiene la humedad óptima del material de cada uno de estos.

3.1.6. ENSAYO CORTE DIRECTO

3.1.6.1 MAQUINA DE CORTE DIRECTO DIGITAL

Figura 30 : Máquina de corte directo digital.



Figura 30

Fuente: Autor

Para el ensayo de Corte Directo se utilizaron tres muestras o pastillas en moldes cuadrados, las muestras fueron extraídas de un cilindro de 5 capas cada una compactada con 55 golpes y con una humedad óptima que simula la compactación en estado natural.

En las figuras 31 y 32 se muestra la composición del molde cuadrado, y la forma en la se ven las muestras al ser extraídas del próctor.

Figura 31: Muestra para ensayo de corte directo



Fuente: Autor

Figura 32 : Muestra del material arena arcillosa (SC)



Fuente: Autor

Después se armó la caja de corte con la pastilla de suelo adentro con sus placas alineadas, piedras porosas y con los tornillos que bloquean a la caja.

Posteriormente se pasó la caja armada a la máquina de corte directo digital, se le quitaron los tornillos antes de empezar la prueba y se ajustó el peso muerto de la máquina con su respectivo peso para ejercerle unos esfuerzos de 0.5, 1 y 2 Kg/cm²; se verificaron que los deformímetros marcaran cero antes de iniciar el ensayo.

El sistema digital de la máquina funcionó a una velocidad de 1mm/minuto y se registraron las lecturas de los diales para así realizar los cálculos, este procedimiento se le realizó a cada pastilla de suelo y a todas las concentraciones de crudo (25%, 50).y al material virgen de ambos suelos

En las siguientes figuras 33, 34, 35 Y 36 se puede apreciar la muestra después de ser fallada en la máquina como fue su desplazamiento horizontal, como se aprecian las fallas en esta, y como queda finalmente al dejarla secar.

Figura 33 : Muestra después de salir de la máquina de corte directo



Fuente: Autor

Figura 34: Muestra vista desde el lado lateral , después de salir del ensayo de corte directo



Fuente: Autor

Figura 35 : Muestra fracturada después de habersele realizado el ensayo de corte directo



Fuente: Autor

Figura 36 : Como debe quedar la muestra al salir del molde de la máquina de corte directo, al terminar el ensayo



Fuente: Autor

3.1.6.2 MAQUINA DE CORTE DIRECTO ELECTRONICA

Figura 37: Máquinas de corte directo electrónico.



Figura 37

Fuente: Autor

Para el ensayo de Corte Directo electrónico se utilizaron tres muestras o pastillas en moldes circulares, las muestras fueron extraídas de un cilindro de 5 capas cada una compactada con 55 golpes y con una humedad óptima que simula la compactación en estado natural.

Como se puede observar en las figuras 38 y 39 la extracción de las pastillas se realiza mediante un gato, el cual insertaba las formaletas de las muestras a sacar, todo era ubicado en cilindro de tubos con extremos cerrados para de esta forma ejercer la presión con el gato y las formaletas se fueran insertando en el molde del ensayo de próctor.

**Figura 38 :
Procedimiento de
inserción de los moldes
de las pastillas**



**Figura 38
Fuente: Autor**

**Figura 39 : Penetración
de las moldes de las
pastillas en el próctor**



**Figura 39
Fuente: Autor**

Al haber insertado el disco que contiene las pastillas, se procede a desmontarlo de la máquina y se lleva a la bandeja donde se encuentra el material que sobro del ensayo. Como se puede apreciar en las figuras 40 y 41, inmediatamente insertados los moldes en el material, se procede a tomar una porra y un cincel con el cual se extraen las pastillas las cuales eran inmediatamente depositadas en una bandeja y cubiertas con un papel húmedo para que de esta forma se mantenga la humedad óptima de la muestra y no afecte el ensayo.

Figura 40: Forma en la que deben quedar las pastillas dentro del próctor



Figura 40
Fuente: Autor

Figura 41: Extracción de las pastillas



Figura 41
Fuente: Autor

Después se armó la caja de forma circular de corte con la pastilla de suelo adentro con sus placas alineadas, piedras porosas y con los tornillos que bloquean a la caja.

Posteriormente se pasó la caja armada a la máquina de corte directo electrónica, se le quitaron los tornillos antes de empezar la prueba y se ajustó el peso muerto de la maquina con su respectivo peso para ejercerle unos esfuerzos de 0.5, 1 y 2 Kg/cm²; se verificaron que los deformímetros marcaran cero antes de iniciar el ensayo.

El sistema electrónico de la maquina funcionó a una velocidad de 1mm/minuto y se registraron las lecturas de los diales para así realizar los cálculos, este procedimiento se le realizó a cada pastilla de suelo y a todas las concentraciones de crudo (25%, 50).y al material virgen de ambos suelos.

La máquina de corte directo electrónica opera de forma similar a la máquina de corte directo digital pero esta funciona integrada con el software el cual ejecuta el ensayo en 6 pasos los cuales son: Selección de la máquina, datos del ensayo, datos de la muestra, etapa de consolidación, ensayo de corte directo, datos finales del ensayo y reporte de resultados.

Inicialmente se realizaron una serie de ensayos para los casos más desfavorables en los cuales la maquina nos podía arrojar resultados incompletos o no ideales usando el material arena limosa (SM).

En las siguientes tablas 2, 3, 4 se pueden observar los estados de los ensayos realizados para determinar la T (kg/cm^2) **MAX** Para que este valor fuera arrojado por la máquina electrónica.

N.R = No se recomienda

OK= Si arroja el valor buscado

NO SIRVE = Es que el ensayo no arroja valor alguno

Tabla 2: Arena limosa (SM) contaminada al 25% con diversos intervalos de toma de lecturas

Material	ARENA LIMOSA (SM)				
% contaminación =	25%	25%	25%	25%	25%
ρ (kg/cm^2)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
vel (mm/min)	1	1	1	1	1
intervalo de toma de lecturas (mm)	0.5	0.1	0.01	0.005	0.0001
cantidad de datos D.H	5	30	712	360	EXCEDE
Fuerza máx. registrada (kpa)	31.87	48.11	56.78	91.48	
Cantidad de datos D.V	18	18	18	18	18
Deformación vertical (mm)	0.67	0.61	0.58	1.1	0.83
Estado del ensayo al finalizarlo	N.R	N.R	N.R	OK	NO SIRVE

Fuente: Autor

Tabla 3: Arena limosa (SM) contaminada al 25% con intervalos de lecturas ideales

Material	ARENA LIMOSA (SM)			
% contaminación =	25%	25%	25%	25%
ρ (kg/cm^2)	1	1	2	2
vel (mm/min)	1	1	1	1
intervalo de toma de lecturas (mm)	0.01	0.005	0.01	0.005
cantidad de datos D.H	712	230	712	597
Fuerza máx. registrada (kpa)	151.7	230	210.5	392
Cantidad de datos D.V	18	21	18	19
Deformación vertical (mm)	2.78	0.72	1.33	1.4
Estado del ensayo al finalizarlo	N.R	OK	N.R	OK

Fuente: Autor

Tabla 4: Arena limosa (SM) contaminado al 50% con diversos intervalos de lecturas.

Material	ARENA LIMOSA (SM)				
% contaminación =	50%	50%	50%	50%	50%
σ (kg/cm²)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
vel (mm/min)	1	1	1	1	1
intervalo de toma de lecturas (mm)	0.5	0.1	0.01	0.005	0.0001
cantidad de datos D.H	5	30	712	810	EXCEDE
Fuerza máx. registrada (kpa)	64.39	85.01	105.8	111.17	
Cantidad de datos D.V	20	20	20	20	20
Deformación vertical (mm)	2.97	3.87	3.05	2.75	2.85
Estado del ensayo al finalizarlo	N.R	N.R	N.R	N.R	NO SIRVE

Fuente: Autor

Los resultados demostraron que solo el material contaminado al 25%, además del material sin contaminar, registró el esfuerzo cortante de falla de la muestra manteniendo el intervalo de toma de lecturas y la velocidad del ensayo para cada esfuerzo normal.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

En el siguiente capítulo hace referencia a todos los resultados obtenidos en el proceso de la tesis, desde que se realizaron los próctor para determinar la humedad del material tanto virgen como contaminado, y desde ese punto realizar el ensayo de corte directo a las muestras anteriormente mencionadas; por lo tanto se a continuación se mostrara todos los resultados obtenidos en el laboratorio:

4.1. ENSAYOS DE CLASIFICACION

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas de granulometría, limite líquido y limite plástico realizados sobre los materiales sin contaminar

4.1.1. ARENA ARCILLOSA (SC)

A continuación se presentan los resultados efectuados sobre el material sin contaminar que sería clasificado como una arena arcillosa (SC) según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

4.1.1.1 GRANULOMETRIA

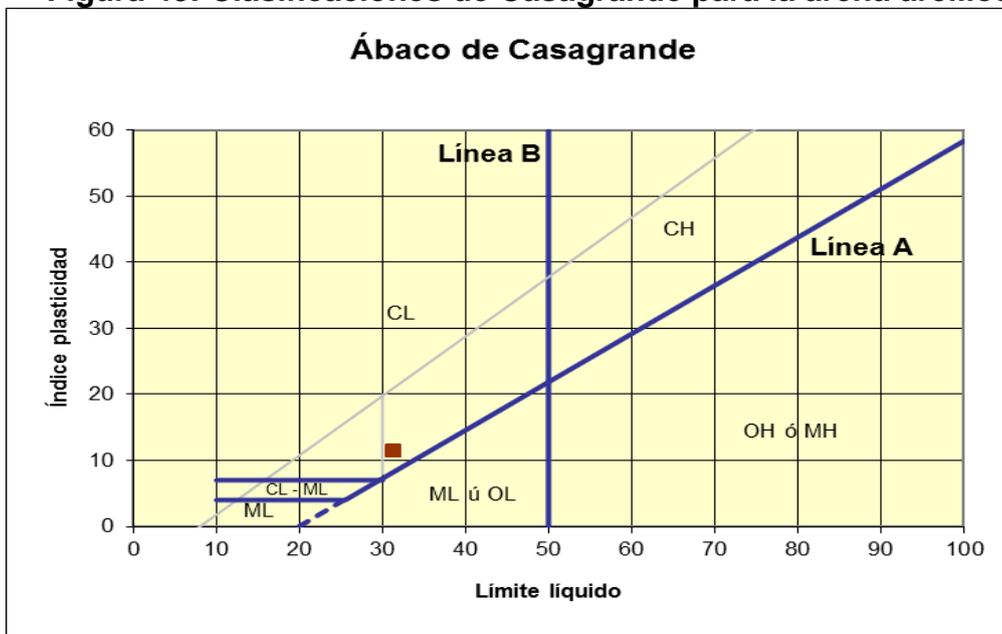
La tabla 5 presenta los resultados de la granulometría realizada a la muestra del material que finalmente sería clasificado como arena arcillosa (SC).

Tabla 5: Granulometría de la arena arcillosa (SC)

Tamiz (mm)	Pasa (%)	Pasante (%)	Retenido acumulado (%)	Retenido parcial (%)
100	0,00	0,00	100,00	100,00
80	0,00	0,00	100,00	0,00
63	0,00	0,00	100,00	0,00
50	0,00	0,00	100,00	0,00
40	0,00	0,00	100,00	0,00
1	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4.	100,00	100,00	0,00	-100,0
1/2.	99,00	99,00	1,00	1,0
3/8.	98,00	98,00	2,00	1,0
N4	95,00	95,00	5,00	3,0
10	95,00	95,00	5,00	0,0
20	78,00	78,00	22,00	17,0
40	62,00	62,00	38,00	16,0
60	52,00	52,00	48,00	10,0
100,000	46,00	46,00	54,00	6,0
200,000	40,00	40,00	60,00	6,0

En la figura 43 se presenta la ubicación del material según los resultados de la tabla 6 en el ábaco de Casagrande.

Figura 43: Clasificaciones de Casagrande para la arena arcillosa (SC)



Fuente: Autor

4.1.2. ARENA LIMOSA (SM)

A continuación se presentan los resultados efectuados sobre el material sin contaminar que sería clasificado como una arena limosa (SM) según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

4.1.2.1 GRANULOMETRIA

La tabla 7 presenta los resultados de la granulometría realizada a la muestra del material que finalmente sería clasificado como arena limosa (SM).

Tabla 7 : Granulometría para la arena limosa SM

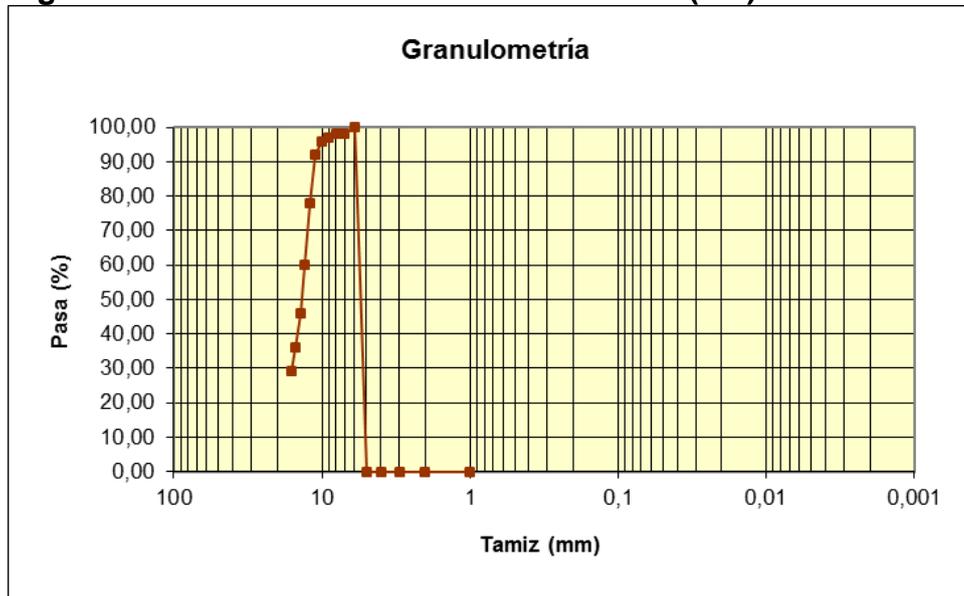
Tamiz (mm)	Pasa (%)	Pasante (%)	Retenido acumulado (%)	Retenido parcial (%)
100	0,00	0,00	100,00	100,00
80	0,00	0,00	100,00	0,00
63	0,00	0,00	100,00	0,00
50	0,00	0,00	100,00	0,00
40	0,00	0,00	100,00	0,00
1	100,00	100,00	0,00	-100,00
3/4.	98,00	98,00	2,00	2,0
1/2.	98,00	98,00	2,00	0,0
3/8.	97,00	97,00	3,00	1,0
N4	96,00	96,00	4,00	1,0
10	92,00	92,00	8,00	4,0
20	78,00	78,00	22,00	14,0
40	60,00	60,00	40,00	18,0
60	46,00	46,00	54,00	14,0
100,000	36,00	36,00	64,00	10,0
200,000	29,00	29,00	71,00	7,0

Pasa tamiz N° 4 (5mm):	96,00	%
Pasa tamiz N° 200 (0,080 mm):	29,00	%
D60:	40,00	mm
D30:	185,71	mm
D10 (diámetro efectivo):	-	mm
Coeficiente de uniformidad (Cu):	-	
Grado de curvatura (Cc):	-	

Fuente: Autor

En la figura 44 se presentan los resultados de la granulometría registrados en la tabla 7.

Figura 44: Granulometría de la arena limosa (SM)



Fuente: Autor

4.1.2.2 INDICE DE PLASTICIDAD

La tabla 8 presenta los resultados de los ensayos de límites de Atterberg realizada a la muestra del material que finalmente sería clasificado como arena limosa (SM).

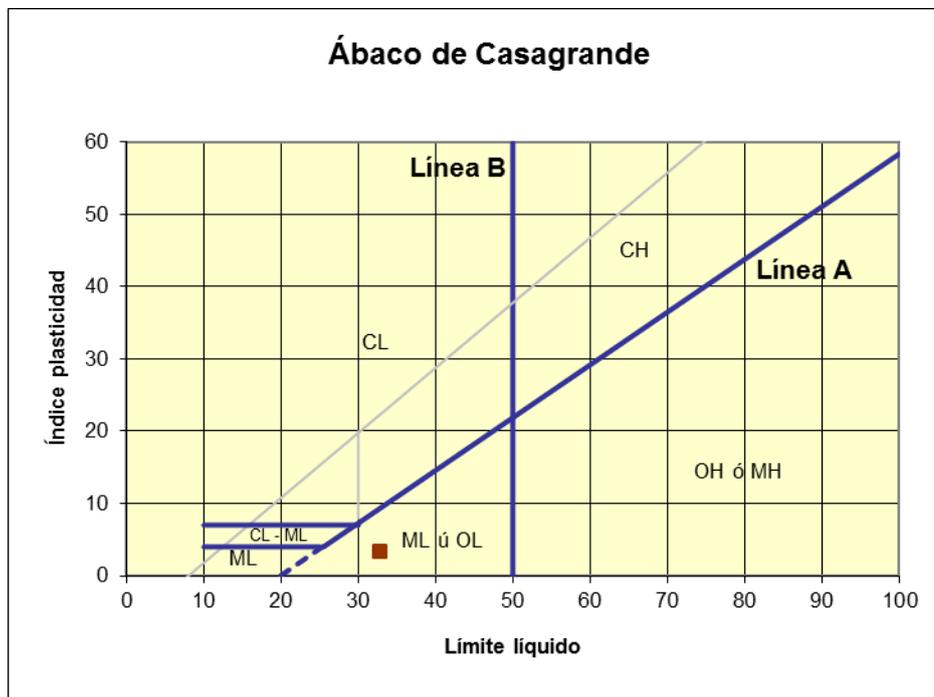
Tabla 8 : Índice de plasticidad de la arena limosa (SM)

Límite líquido LL	32,75	%
Límite plástico LP	29,39	%
Índice plasticidad IP	3,36	%

Fuente: Autor

En la figura 45 se presenta la ubicación del material según los resultados de la tabla 8 en el ábaco de Casagrande.

Figura 45: Clasificación de Casagrande para la arena limosa SM



Fuente: Autor

4.2. ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO

En esta parte del libro se describen todos los resultados obtenidos que hacen referencia al ensayo de próctor modificado tanto aplicados en el material virgen como contaminado al 25%, 50%, 75% y 100%.

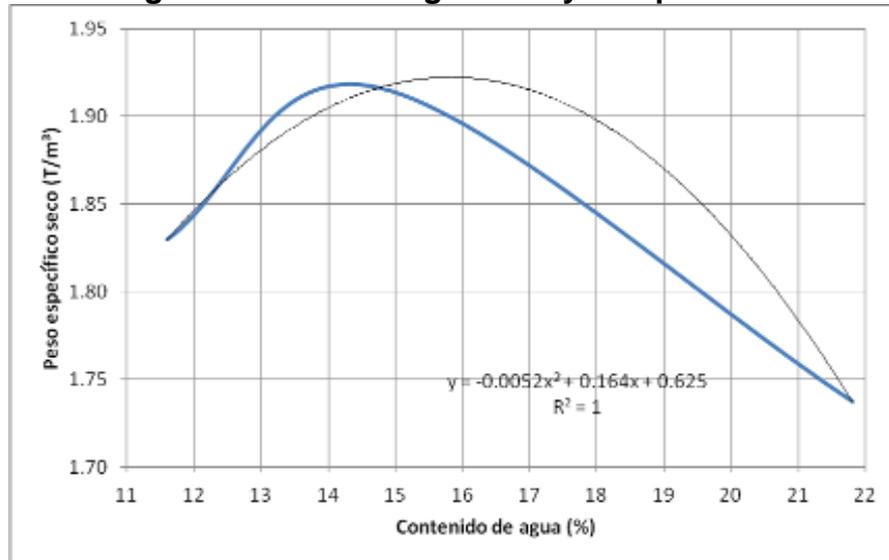
4.2.1. ARENA ARCILLOSA (SC)

4.2.1.1 SUELO SIN CONTAMINAR

En las figuras 46, 47, 48, 49 y 50 se realizaron las pruebas al material virgen dando lugar a los siguientes resultados, que serán interpretados a través de gráficas que enfrentan el peso específico vs contenido de agua y al final de estas se mostrará la humedad óptima, arrojada mediante el promedio de las humedades de cada próctor.

ENSAYO #1

Figura 46 : Suelo virgen ensayo de próctor 1

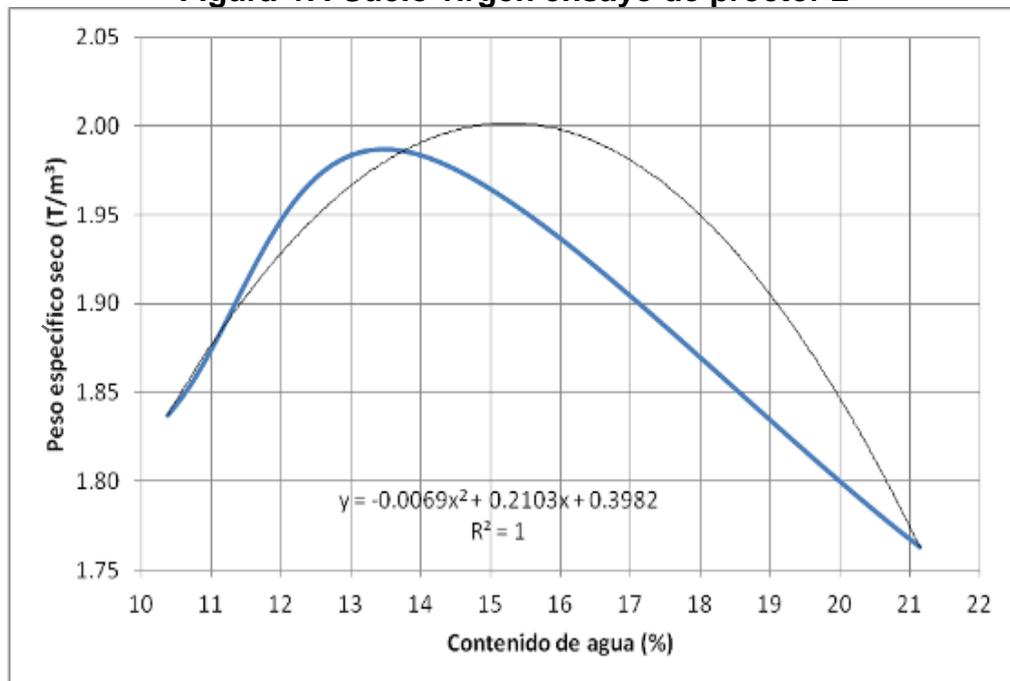


Humedad óptima = 15.77%

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 47: Suelo virgen ensayo de próctor 2

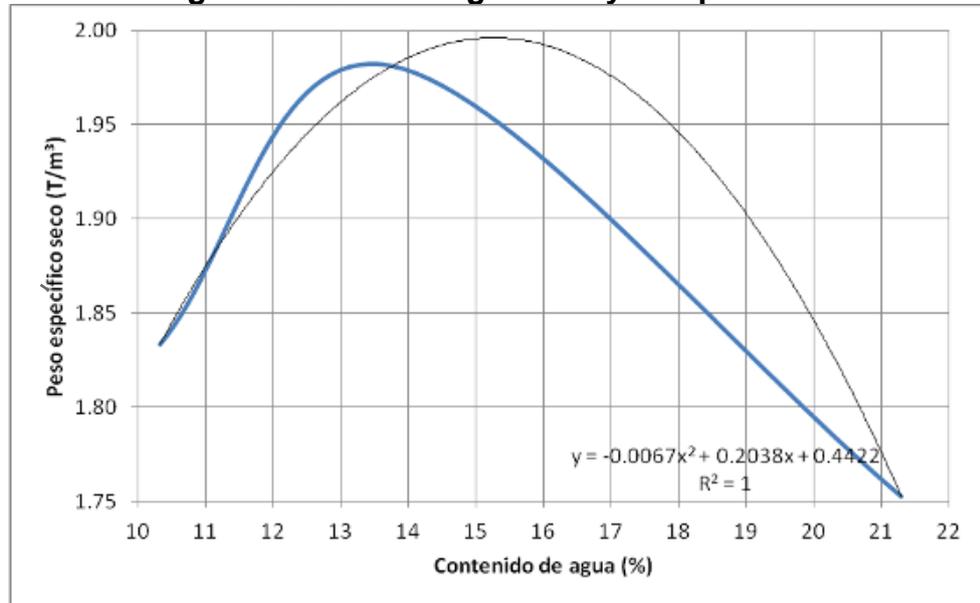


Humedad óptima = 15.24%

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 48 : Suelo virgen ensayo de próctor 3

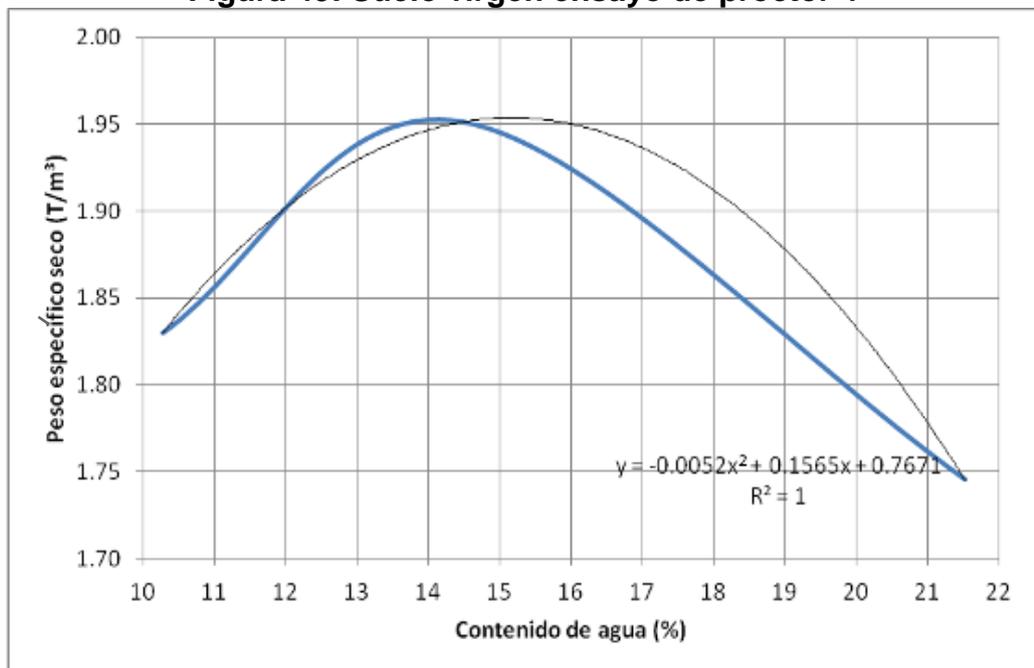


Humedad óptima = 15.54%

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 49: Suelo virgen ensayo de próctor 4

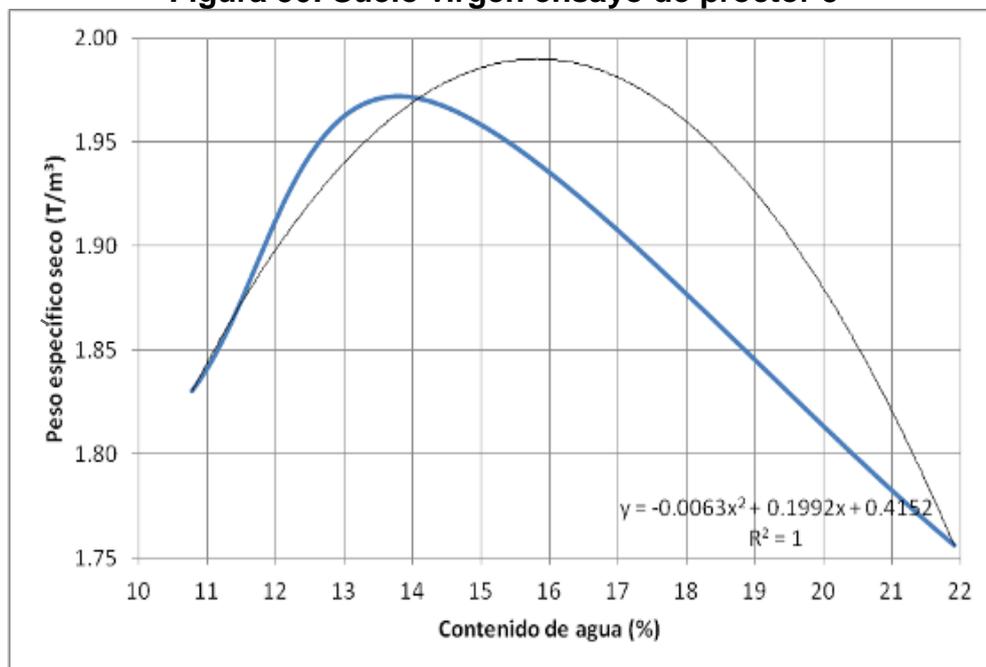


Humedad óptima = 15.05%

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 50: Suelo virgen ensayo de próctor 5



Humedad óptima = 15.81%

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 9 promedio de las humedades óptimas obtenidas en los ensayos de próctor modificados mostrados anteriormente.

Tabla 9: Promedio próctor arena arcillosa (SC) virgen

Próctor N°	Humedad óptima (%)	Peso específico (T/m ³)
1	15.77	1.93
2	15.24	2
3	15.54	1.99
4	15.05	1.95
5	15.81	1.98
Promedio	15.48	1.97

Fuente: Autor

4.2.1.1.1 SUELO CONTAMINADO AL 25% DE LA POROSIDAD

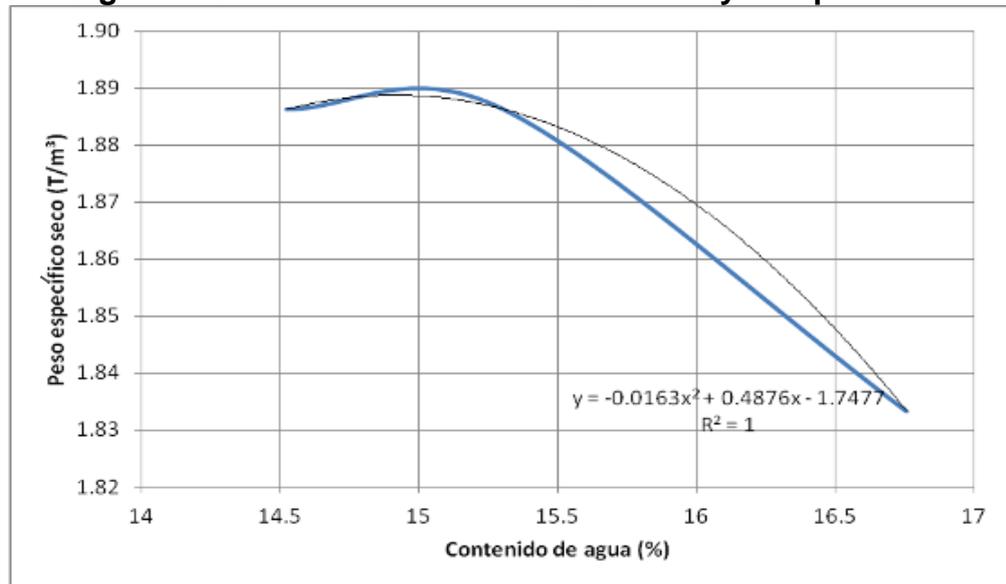
Desde esta fase del proyecto se inicia con el material contaminado, el cual fue sometido a dos semanas en contacto directo con el crudo, en un recipiente

totalmente sellado para que de esta forma se esté fuera impregnado en el material.

En las siguientes figuras 51, 52, 53, 54 y 55 se puede observar como los resultados obtenidos del material sin contaminar, varían un poco respecto a los obtenidos con el 25% de contaminante en el material.

ENSAYO #1

Figura 51: Suelo contaminado al 25% ensayo de próctor 1

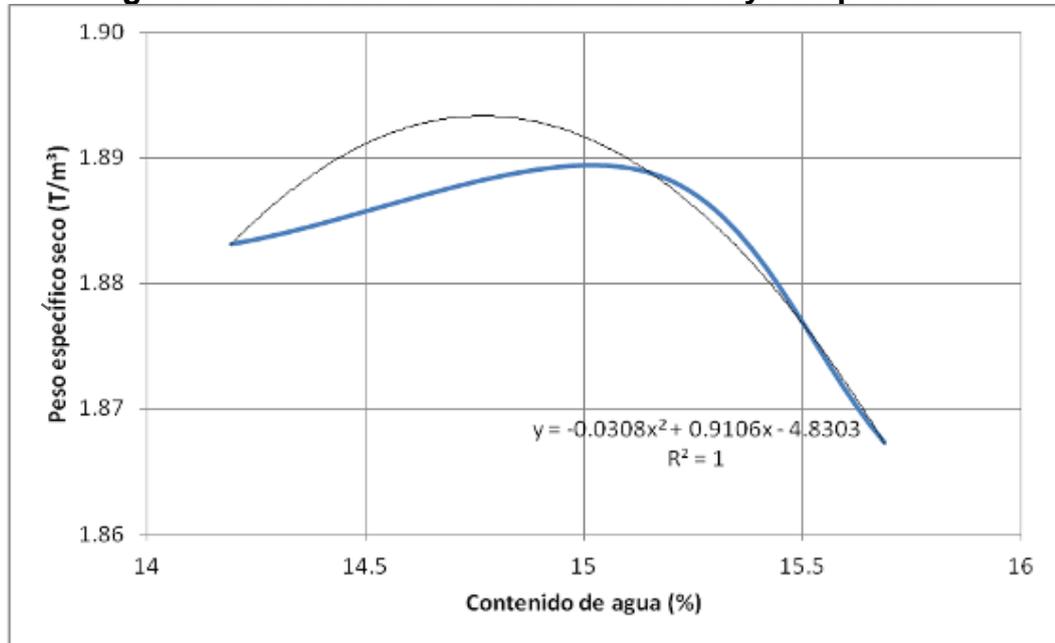


Humedad óptima = 14.96%

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 52: Suelo contaminado al 25% ensayo de próctor 2

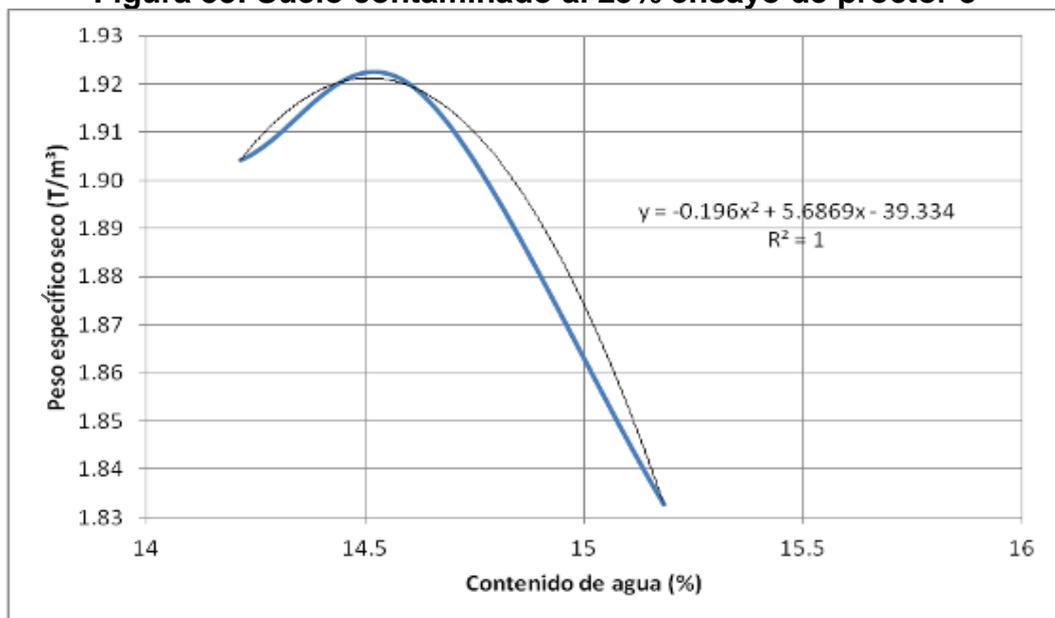


Humedad óptima = 14.78%

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 53: Suelo contaminado al 25% ensayo de próctor 3

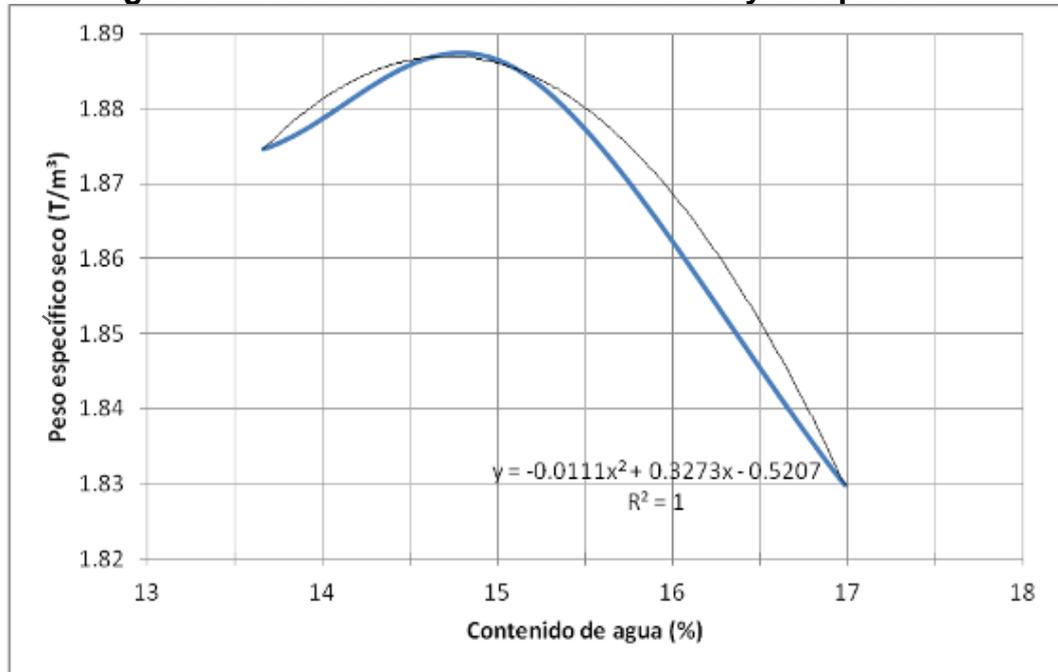


Humedad óptima = 14.51%

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 54: Suelo contaminado al 25% ensayo de próctor 4

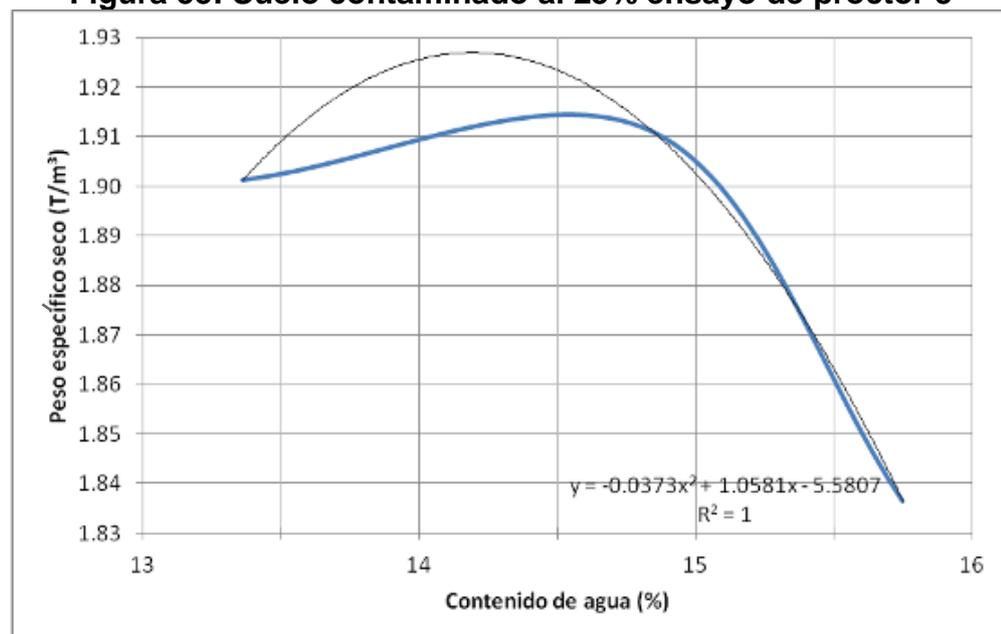


Humedad óptima = 14.74%

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 55: Suelo contaminado al 25% ensayo de próctor 5



Humedad óptima = 14.18%

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 10 promedio de las humedades óptimas obtenidas en los ensayos de próctor modificados mostrados anteriormente.

Tabla 10: Promedio próctor arena arcillosa (SC) contaminado al 25%

Próctor N°	Humedad óptima (%)	Peso específico (T/m ³)
1	14.96	1.89
2	14.78	1.9
3	14.51	1.92
4	14.74	1.89
5	14.18	1.93
Promedio	14.63	1.91

Fuente: Autor

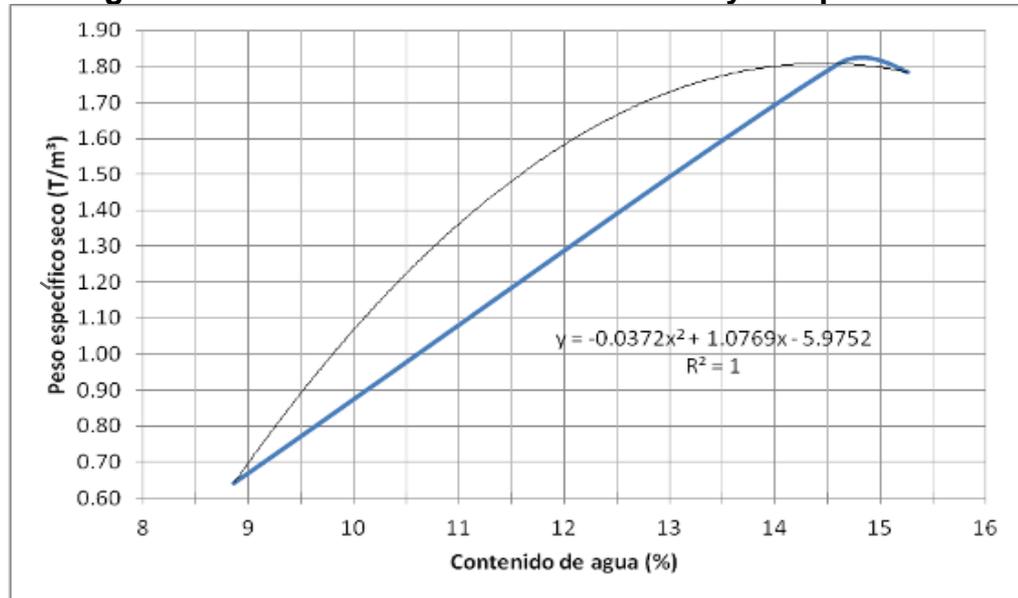
4.2.1.1.2 SUELO CONTAMINADO AL 50% DE LA POROSIDAD

Este material también fue sometido a dos semanas en contacto directo con el crudo, en un recipiente totalmente sellado para que de esta forma se esté fuera impregnado en el material con un porcentaje del 50% de la porosidad.

En las siguientes figuras 56, 57, 58, 59 y 60 se puede observar que la humedad obtenida en cada uno de los próctor es muy similar a la obtenida en los próctor modificados realizados en el material contaminado al 25%, pero aun así varia un poco respecto a al material sin contaminar.

ENSAYO #1

Figura 56: Suelo contaminado al 50% ensayo de próctor 1

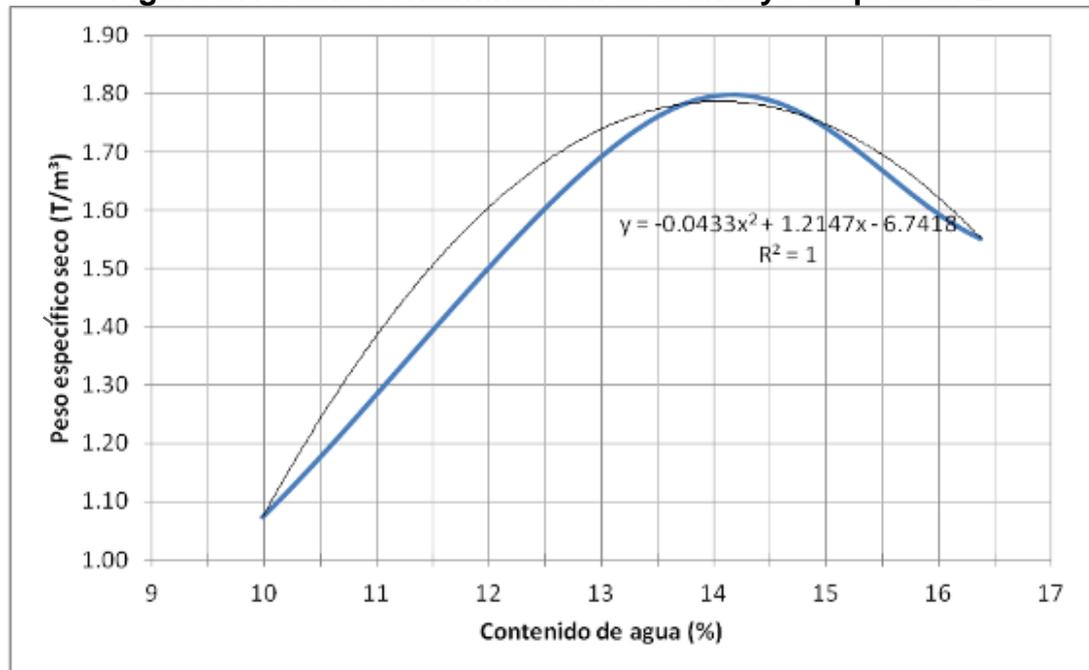


Humedad óptima = 14.47%

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 57: Suelo contaminado al 50% ensayo de próctor 2

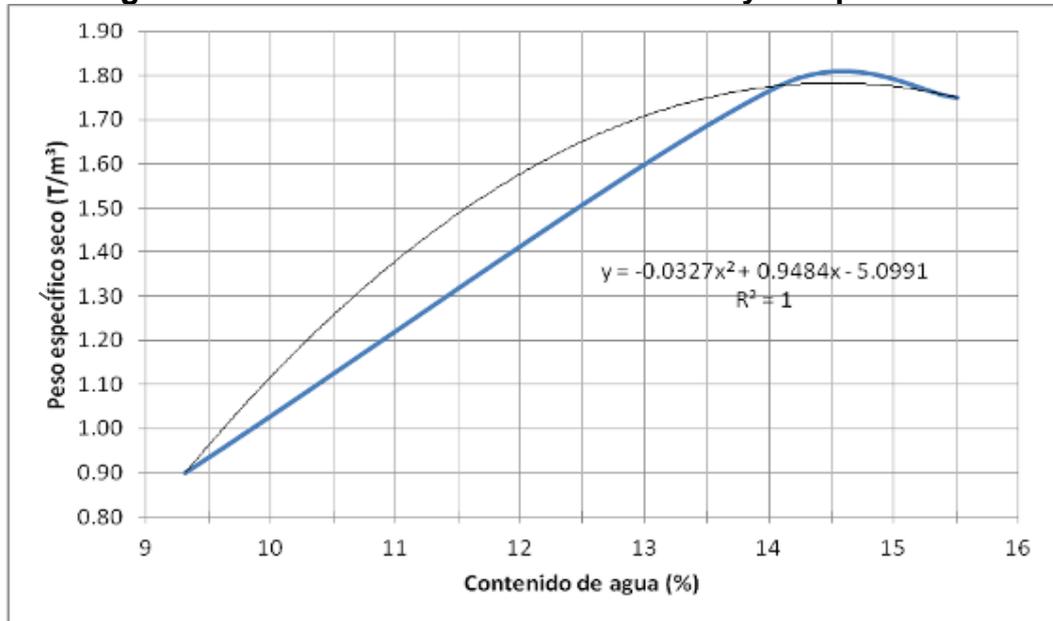


Humedad óptima = 14.03%

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 58: Suelo contaminado al 50% ensayo de próctor 3

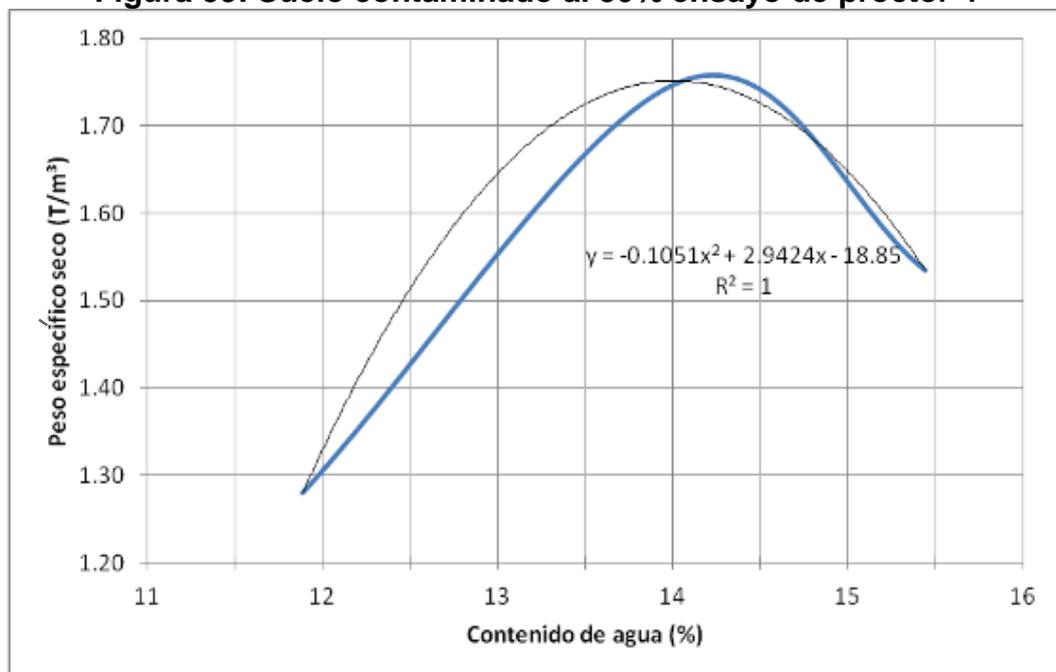


Humedad óptima = 14.50%

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 59: Suelo contaminado al 50% ensayo de próctor 4

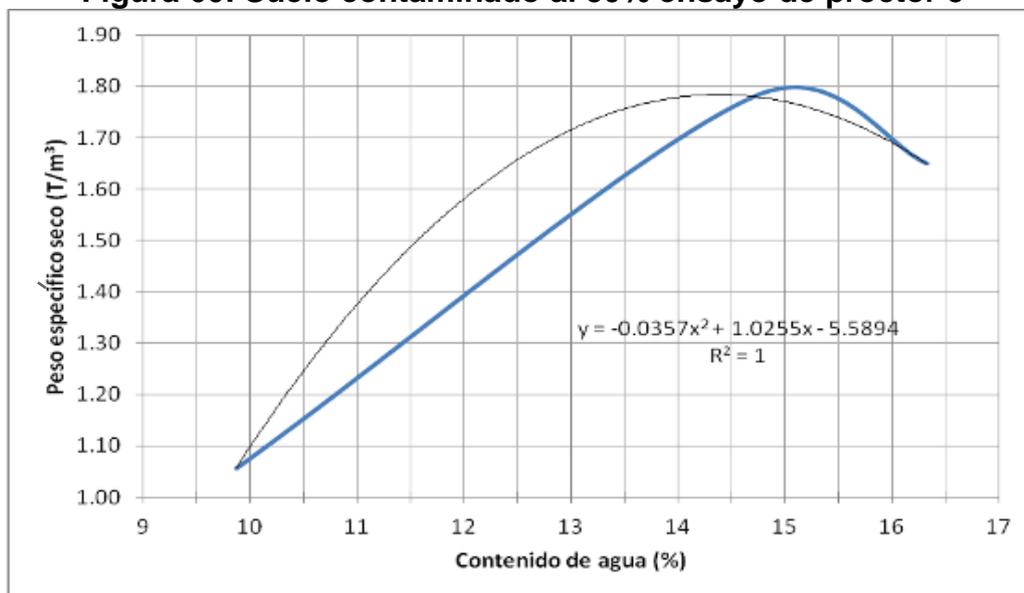


Humedad óptima = 13.89%

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 60: Suelo contaminado al 50% ensayo de próctor 5



Humedad óptima = 14.36%

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 11 promedio de las humedades óptimas obtenidas en los ensayos de próctor modificados mostrados anteriormente.

Tabla 11: Promedio próctor arena arcillosa (SC) contaminado al 50%

Próctor N°	Humedad óptima (%)	Peso específico (T/m ³)
1	14.47	1.82
2	14.03	1.79
3	14.50	1.78
4	13.89	1.75
5	14.36	1.78
Promedio	14.25	1.78

Fuente: Autor

4.2.1.1.3 SUELO CONTAMINADO AL 75% Y 100% DE LA POROSIDAD

Como se puede apreciar en las figuras 61 y 62; Debido a que el material se encontraba sobresaturado, este se debía exponer a secado en el sol para que perdiera humedad, pero esto no funciono, ya que el material continuaba muy saturado, y la hora de realizar el próctor, los puntos bajaban inmediatamente,

por lo cual fue imposible realizar el ensayo para determinar su humedad óptima, lo único que se pudo realizar a estos porcentajes de contaminación en el suelo, fueron humedades naturales, las cuales arrojaron la humedad natural del material contaminado al 75% fue del 27% y la humedad natural del material contaminado al 100% fue del 43%

Figura 61 : Extracción de una muestra del material contaminado al 100%



Fuente: Autor

Figura 62: Extracción de la muestra de material contaminado al 100% 2



Fuente: Autor

4.2.1.2 SUELO ARENA LIMOSA (SM)

4.2.1.2.1 SUELO SIN CONTAMINAR

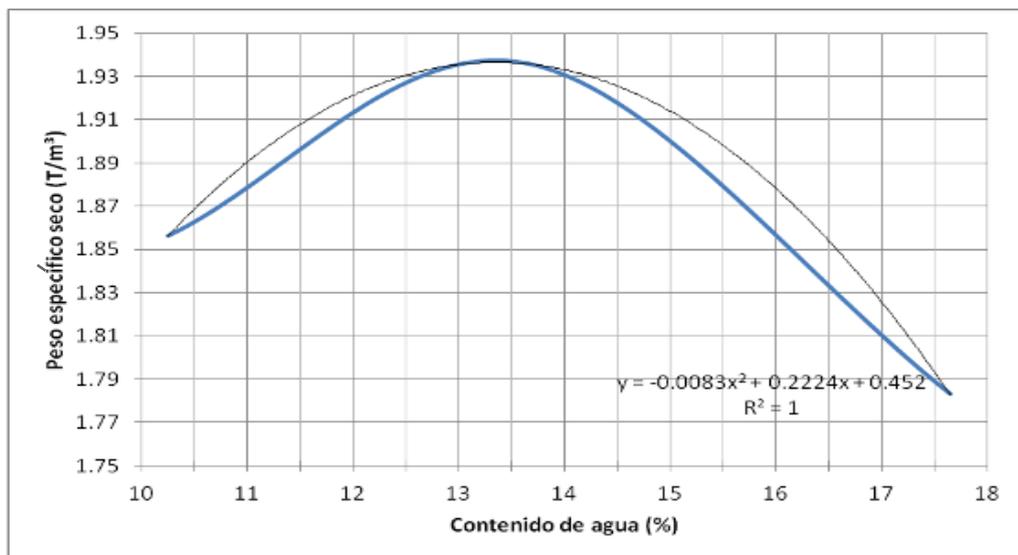
Desde este punto se cambia de material como lo hace referencia el numeral anteriormente descrito, en este material se puede observar que es un poco más duro, respecto al **ARENA ARCILLOSA (SC)**, debido a sus propiedades, y

claro esto se puede evidenciar durante el desarrollo de los ensayos, que el comportamiento del material es completamente diferente al otro.

En las siguientes figuras 63, 64, 65, 66 y 67 se demuestran los resultados obtenidos mediante el ensayo de próctor modificado, enfrentando el peso específico vs el contenido de agua para así hallar la humedad óptima en cada una de ellas, y al final se muestra una tabla donde se promedian las humedades óptimas obtenidas anteriormente para así tomar, este dato para realizar los ensayos de corte directo que se le realizan al material sin contaminar.

ENSAYO #1

Figura 63: Arena limosa (SM) virgen. Ensayo de próctor modificado 1

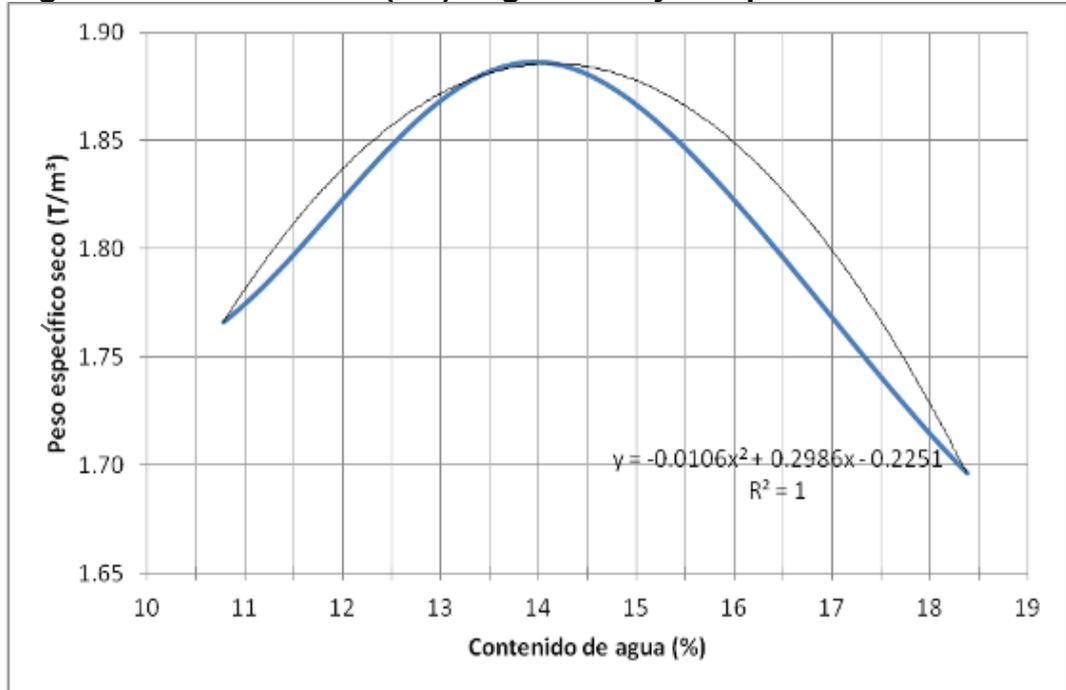


Humedad óptima = 13.40%

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 64: Arena limosa (SM) virgen. Ensayo de próctor modificado 2

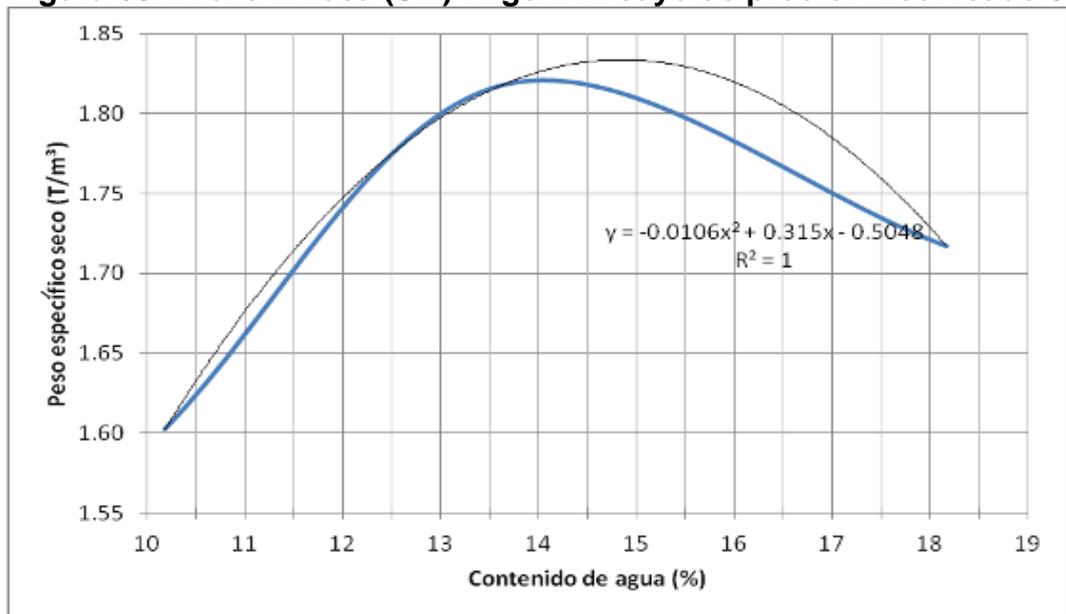


Humedad óptima = 14.08

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 65: Arena limosa (SM) virgen. Ensayo de próctor modificado 3

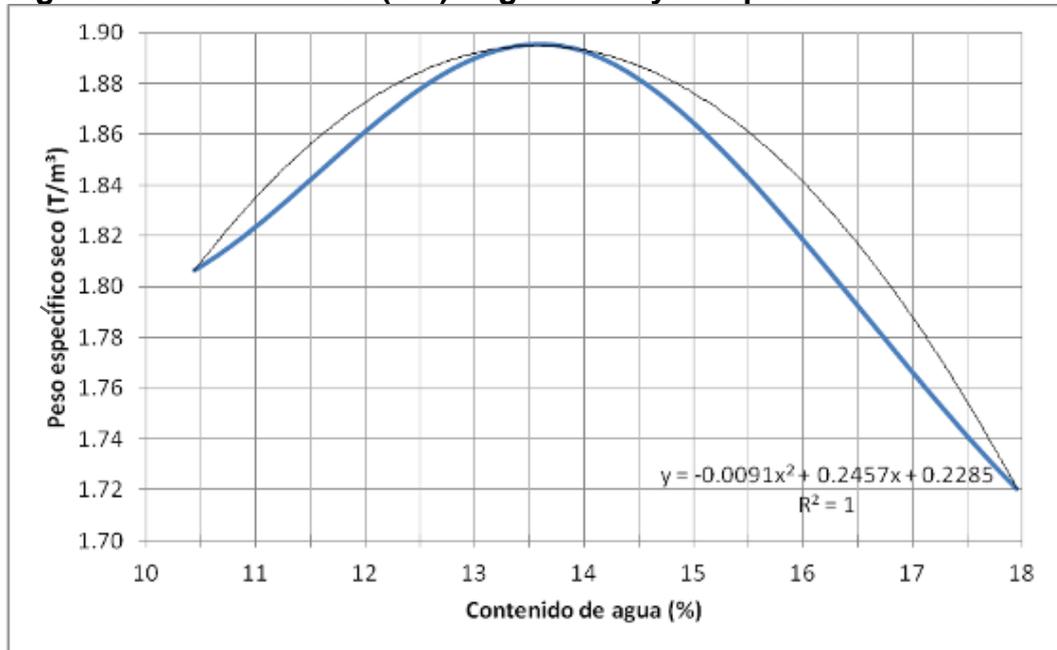


Humedad óptima = 14.86%

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 66: Arena limosa (SM) virgen. Ensayo de próctor modificado 4

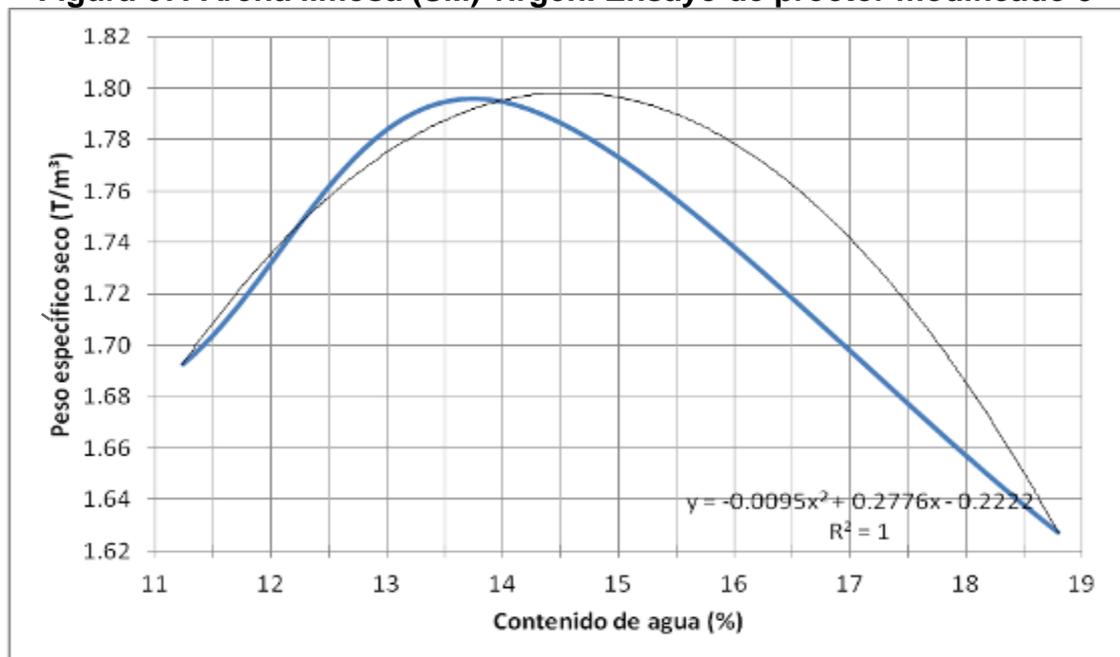


Humedad óptima = 13.50%

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 67: Arena limosa (SM) virgen. Ensayo de próctor modificado 5



Humedad óptima = 14.61%

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 12 promedio de las humedades óptimas obtenidas en los ensayos de próctor modificados mostrados anteriormente.

Tabla 12: Promedio próctor arena limosa (SM) virgen

Próctor N°	Humedad óptima (%)	Peso específico (T/m ³)
1	13.40	1.94
2	14.08	1.88
3	14.86	1.84
4	13.50	1.75
5	14.61	1.79
Promedio	14.09	1.84

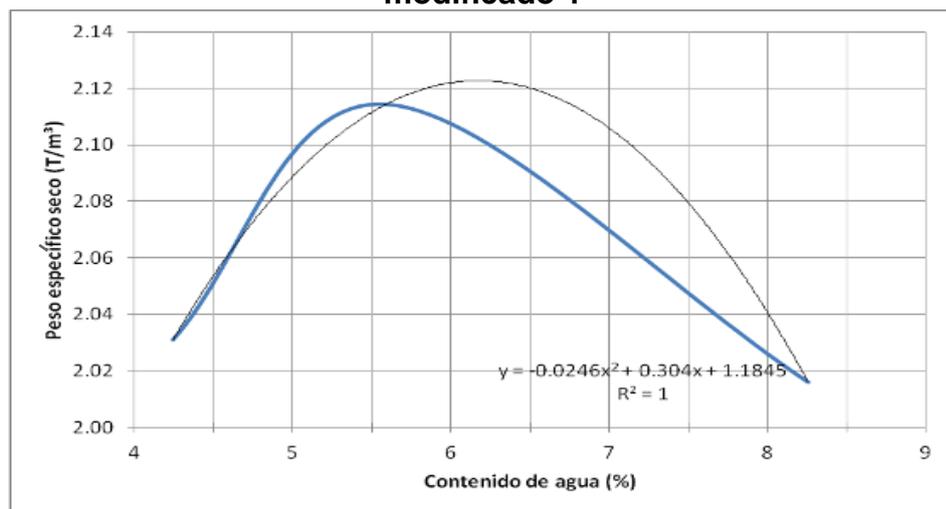
Fuente: Autor

4.2.1.2.2 SUELO CONTAMINADO AL 25% DE LA POROSIDAD

En el siguiente figuras 68, 69, 70, 71 y 72 se demuestran los resultados obtenidos del material contaminado al 25%, el cual varía considerablemente al material virgen, donde se puede apreciar que el valor de las humedades óptimas disminuye a la mitad del que se obtiene con el material sin contaminar.

ENSAYO #1

Figura 68: Arena limosa (SM) contaminado al 25% ensayo de próctor modificado 1

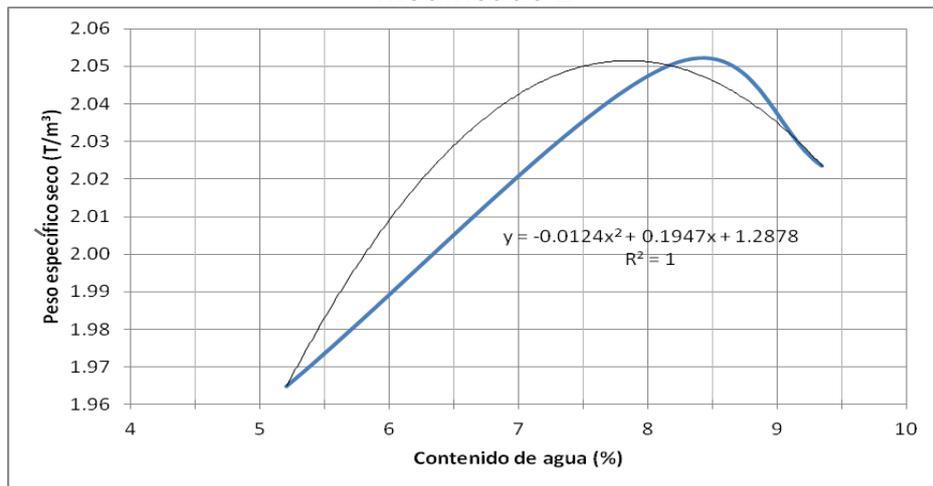


Humedad óptima = 6.18%

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 69: Arena limosa (SM) contaminado al 25% ensayo de próctor modificado 2

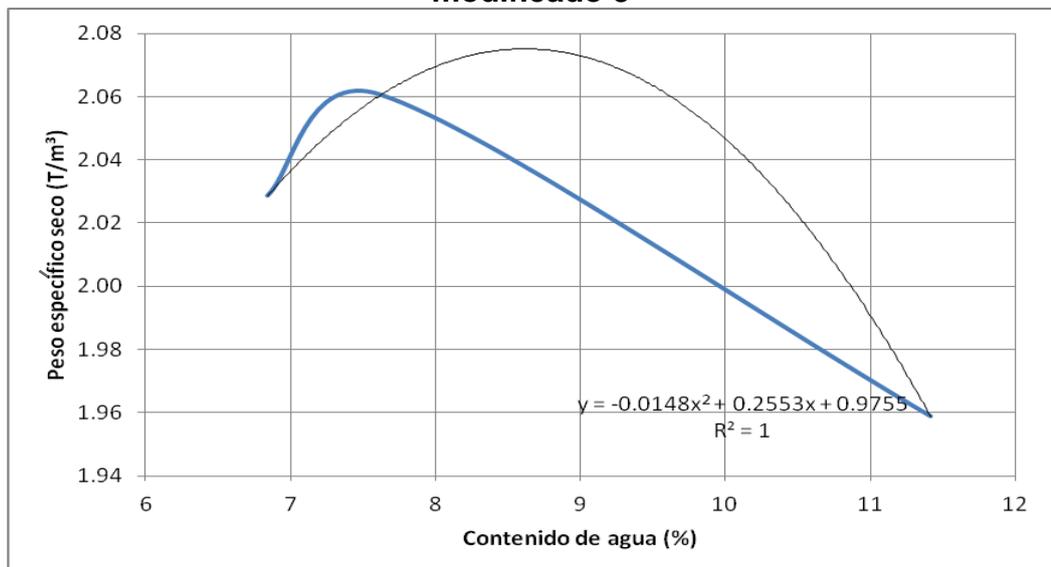


Humedad optima= 7.85%

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 70: Arena limosa (SM) contaminado al 25% ensayo de próctor modificado 3

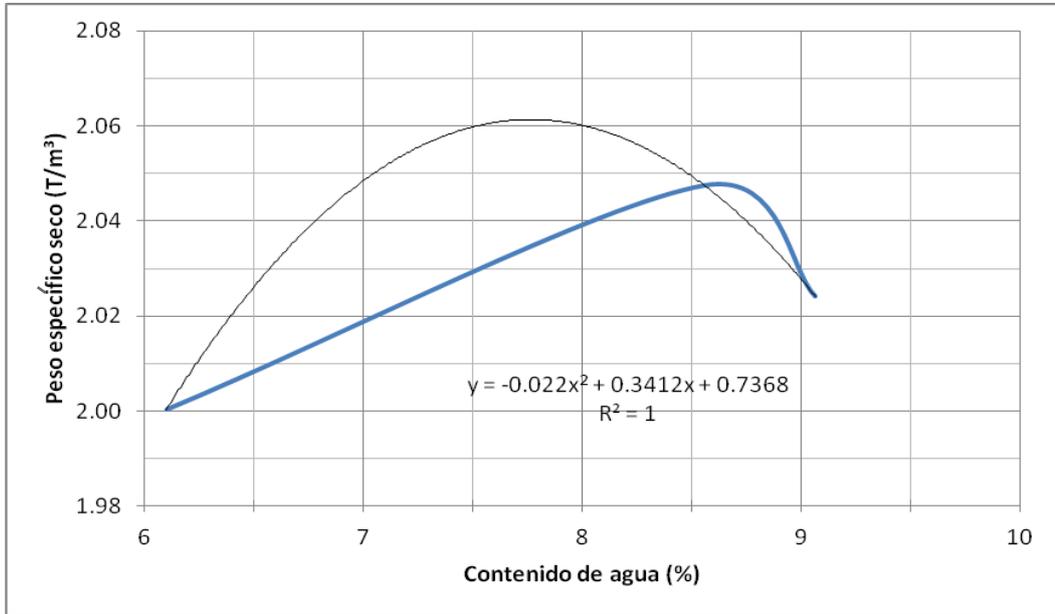


Humedad optima= 8.63%

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 71: Arena limosa (SM) contaminado al 25% ensayo de próctor modificado 4

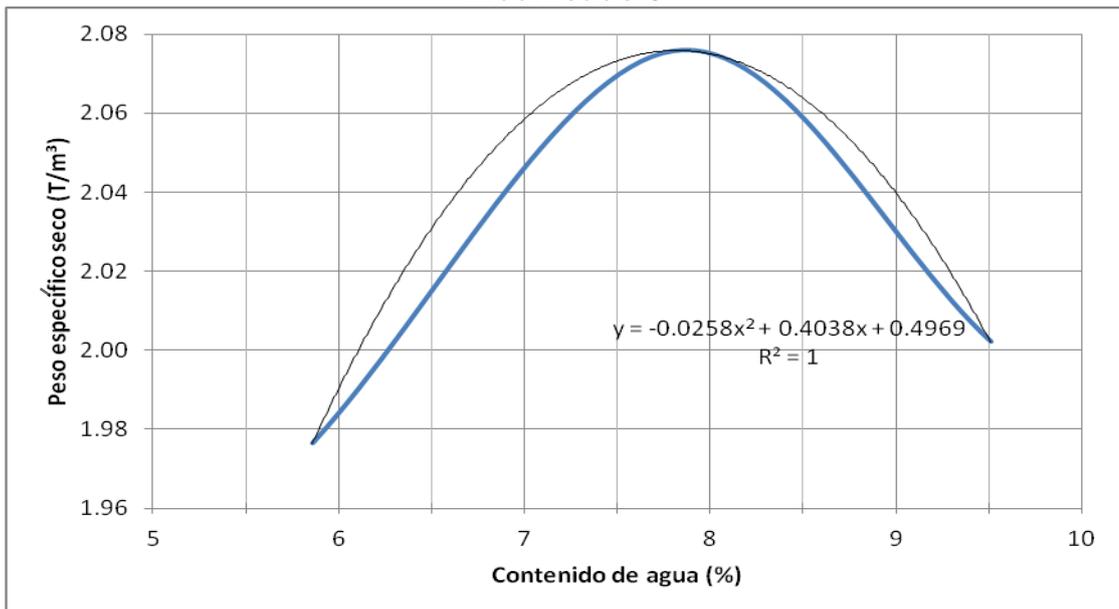


Humedad óptima= 7.75%

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 72: Arena limosa (SM) contaminado al 25% ensayo de próctor modificado 5



Humedad óptima= 7.83%

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 13 promedio de las humedades óptimas obtenidas en los ensayos de próctor modificados mostrados anteriormente

Tabla 13: Promedio próctor arena limosa (SM) contaminado al 25%

Próctor N°	Humedad óptima (%)	Peso específico (T/m ³)
1	6.18	2.12
2	7.85	2.05
3	8.63	2.07
4	7.75	2.06
5	7.83	2.07
Promedio	7.65	2.07

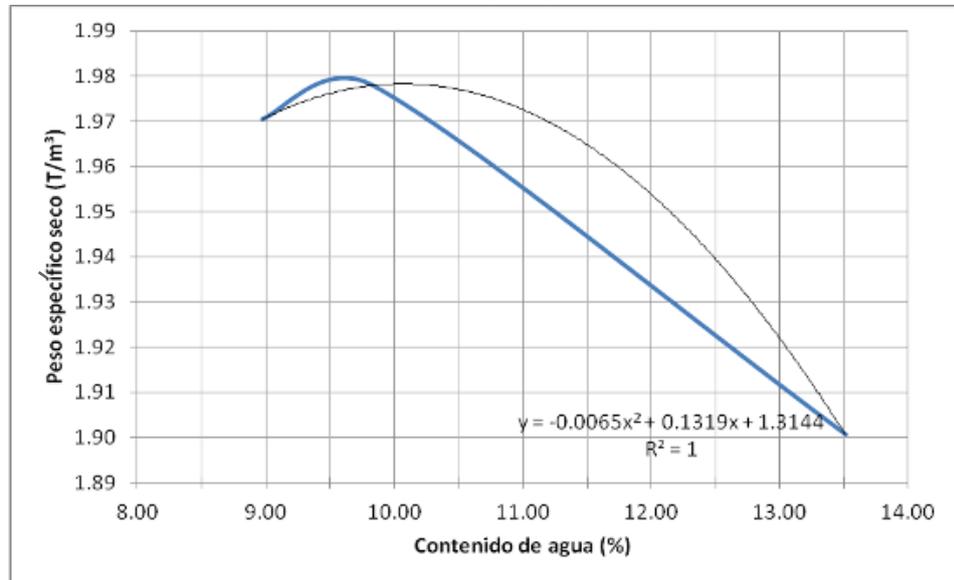
Fuente: Autor

4.2.1.2.3 SUELO CONTAMINADO AL 50% DE LA POROSIDAD

En las siguientes figuras 73, 74, 75, 76 y 77 se aprecia los resultados obtenidos donde se puede deduce que hay una inconsistencia respecto a los demás valores obtenidos, debido a que en el material **ARENA ARCILLOSA (SC)** el cual baja linealmente, y donde se determinó que este material tiende a una parábola inversa.

ENSAYO #1

Figura 73: Arena limosa (SM) contaminado al 50% ensayo de próctor modificado 1

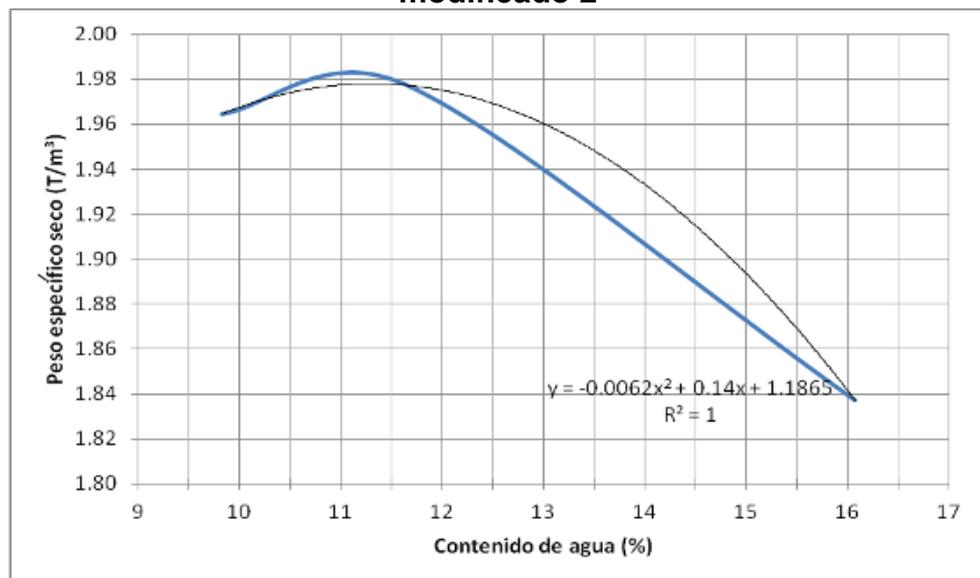


Humedad óptima= 10.15%

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 74: Arena limosa (SM) contaminado al 50% ensayo de próctor modificado 2

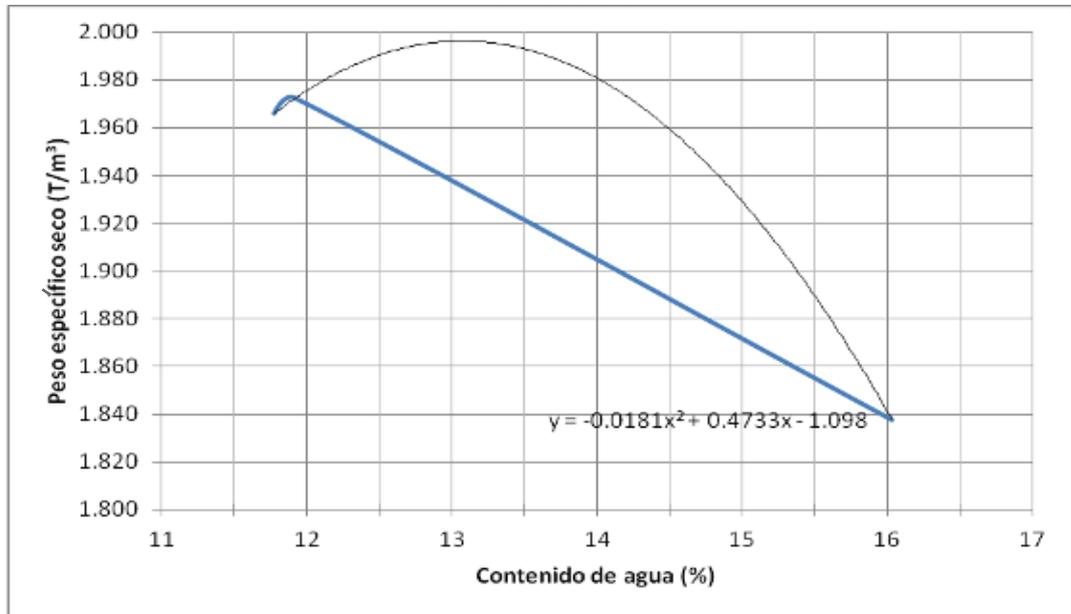


Humedad óptima= 11.29%

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 75: Arena limosa (SM) contaminado al 50% ensayo de próctor modificado 3

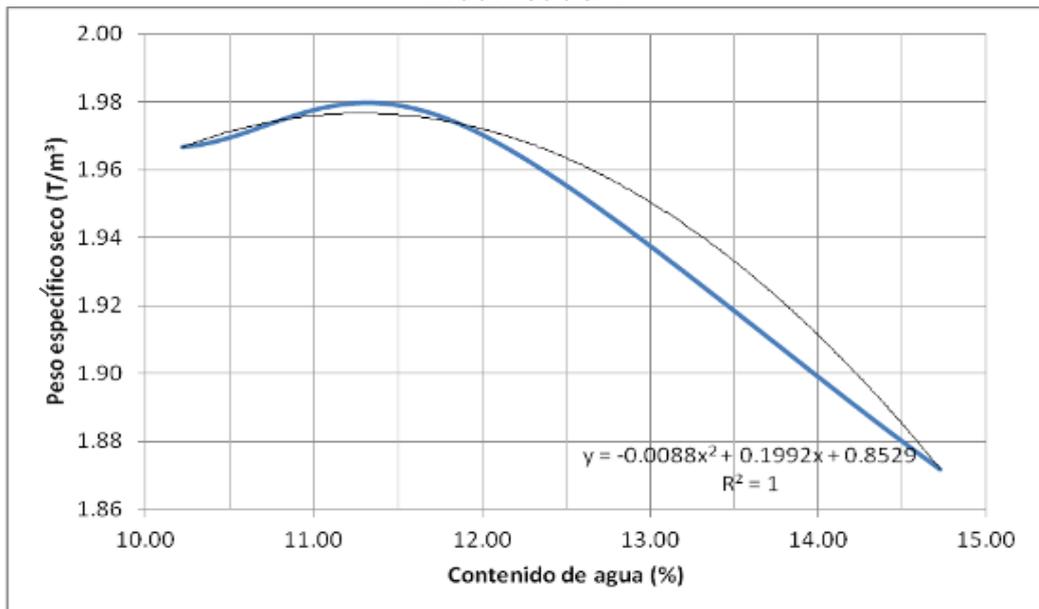


Humedad optima= 13.07%

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 76: Arena limosa (SM) contaminado al 50% ensayo de próctor modificado 4

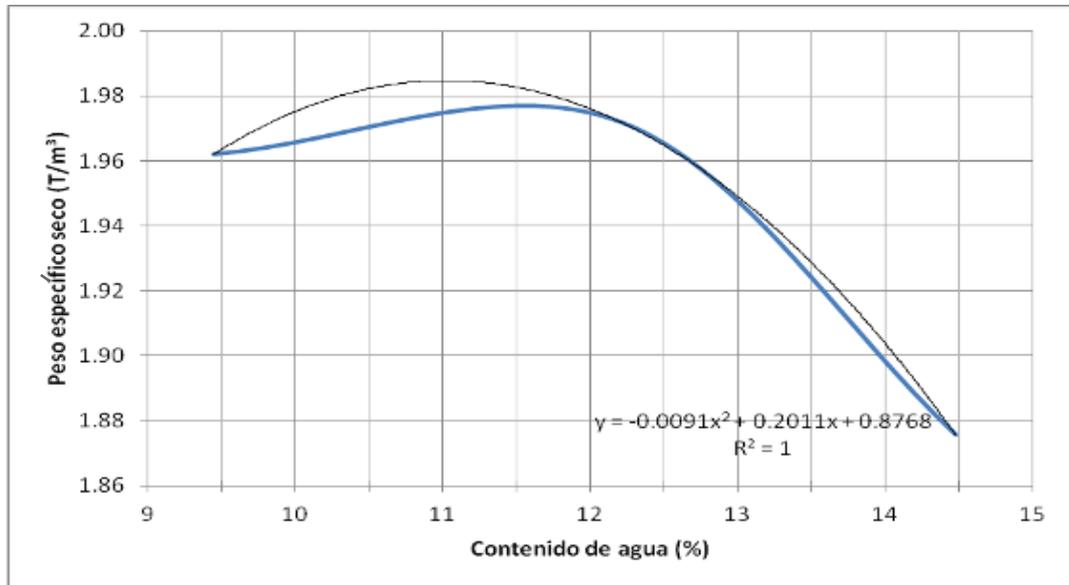


Humedad optima= 11.32%

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 77: Arena limosa (SM) contaminado al 50% ensayo de próctor modificado 5



Humedad óptima= 11.05%

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 14 promedio de las humedades óptimas obtenidas en los ensayos de próctor modificados mostrados anteriormente

Tabla 14: Promedio próctor arena limosa (SM) contaminado al 50%

Próctor N°	Humedad óptima (%)	Peso específico (T/m ³)
1	10.15	1.98
2	11.29	1.98
3	13.07	2
4	11.32	1.98
5	11.05	1.99
Promedio	11.38	1.99

Fuente: Autor

4.2.1.2.4 SUELO CONTAMINADO AL 75% Y 100% DE LA POROSIDAD

Debido a que el material se encontraba sobresaturado, este se debía exponer a secado en el sol para que perdiera humedad, pero esto no funcionó, ya que el material continuaba muy saturado, y la hora de realizar el próctor, los puntos bajaban inmediatamente, por lo cual fue imposible realizar el ensayo para determinar su humedad óptima, lo único que se pudo realizar a estos

porcentajes de contaminación en el suelo, fueron humedades naturales, las cuales arrojaron la humedad natural del material contaminado al 75% fue del 17% y la humedad natural del material contaminado al 100% fue del 31%.

4.2.2. ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

4.2.2.1 SUELO ARENA ARCILLOSA (SC)

4.2.2.1.1 SUELO SIN CONTAMINAR

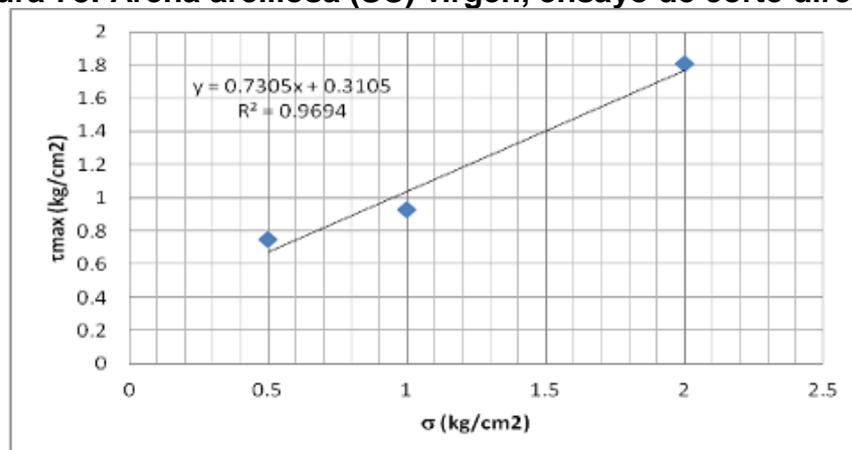
Al haber realizados el ensayo de próctor modificado se obtuvo la humedad óptima del suelo arena arcillosa (SC) en su estado virgen, es decir sin contaminar el material. Basado en este valor se procede a realizar el ensayo de corte directo sobre el material, para determinar el ángulo de fricción, el esfuerzo cortante y cohesión.

De esta manera se realizaron ensayos a este material los cuales, serán interpretados a través de las figuras 78, 79, 80, 81 y 82 en la cual se utilizó el esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo, la cuales arrojaran la cohesión y el ángulo de fricción interno.

Al final de las figuras se realiza un cuadro, tablas 15,16,17,18 y 19, en el cual están todos los valores de los ensayos realizados, el cual arroja los valores que anteriormente se habían mencionado de una forma ordenada y la cual se puede interpretar rápidamente.

ENSAYO #1

Figura 78: Arena arcillosa (SC) virgen, ensayo de corte directo 1



Fuente: Autor

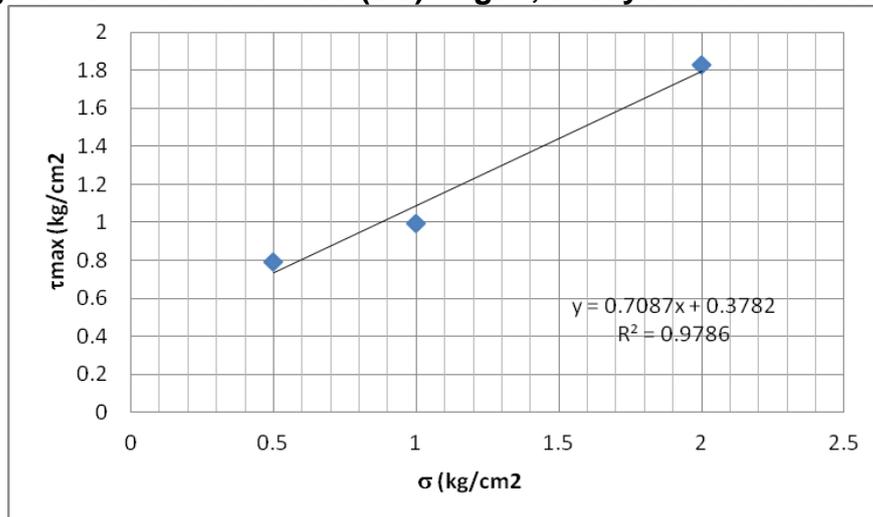
Tabla 15: Corte 1 arena arcillosa (SC) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.750738221
2	1	0.928519906
3	2	1.808962538
Ángulo fricción interna (°)=		35.20231367
Cohesión(kg/cm ²)=		0.3105

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 79: Arena arcillosa (SC) virgen, ensayo de corte directo 2



Fuente: Autor

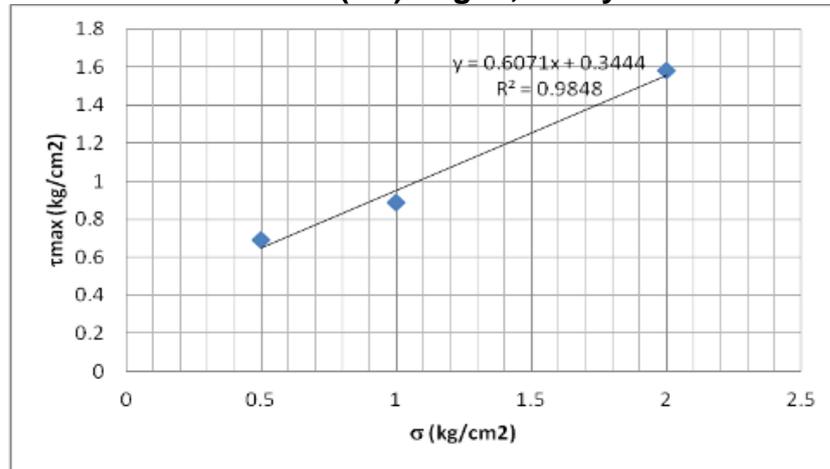
Tabla 16: Corte 2 arena arcillosa (SC) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.793067193
2	1	0.996246262
3	2	1.825894127
Ángulo fricción interna(°)=		34.54940482
Cohesión(kg/cm ²)=		0.3782

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 80: Arena arcillosa (SC) virgen, ensayo de corte directo 3



Fuente: Autor

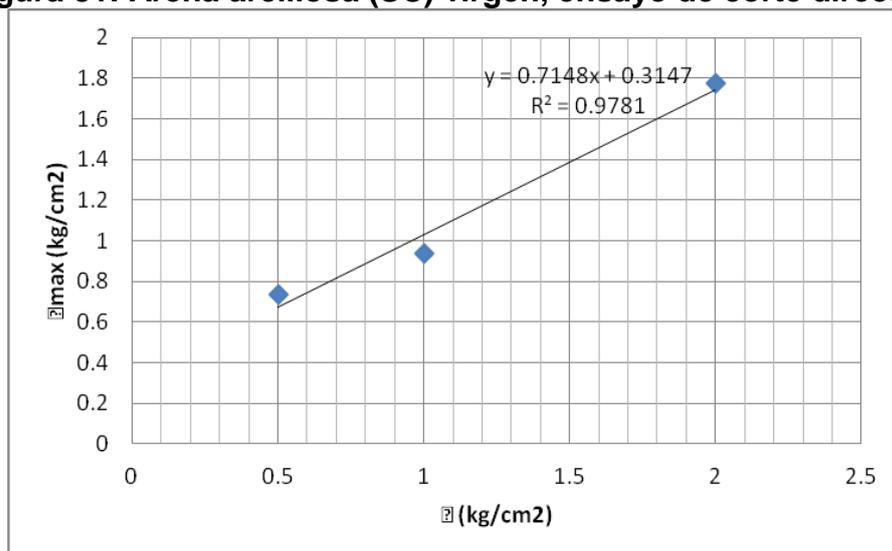
Tabla 17: Corte 3 arena arcillosa (SC) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{m\acute{a}x.}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.691477659
2	1	0.886190933
3	2	1.580386086
Ángulo fricción interna(°)=		30.65122029
Cohesión(kg/cm2)=		0.3444

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 81: Arena arcillosa (SC) virgen, ensayo de corte directo 4



Fuente: Autor

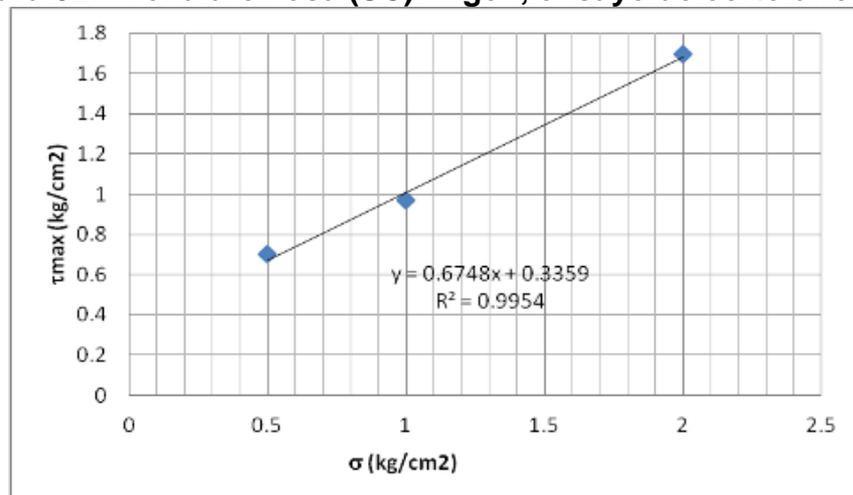
Tabla 18: Corte 4 arena arcillosa (SC) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.733806632
2	1	0.936985701
3	2	1.77509936
Ángulo fricción interna(°)=		34.76819397
Cohesión(kg/cm2)=		0.3147

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 82: Arena arcillosa (SC) virgen, ensayo de corte directo 5



Fuente: Autor

Tabla 19: Corte 5 arena arcillosa (SC) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.699943453
2	1	0.970848879
3	2	1.698907209
Ángulo fricción interna (°)=		33.66265613
Cohesión (kg/cm2)=		0.3359

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 20 Se aprecian todos los datos obtenidos en cada uno de los ensayos previos para, de esta forma ver el comportamiento del material y si este varía o tiene alguna forma a seguir en su comportamiento.

Tabla 20: Resumen corte directo arena arcillosa (SC) virgen

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Promedio	Rango	
σ (kg/cm ²)	τ (kg/cm ²)	Menor	Mayor					
0.5	0.750738221	0.793067193	0.691477659	0.733806632	0.699943453	0.733806632	0.691477659	0.793067193
1	0.928519906	0.996246262	0.886190933	0.936985701	0.970848879	0.943758336	0.886190933	0.996246262
2	1.808962538	1.825894127	1.580386086	1.77509936	1.698907209	1.737849864	1.580386086	1.825894127
Angulo fricción (°)	35.20231367	34.54940482	30.65122029	34.76819397	33.66265613	33.76675778	30.65122029	35.20231367
Cohesión (kg/cm ²)	0.3105	0.3782	0.3444	0.3147	0.3359	0.33674	0.3105	0.3782

Fuente: Autor

4.2.2.1.2 SUELO CONTAMINADO AL 25% DE LA POROSIDAD

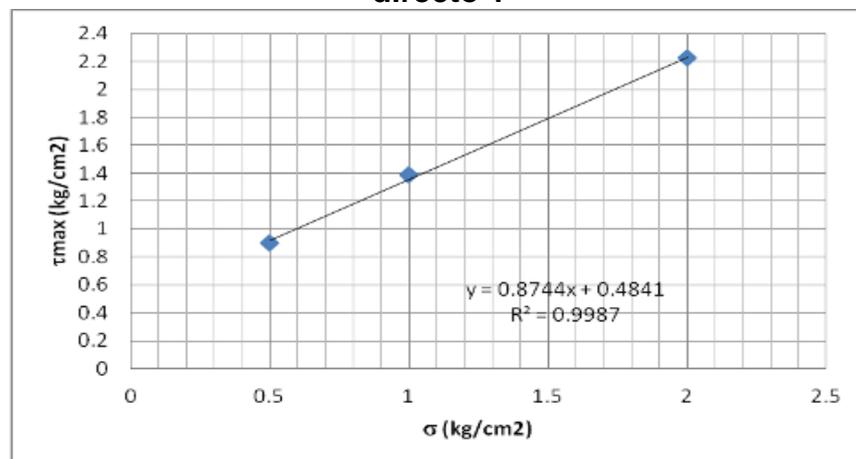
Al haber realizado el ensayo de próctor modificado al material contaminado al 25% se obtuvo la humedad óptima del suelo arena arcillosa (SC). Basado en este valor se procede a realizar el ensayo de corte directo sobre el material, para determinar el ángulo de fricción, el esfuerzo cortante y cohesión.

De esta manera se realizaron ensayos a este material los cuales, serán interpretados a través de las siguientes figuras 83, 84, 85, 86 y 87 la cuales enfrentan el esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo, la cuales arrojaran la cohesión y el ángulo de fricción interno.

Al final de las gráficas se realiza un cuadro, tablas 21, 22, 23, 24 y 25, en el cual están todos los valores de los ensayos realizados, el cual arroja los valores que anteriormente se habían mencionado de una forma ordenada y la cual se puede interpretar rápidamente.

ENSAYO #1

Figura 83: Arena arcillosa (SC) contaminado al 25%, ensayo de corte directo 1



Fuente: Autor

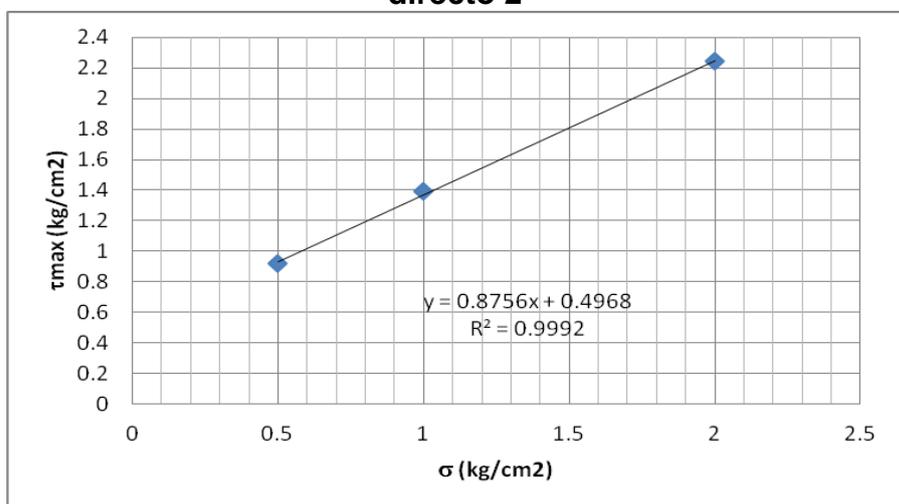
Tabla 21: Corte 1 arena arcillosa (SC) contaminado al 25%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.903122522
2	1	1.385672811
3	2	2.223786471
Ángulo fricción interna (°)=		41.36206678
Cohesión (kg/cm2)=		0.4841

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 84: Arena arcillosa (SC) contaminado al 25%, ensayo de corte directo 2



Fuente: Autor

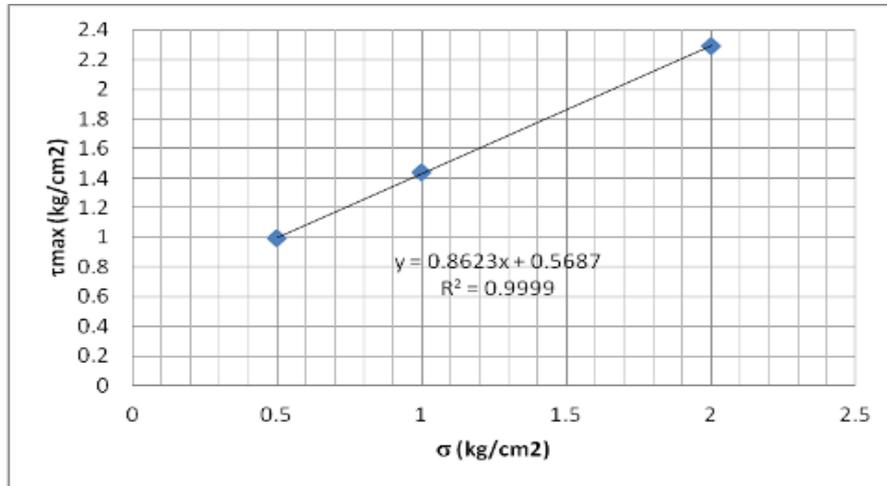
Tabla 22: Corte 2 arena arcillosa (SC) contaminado al 25%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.920054111
2	1	1.394138606
3	2	2.24071806
Ángulo fricción interna(°)=		41.36206678
Cohesión=		0.4968

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 85: Arena arcillosa (SC) contaminado al 25%, ensayo de corte directo 3



Fuente: Autor

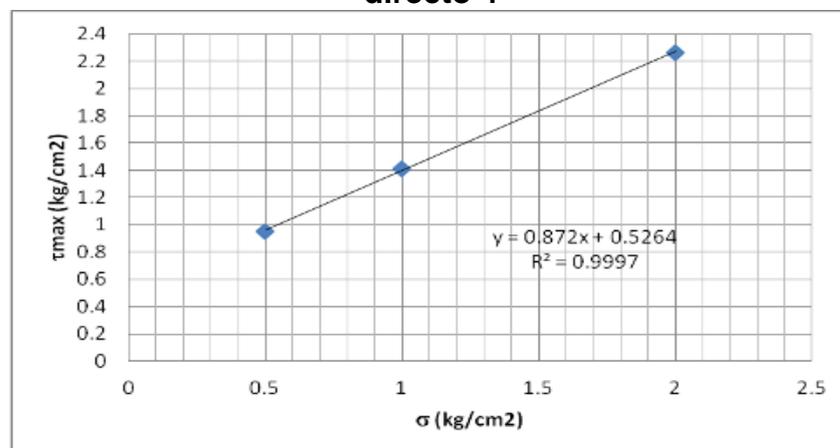
Tabla 23: Corte 3 arena arcillosa (SC) contaminado al 25%

	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)
1	0.5	0.996246262
2	1	1.436467578
3	2	2.291512827
Ángulo fricción interna (°)=		40.81097086
Cohesión (kg/cm ²)=		0.5687

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 86: Arena arcillosa (SC) contaminado al 25%, ensayo de corte directo 4



Fuente: Autor

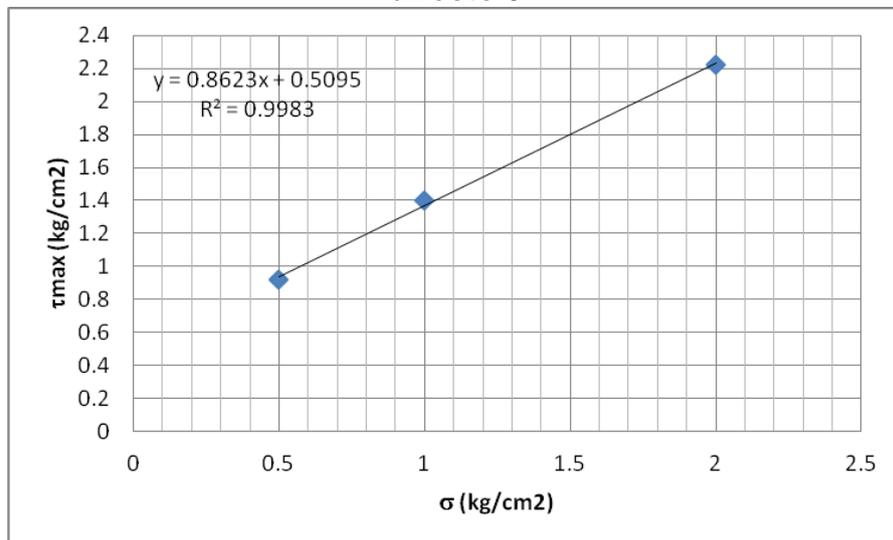
Tabla 24: Corte 4 arena arcillosa (SC) contaminado al 25%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.95391729
2	1	1.411070195
3	2	2.266115443
Ángulo fricción interna(°)=		41.17939443
Cohesión(kg/cm2)=		0.5264

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 87: Arena arcillosa (SC) contaminado al 25%, ensayo de corte directo 5



Fuente: Autor

Tabla 25: Corte 5 arena arcillosa (SC) contaminado al 25%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.920054111
2	1	1.4026044
3	2	2.223786471
Ángulo fricción interna(°)=		40.99569741
Cohesión(kg/cm2)=		0.5095

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 26 Se aprecian todos los datos obtenidos en cada uno de los ensayos previos para, de esta forma ver el comportamiento del material y si este varía o tiene alguna forma a seguir en su comportamiento.

Tabla 26: Resumen corte directo arena arcillosa (SC) contaminado al 25%

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Promedio	Rango	
σ (kg/cm ²)	τ (kg/cm ²)	Menor	Mayor					
0.5	0.90312252	0.92005411	0.99624626	0.95391729	0.92005411	0.93867886	0.90312252	0.99624626
1	1.38567281	1.39413861	1.43646758	1.41107019	1.4026044	1.40599072	1.38567281	1.43646758
2	2.22378647	2.24071806	2.29151283	2.26611544	2.22378647	2.24918385	2.22378647	2.29151283
Angulo fricción (°)	41.3620668	41.3620668	40.8109709	41.1793944	40.9956974	41.1420393	40.8109709	41.3620668
Cohesión (kg/cm ²)	0.4841	0.4968	0.5687	0.5264	0.5095	0.5171	0.4841	0.5687

Fuente: Autor

4.2.2.1.3 SUELO CONTAMINADO AL 50% DE LA POROSIDAD

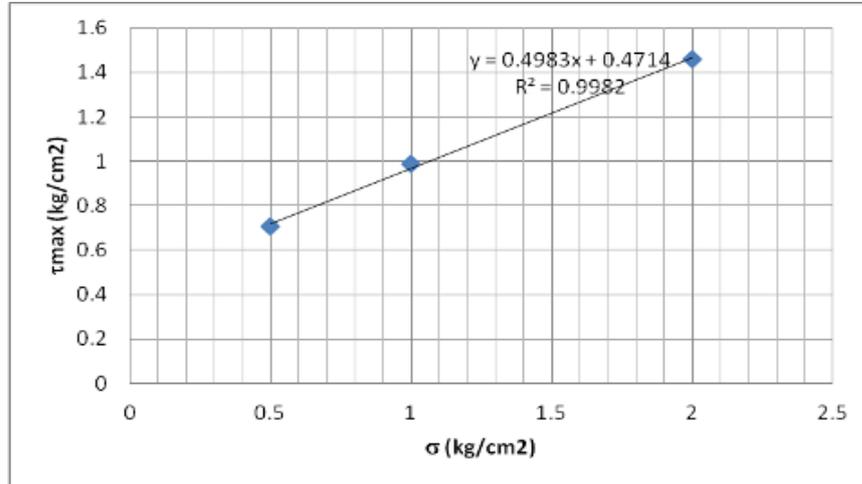
Al haber realizado el ensayo de próctor modificado al material contaminado al 50% se obtuvo la humedad óptima del suelo arena arcillosa (SC). Basado en este valor se procede a realizar el ensayo de corte directo sobre el material, para determinar el ángulo de fricción, el esfuerzo cortante y cohesión.

De esta manera se realizaron ensayos a este material los cuales, serán interpretados a través de las siguientes figuras 88, 89, 90, 91 y 92 las cuales enfrentan el esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo, las cuales arrojarán la cohesión y el ángulo de fricción interno.

Al final de las citadas figuras se realiza un cuadro, tablas 27, 28, 29, 30 y 31, en el cual están todos los valores de los ensayos realizados, el cual arroja los valores que anteriormente se habían mencionado de una forma ordenada y la cual se puede interpretar rápidamente.

ENSAYO #1

Figura 88: Arena arcillosa (SC) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 1



Fuente: Autor

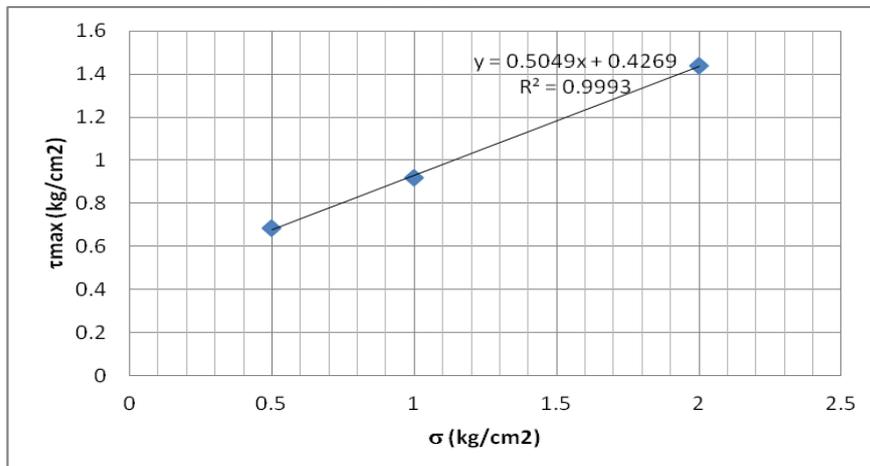
Tabla 27: Corte 1 arena arcillosa (SC) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.708409248
2	1	0.987780468
3	2	1.461864962
Ángulo fricción interna(°)=		26.67055268
Cohesión (kg/cm2)=		0.4714

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 89: Arena arcillosa (SC) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 2



Fuente: Autor

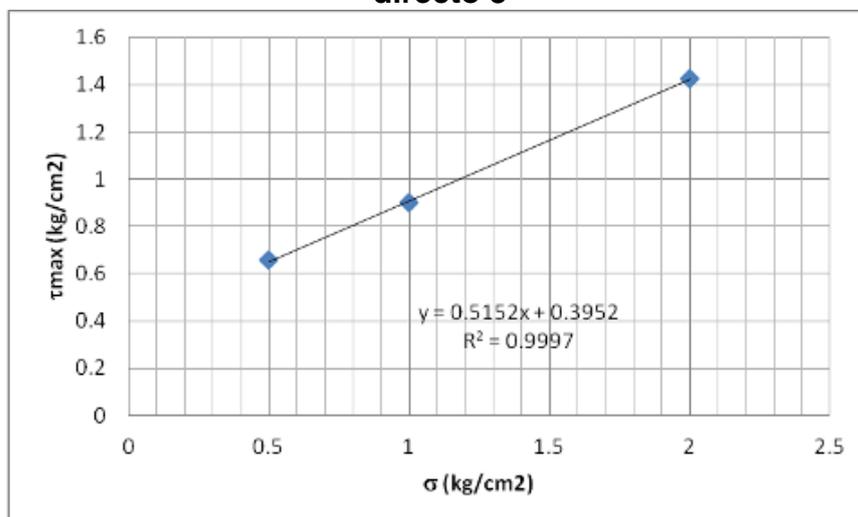
Tabla 28: Corte 2 arena arcillosa (SC) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.687244762
2	1	0.920054111
3	2	1.440700476
Ángulo fricción interna(°)=		26.67055268
Cohesión(kg/cm2)=		0.4269

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 90: Arena arcillosa (SC) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 3



Fuente: Autor

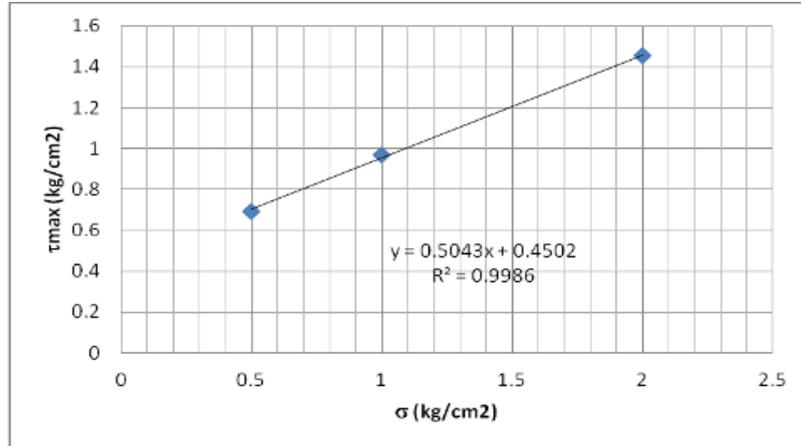
Tabla 29: Corte 3 arena arcillosa (SC) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.657614481
2	1	0.903122522
3	2	1.428001784
Ángulo fricción interna(°)=		27.18464848
Cohesión(kg/cm2)=		0.3952

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 91: Arena arcillosa (SC) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 4



Fuente: Autor

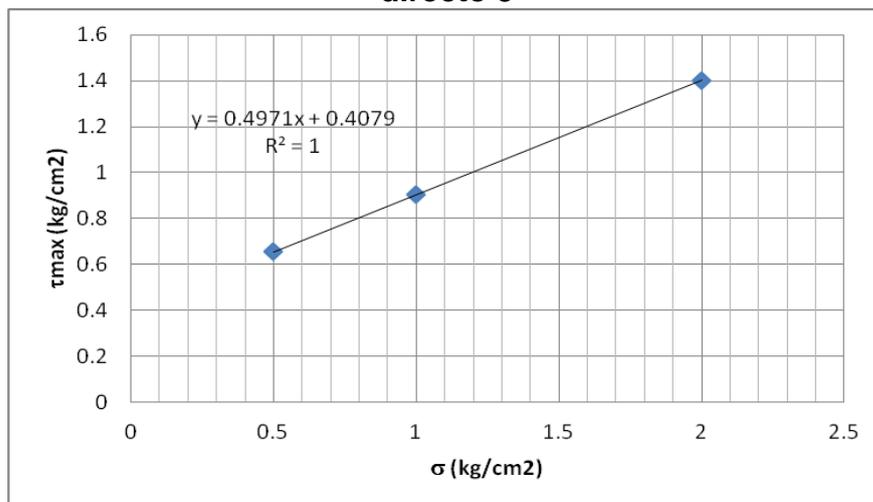
Tabla 30: Corte 4 arena arcillosa (SC) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.691477659
2	1	0.970848879
3	2	1.453399168
Ángulo fricción interna(°)=		26.92818634
Cohesión(kg/cm2)=		0.4502

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 92: Arena arcillosa (SC) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 5



Fuente: Autor

Tabla 31: Corte 5 arena arcillosa (SC) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.657614481
2	1	0.903122522
3	2	1.4026044
Ángulo fricción interna(°)=		26.41174995
Cohesión(kg/cm2)=		0.4079

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 32 Se aprecian todos los datos obtenidos en cada uno de los ensayos previos para, de esta forma ver el comportamiento del material y si este varia o tiene alguna forma a seguir en su comportamiento

Tabla 32: Resumen corte directo arena arcillosa (SC) contaminado al 50%

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Promedio	Rango	
σ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	Menor	Mayor
0.5	0.70840925	0.68724476	0.65761448	0.69147766	0.65761448	0.68047213	0.65761448	0.70840925
1	0.98778047	0.92005411	0.90312252	0.97084888	0.90312252	0.9369857	0.90312252	0.98778047
2	1.46186496	1.44070048	1.42800178	1.45339917	1.4026044	1.43731416	1.4026044	1.46186496
Angulo fricción (°)	26.6705527	26.6705527	27.1846485	26.9281863	26.4117499	26.773138	26.4117499	27.1846485
Cohesión (kg/cm2)	0.4714	0.4269	0.3952	0.4502	0.4079	0.43032	0.3952	0.4714

Fuente: Autor

4.2.2.2 SUELO ARENA LIMOSA (SM)

4.2.2.2.1 SUELO SIN CONTAMINAR

Al haber realizados el ensayo de próctor modificado se obtuvo la humedad óptima del suelo arena limosa (SM) en su estado virgen, es decir sin contaminar el material. Basado en este valor se procede a realizar el ensayo de corte directo sobre el material, para determinar el ángulo de fricción, el esfuerzo cortante y cohesión.

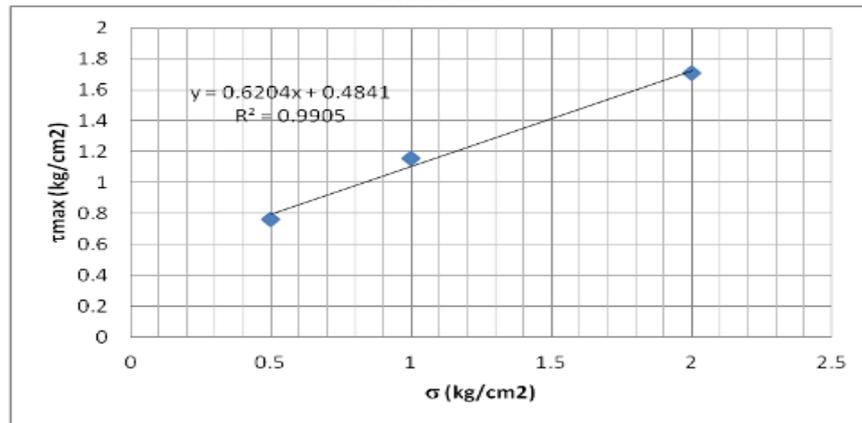
De esta manera se realizaron ensayos a este material los cuales, serán interpretados a través de las siguiente figuras 93, 94, 95, 96 y 97 las cuales enfrentan el esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo, la cuales arrojaran la cohesión y el ángulo de fricción interno.

Al final de las citadas figuras se realiza un cuadro, tablas 33, 34, 35, 36 y 37, en el cual están todos los valores de los ensayos realizados, el cual arroja los

valores que anteriormente se habían mencionado de una forma ordenada, que permite comprar un ensayo vs el otro.

ENSAYO #1

Figura 93: Suelo arena limosa (SM) sin contaminar, ensayo de corte directo 1



Fuente: Autor

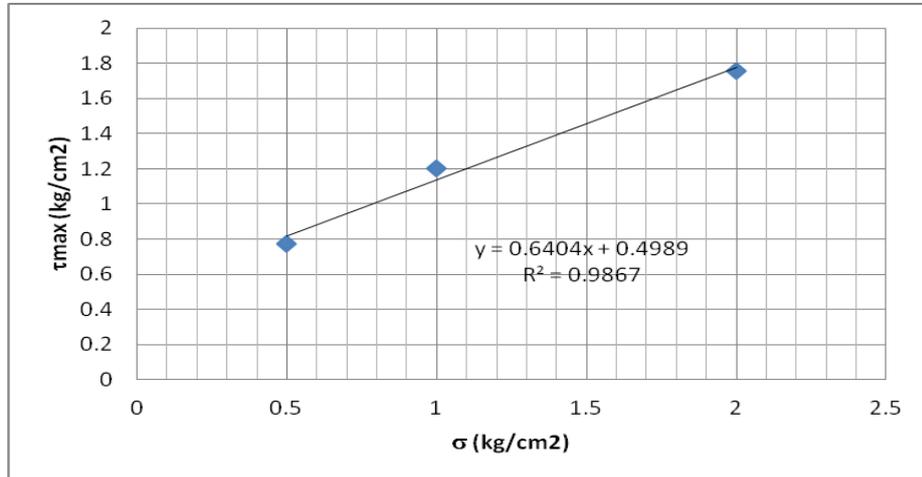
Tabla 33: Corte 1 arena limosa (SM) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{m\acute{a}x.}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.759204015
2	1	1.157096359
3	2	1.707373004
Ángulo fricción interna(°)=		32.2974988
Cohesión(kg/cm2)=		0.4841

Fuente: Auto

ENSAYO #2

Figura 94: Suelo arena limosa (SM) sin contaminar, ensayo de corte directo 2



Fuente: Autor

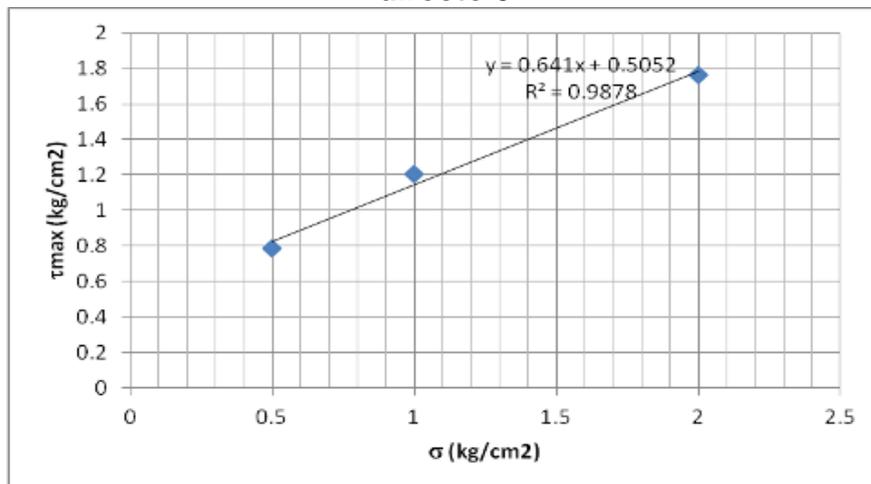
Tabla 34: Corte 2 arena limosa (SM) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.776135604
2	1	1.203658229
3	2	1.758167771
Ángulo fricción interna(°)=		33.21229204
Cohesión(kg/cm2)=		0.4989

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 95: Suelo arena limosa (SM) sin contaminar, ensayo de corte directo 3



Fuente: Autor

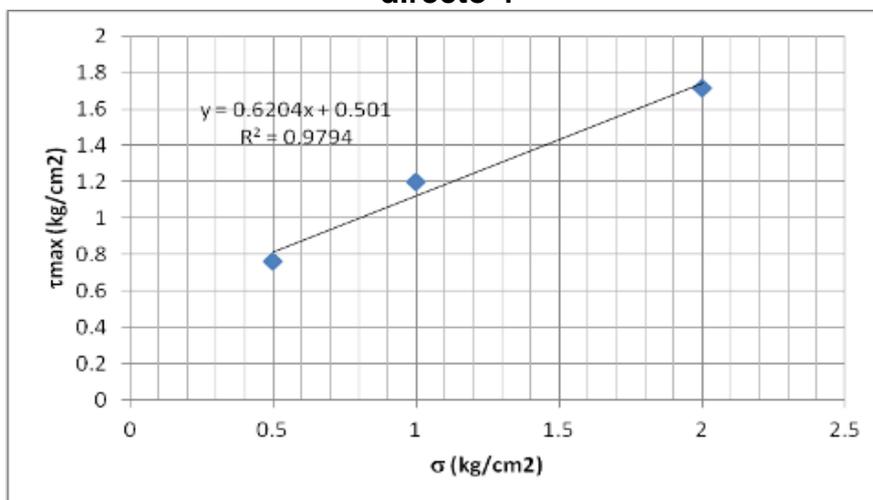
Tabla 35: Corte 3 arena limosa (SM) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.784601399
2	1	1.207891126
3	2	1.766633566
Ángulo fricción interna(°)=		33.21229204
Cohesión(kg/cm2)=		0.5052

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 96: Suelo arena limosa (SM) sin contaminar, ensayo de corte directo 4



Fuente: Autor

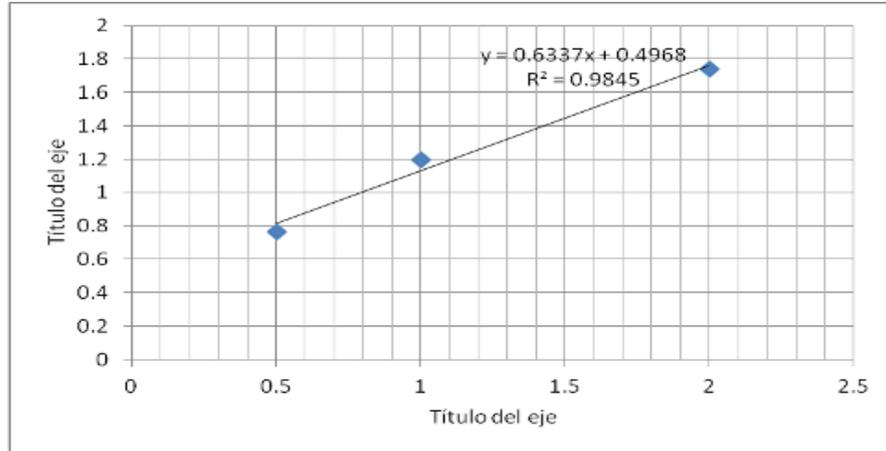
Tabla 36: Corte 4 arena limosa (SM) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.759204015
2	1	1.199425331
3	2	1.715838798
Ángulo fricción interna(°)=		32.52795989
Cohesión(kg/cm2)=		0.501

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 97: Suelo arena limosa (SM) sin contaminar, ensayo de corte directo 5



Fuente: Autor

Tabla 37: Corte 5 arena limosa (SM) virgen

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.76766981
2	1	1.199425331
3	2	1.741236182
Ángulo fricción interna(°)=		32.98535475
Cohesión(kg/cm2)=		0.4968

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 38 Se aprecian todos los datos obtenidos en cada uno de los ensayos previos para, de esta forma ver el comportamiento del material y si este varía o tiene alguna forma a seguir en su comportamiento

Tabla 38: Promedio corte arena limosa (SM) virgen

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Promedio	Rango	
σ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	τ (kg/cm2)	Menor	Mayor
0.5	0.75920402	0.7761356	0.7846014	0.75920402	0.76766981	0.76936297	0.75920402	0.7846014
1	1.15709636	1.20365823	1.20789113	1.19942533	1.19942533	1.19349928	1.15709636	1.20789113
2	1.707373	1.75816777	1.76663357	1.7158388	1.74123618	1.73784986	1.707373	1.76663357
Ángulo fricción (°)	32.2974988	33.212292	33.212292	32.5279599	32.9853547	32.8470795	32.2974988	33.212292
Cohesión (kg/cm2)	0.4841	0.4989	0.5052	0.501	0.4968	0.4972	0.4841	0.5052

Fuente: Autor

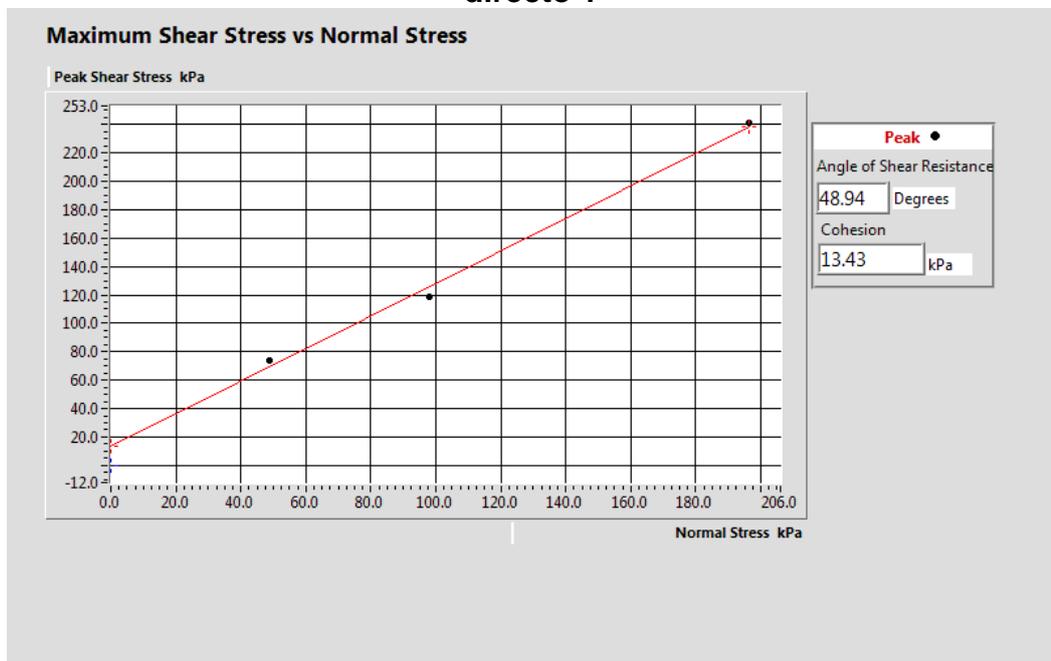
4.2.2.2 SUELO CONTAMINADO AL 25% DE LA POROSIDAD

Es válido resaltar que los siguientes ensayos fueron realizados en una máquina de corte directo electrónica, es decir que la quina que realiza el ensayo va ligada a un programa, el cual toma los valores que arroja esta, los interpreta y arroja las gráficas y los resultados que se desean obtener. Al haber realizado el ensayo de próctor modificado al material contaminado al 25% se obtuvo la humedad óptima del suelo arena arcillosa (SC). Basado en este valor se procede a realizar el ensayo de corte directo sobre el material, para determinar el ángulo de fricción, el esfuerzo cortante y cohesión.

De esta manera se realizaron ensayos a este material, los cuales serán interpretados a través de las siguiente figuras 98, 99 y 100 las cuales enfrentan el esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo, la cuales arrojaran la cohesión y el ángulo de fricción interno. Al final de las citadas figuras se realiza un cuadro, tablas 39, 40 y 41, en el cual están todos los valores de los ensayos realizados, el cual arroja los valores que anteriormente se habían mencionado de una forma ordenada y la cual se puede interpretar rápidamente.

ENSAYO #1

Figura 98: Suelo arena limosa (SM) contaminado al 25%, ensayo de corte directo 1



Fuente: Autor

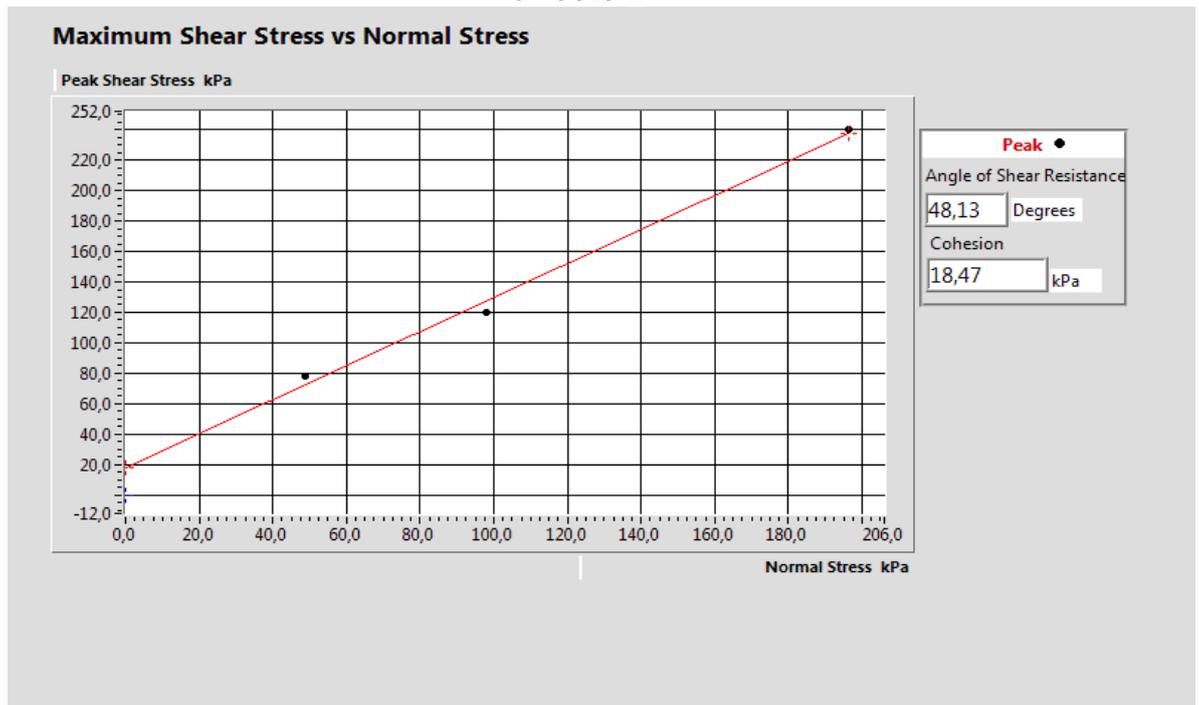
Tabla 39: Corte 1 arena limosa (SM) contaminado al 25%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)	σ (kPa)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
1	0.5	0.758691207	48.9	74.2
2	1	1.214285714	98	119
3	2	2.45667686	196.2	241
Ángulo fricción interna(°)=		48.543	48.94	
Cohesión(kg/cm2)=		0.137	13.43	

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 99: Suelo arena limosa (SM) contaminado al 25%, ensayo de corte directo 2



Fuente: Autor

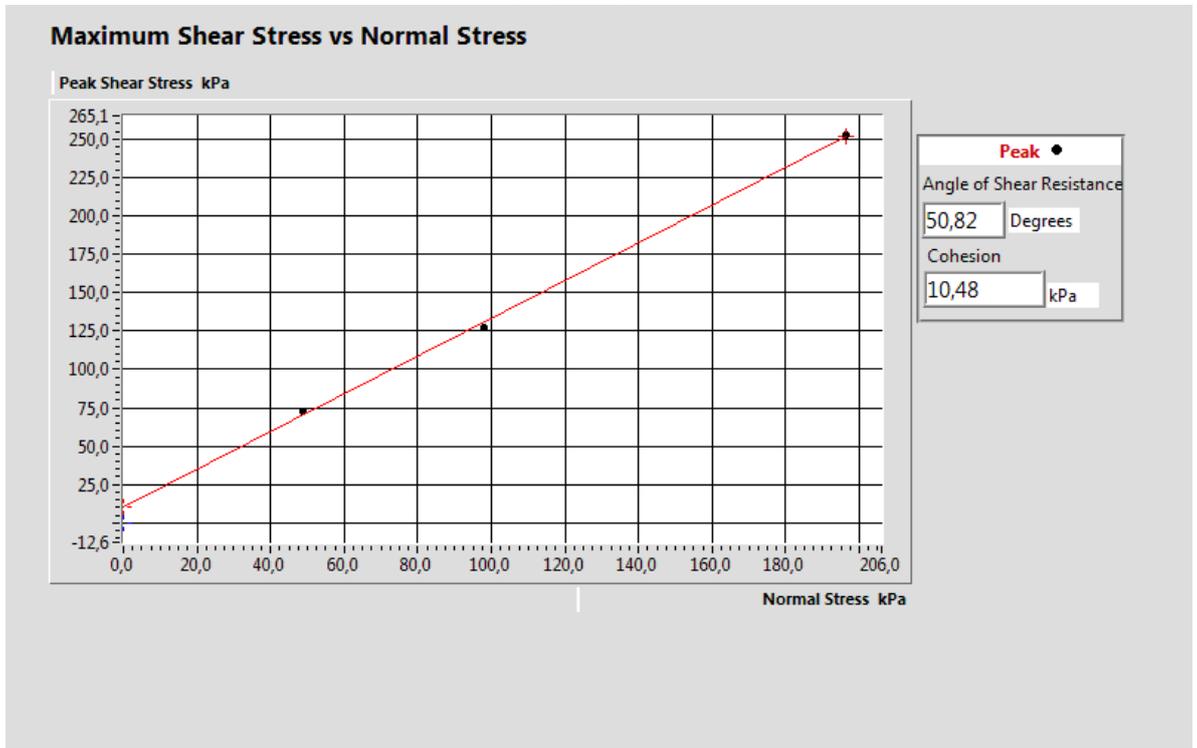
Tabla 40: Corte 2 arena limosa (SM) contaminado al 25%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)	σ (kPa)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
1	0,5	0,799591	48,9	78,2
2	1	1,2255102	98	120,1
3	2	2,44648318	196,2	240
Ángulo fricción interna(°)=		47,673	48,13	
Cohesión(kg/cm2)=		0,188	18,47	

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 100: Suelo arena limosa (SM) contaminado al 25%, ensayo de corte directo 3



Fuente: Autor

Tabla 41: Corte 3 arena limosa (SM) contaminado al 25%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)	σ (kPa)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
1	0,5	0,74642127	48,9	73
2	1	1,29591837	98	127
3	2	2,57390418	196,2	252,5
Ángulo fricción interna(°)=		50,621	50,82	
Cohesión(kg/cm2)=		0,107	10,48	

Fuente: Autor

MUESTRAS QUE NO FALLARON

Tabla 42: Muestras de material arena limosa (SM) contaminado al 25% que no fallaron

Material	Limo-arenoso					
	25%	25%	25%	25%	25%	25%
% de contaminación	25%	25%	25%	25%	25%	25%
e (kg/cm ²)	0.5	1	2	0.5	1	2
vel (mm/min)	1	1	1	1	1	1
Peso humedo inicial de las muestra	110.01	123.35	121.13	123.2	121.5	126.55
Peso humedo final de las muestra	109.56	123.35	121.04	122.5	120.9	126.15
Peso seco de la muestra final	105.67	114.8	112.32	115.87	110.5	118.97
% humedad	4.11%	7.45%	7.84%	7.80%	7.24%	6.37%
Temperatura del laboratorio	25°	25°	25	25°	25°	25°
Gravedad especifica	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Fuerza maxima (kpa)	60.3	151.25	210.5	59.78	150.27	277.59
Dezplazamiento horizontal (mm)	2.33	3.89	3.17	2.06	2.01	3.47
Dezplazamiento vertical (mm)	1.32	1.1	1.95	1.26	2.03	2.78
Estado del ensayo al finalizarlo	N.B	N.B	N.B	N.B	N.B	N.B

Fuente: Autor

NB= La gráfica de esfuerzo normal vs esfuerzo cortante no registra el punto de falla o esfuerzo cortante máximo.

PROMEDIO

Tabla 43 Se aprecian todos los datos obtenidos en cada uno de los ensayos previos para, de esta forma ver el comportamiento del material y si este varia o tiene alguna forma a seguir en su comportamiento.

Tabla 43: Promedio corte arena limosa (SM) contaminado al 25%

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Promedio	Rango	
	τ (kg/cm ²)	Menor	Mayor					
σ (kg/cm ²)								
0,5	0,75869121	0,799591	0,74642127	0	0	0,76823449	0,74642127	0,799591
1	1,21428571	1,2255102	1,29591837	0	0	1,2452381	1,21428571	1,29591837
2	2,45667686	2,44648318	2,57390418	0	0	2,49235474	2,44648318	2,57390418
Angulo fricción (°)	48,5426309	47,6725406	50,6208125	0	0	48,945328	47,6725406	50,6208125
Cohesión (kg/cm ²)	0,13704082	0,18846939	0,10693878	0	0	0,14414966	0,10693878	0,18846939

Fuente: Autor

4.2.2.2.3 SUELO CONTAMINADO AL 50% DE LA POROSIDAD

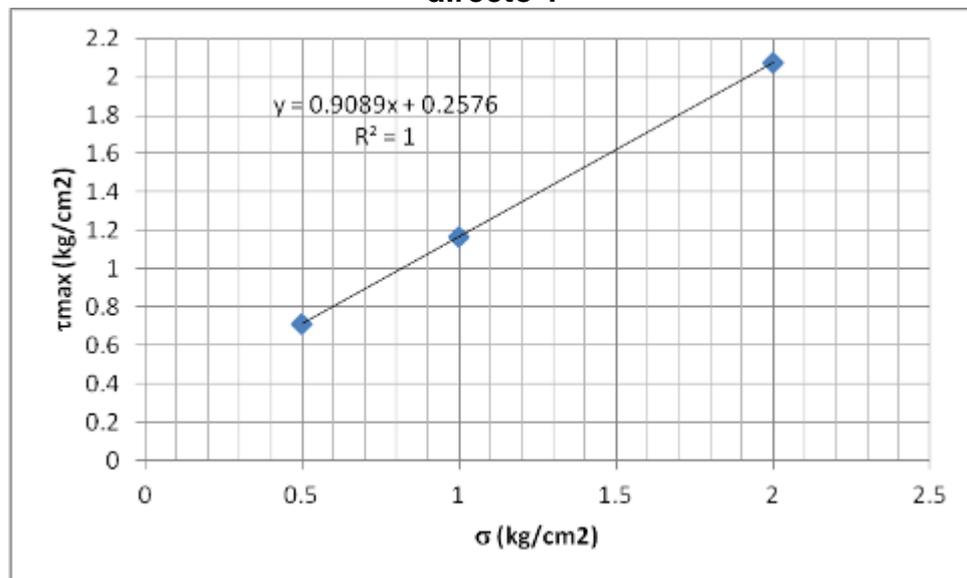
Al haber realizado el ensayo de próctor modificado al material contaminado al 50% se obtuvo la humedad óptima del suelo arena arcillosa (SC). Basado en este valor se procede a realizar el ensayo de corte directo sobre el material, para determinar el ángulo de fricción, el esfuerzo cortante y cohesión.

De esta manera se realizaron ensayos a este material los cuales, serán interpretados a través de las figuras 101, 102, 103, 104 y 105 las cuales enfrentan el esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo, la cuales arrojaran la cohesión y el ángulo de fricción interno.

Al final de las citadas figuras se realiza un cuadro, tablas 44, 45, 46, 47 y 48, en el cual están todos los valores de los ensayos realizados, el cual arroja los valores que anteriormente se habían mencionado de una forma ordenada y la cual se puede interpretar rápidamente.

ENSAYO #1

Figura 101: Suelo arena limosa (SM) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 1



Fuente: Autor

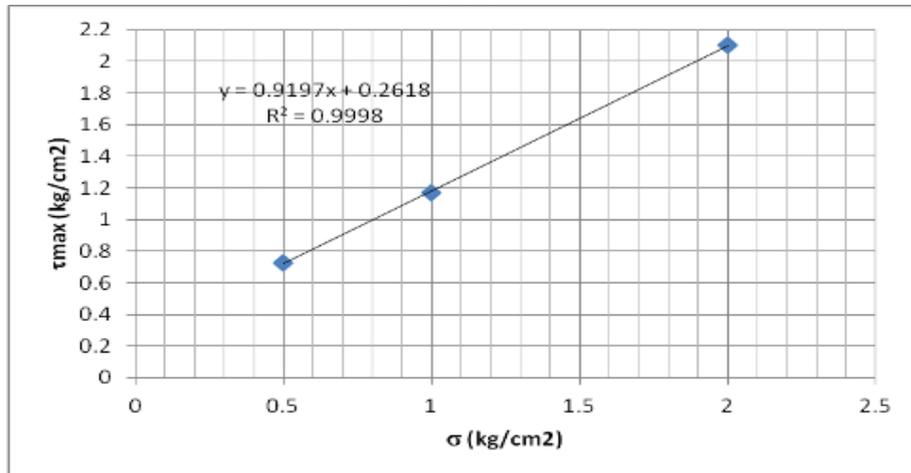
Tabla 44: Corte 1 arena limosa (SM) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	τ _{máx.} (kg/cm ²)
1	0.5	0.712642145
2	1	1.165562153
3	2	2.075635066
Ángulo fricción interna(°)=		42.26022957
Cohesión(kg/cm2)=		0.2576

Fuente: Autor

ENSAYO #2

Figura 102: Suelo arena limosa (SM) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 2



Fuente: Autor

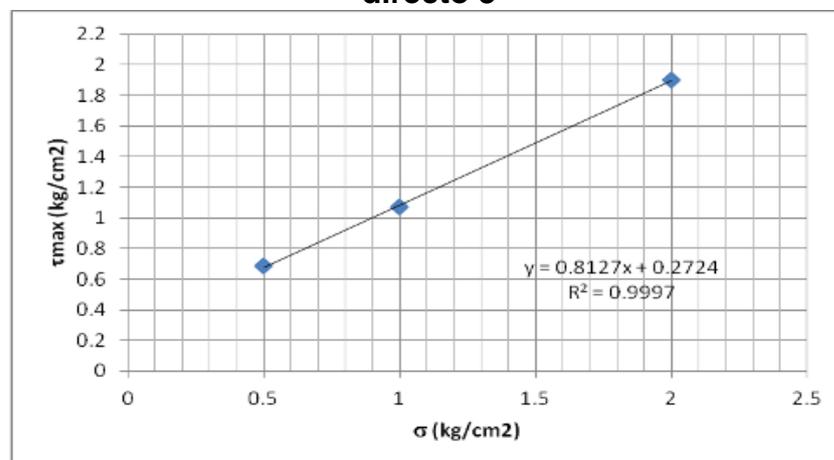
Tabla 45: Corte 2 arena limosa (SM) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)
1	0.5	0.729573734
2	1	1.16979505
3	2	2.105265347
Ángulo fricción interna(°)=		42.52479904
Cohesión(kg/cm2)=		0.2618

Fuente: Autor

ENSAYO #3

Figura 103: Suelo arena limosa (SM) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 3



Fuente: Autor

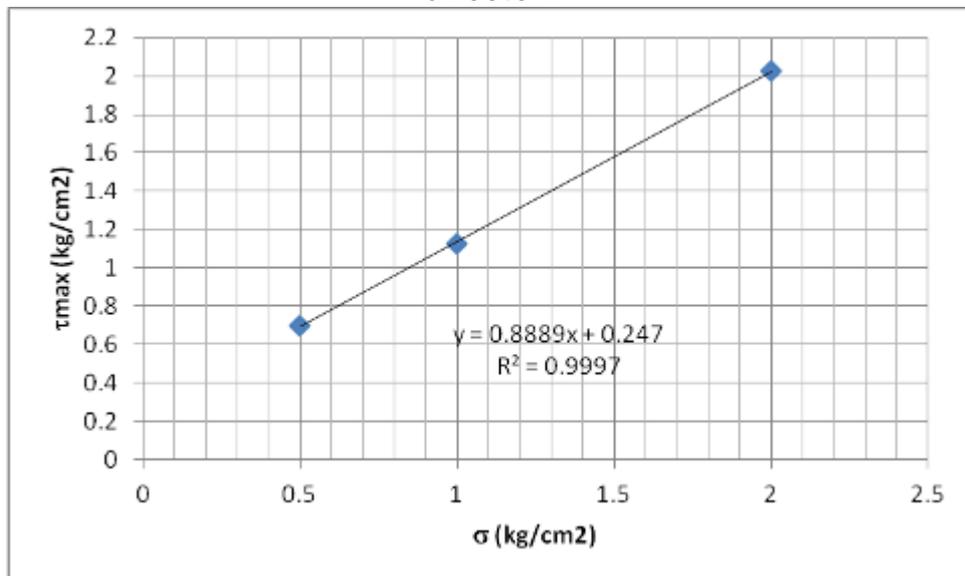
Tabla 46: Corte 3 arena limosa (SM) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.687244762
2	1	1.072438413
3	2	1.902086278
Ángulo fricción interna(°)=		39.00381702
Cohesión(kg/cm2)=		0.2724

Fuente: Autor

ENSAYO #4

Figura 104: Suelo arena limosa (SM) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 4



Fuente: Autor

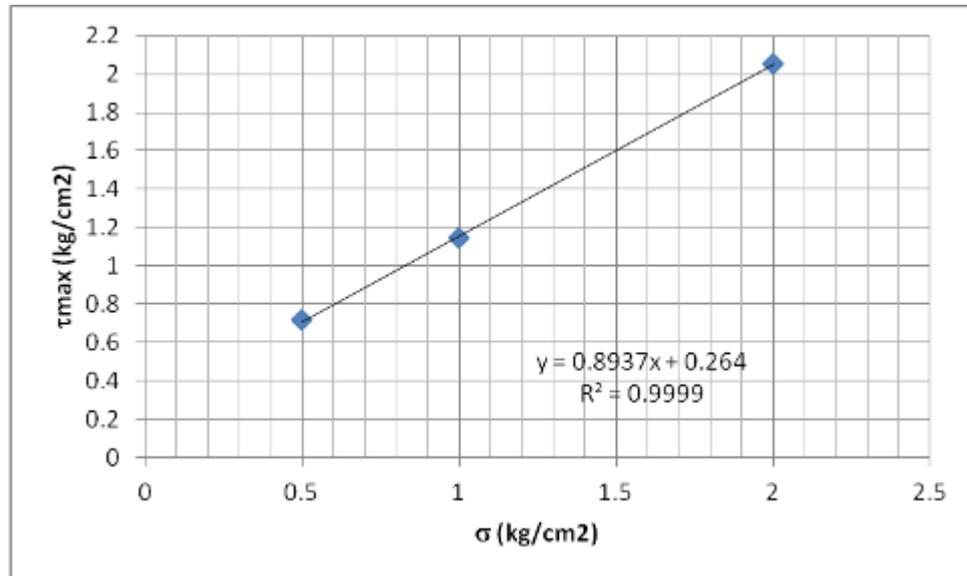
Tabla 47: Corte 4 arena limosa (SM) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.699943453
2	1	1.12323318
3	2	2.029073196
Ángulo fricción interna(°)=		41.54371931
Cohesión(kg/cm2)=		0.247

Fuente: Autor

ENSAYO #5

Figura 105: Suelo arena limosa (SM) contaminado al 50%, ensayo de corte directo 5



Fuente: Autor

Tabla 48: Corte 5 arena limosa (SM) contaminado al 50%

	σ (kg/cm ²)	$\tau_{m\acute{a}x.}$ (kg/cm ²)
1	0.5	0.716875042
2	1	1.148630564
3	2	2.05447058
Ángulo fricción interna(°)=	41.72435692	
Cohesión(kg/cm2)=	0.264	

Fuente: Autor

MUESTRAS QUE NO FALLARON

Tabla 49: Muestras de material arena limosa (SM) contaminado al 50% que no fallaron

Material	Limo-arenoso								
	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
% de contaminación	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
e (kg/cm ²)	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2
vel (mm/min)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso humedo inicial de las muestra	124.52	120.59	127.4	121.8	120.9	125.2	123.2	119.9	124.01
Peso humedo final de las muestra	123.81	119.7	129.86	121.74	120.62	123.82	122.5	119.12	123.62
Peso seco de la muestra final	115.24	109.9	114.86	113.34	112.12	115.62	116.23	111.75	114.65
% humedad	8.05%	9.65%	10.92%	7.46%	7.83%	7.24%	8.12%	7.98%	7.64%
Temperatura del laboratorio	25°	25°	25°	25°	25°	25°	25°	25°	25°
Gravedad especifica	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Fuerza maxima (kpa)	69.88	106.99	65.87	111.17	153.34	70.21	89.45	135.98	68.45
Dezplazamiento horizontal (mm)	3.45	2.09	2.03	2.06	1.09	0.6	3.01	2.75	1.65
Dezplazamiento vertical (mm)	1.7	1.21	1.78	1.26	1.03	2.15	1.45	1.87	2.21
Estado del ensayo al finalizarlo	N.B	N.B	N.B	N.B	N.B	N.B	N.B	N.B	N.B

Fuente: Autor

PROMEDIO

Tabla 50 Se aprecian todos los datos obtenidos en cada uno de los ensayos previos para, de esta forma ver el comportamiento del material y si este varia o tiene alguna forma a seguir en su comportamiento.

Tabla 50: Promedio corte arena limosa (SM) contaminado al 50%

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Promedio	Rango	
	τ (kg/cm2)	Menor	Mayor					
σ (kg/cm2)								
0.5	0.71264215	0.72957373	0.68724476	0.69994345	0.71687504	0.70925583	0.68724476	0.72957373
1	1.16556215	1.16979505	1.07243841	1.12323318	1.14863056	1.13593187	1.07243841	1.16979505
2	2.07563507	2.10526535	1.90208628	2.0290732	2.05447058	2.03330609	1.90208628	2.10526535
Angulo fricción (°)	42.2602296	42.524799	39.003817	41.5437193	41.7243569	41.4113844	39.003817	42.524799
Cohesión (kg/cm2)	0.2576	0.2618	0.2724	0.247	0.264	0.26056	0.247	0.2724

Fuente: Autor

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. PRÓCTOR

5.1.1. ARENA ARCILLOSA (SC)

Mediante el ensayo de próctor modificado se determinó la humedad óptima del suelo arena arcillosa (SC) contaminado al 0%, 25% y 50%. Se muestran en la tabla 51 los resultados de cada material ensayado, que se mantienen en un rango cercano, y para cada uno se calculó el promedio.

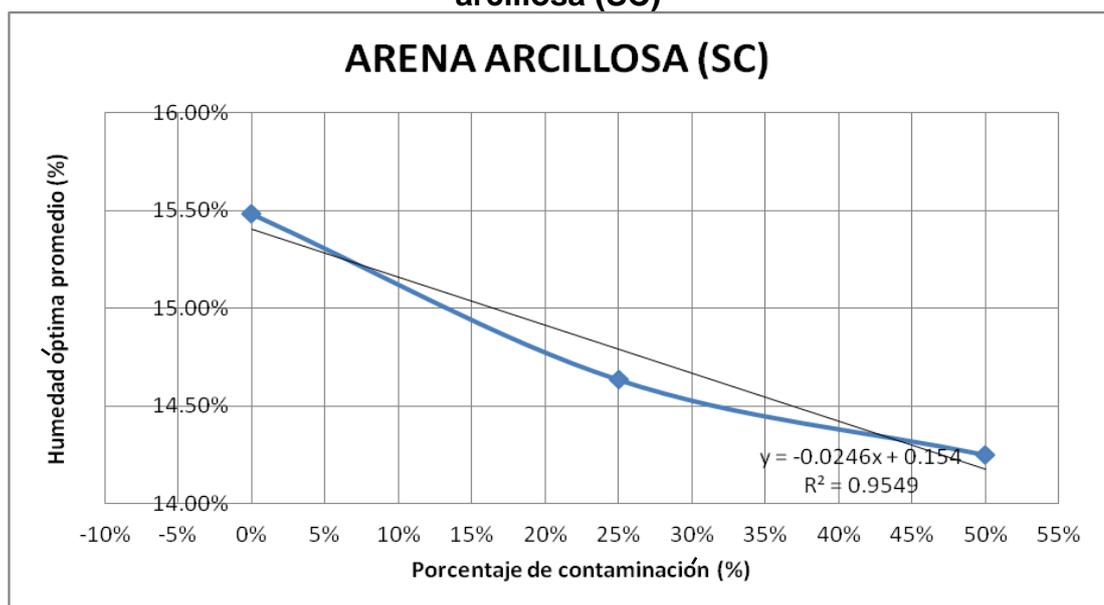
Tabla 51: Resultados de arena arcillosa (SC) del próctor modificado

ARENA ARCILLOSA (SC)						
ENSAYO #	1	2	3	4	5	PROMEDIO
% CONTAMINADO						
0%	15.77%	15.24%	15.54%	15.05%	15.81%	15.48%
25%	14.96%	14.78%	14.51%	14.74%	14.18%	14.63%
50%	14.47%	14.03%	14.50%	13.89%	14.36%	14.25%

Fuente: Autor

La figura 106 muestra que en el suelo arena arcillosa (SC) disminuyó la humedad óptima de compactación a medida que aumentaba el porcentaje de contaminante, definiendo un comportamiento lineal que significa menores cantidades de agua para materiales con mayor porcentaje de contaminación.

Figura 106: Análisis de resultados del ensayo de próctor en el arena arcillosa (SC)



Fuente: Autor

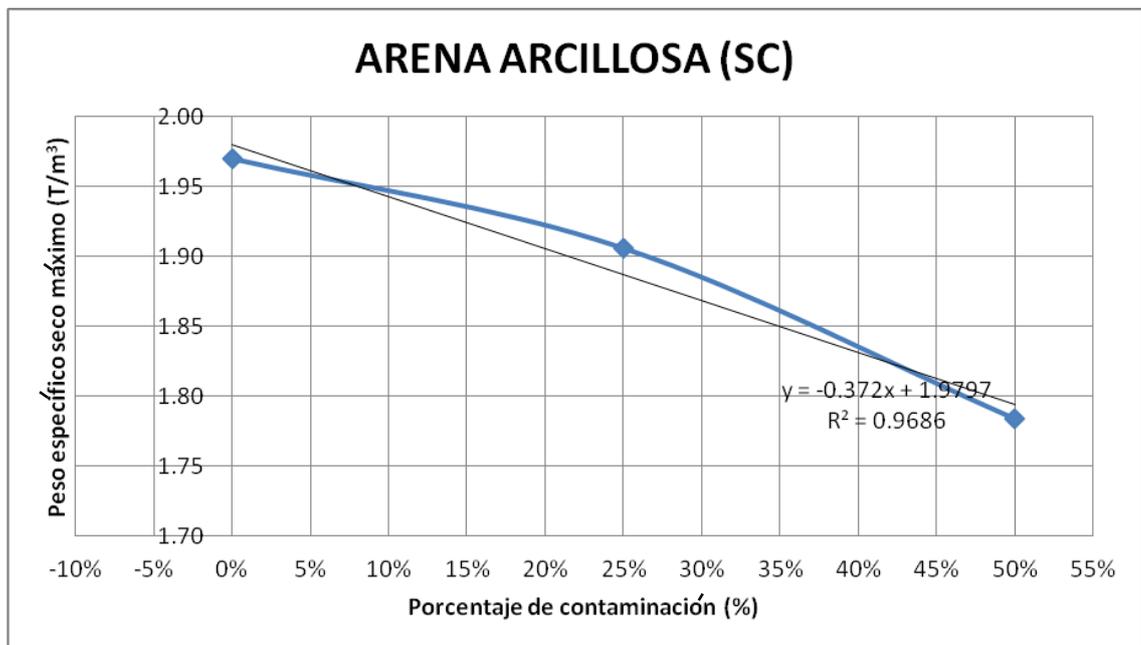
La densidad seca máxima se relacionó directamente con la humedad óptima de compactación, la tabla 52 muestra los resultados de los pesos específico para cada porcentaje de contaminación. El material sin contaminar presenta mayor peso específico máximo que el material contaminado al 50% como se muestra en la figura 107.

Tabla 52 : Resultados de los pesos específicos de los ensayos de próctor modificado en la arena arcillosa (SC).

ARENA ARCILLOSA (SC)						
ENSAYO #	1	2	3	4	5	PROMEDIO
% CONTAMINADO						
0%	1.93	2.00	1.99	1.95	1.98	1.97
25%	1.89	1.90	1.92	1.89	1.93	1.91
50%	1.82	1.79	1.78	1.75	1.78	1.78

Fuente: Autor

Figura 107: Análisis de resultados del ensayo de próctor en la arena arcillosa (SC) respecto al peso específico.



Fuente: Autor

5.1.2. SUELO ARENA LIMOSA (SM)

Mediante el ensayo de próctor modificado se determinó la humedad óptima del suelo arena limosa (SM) contaminado al 0%, 25% y 50%. Se muestran en la tabla 53 los resultados de cada material ensayado, que se mantienen en un rango cercano, y para cada uno se calculó el promedio.

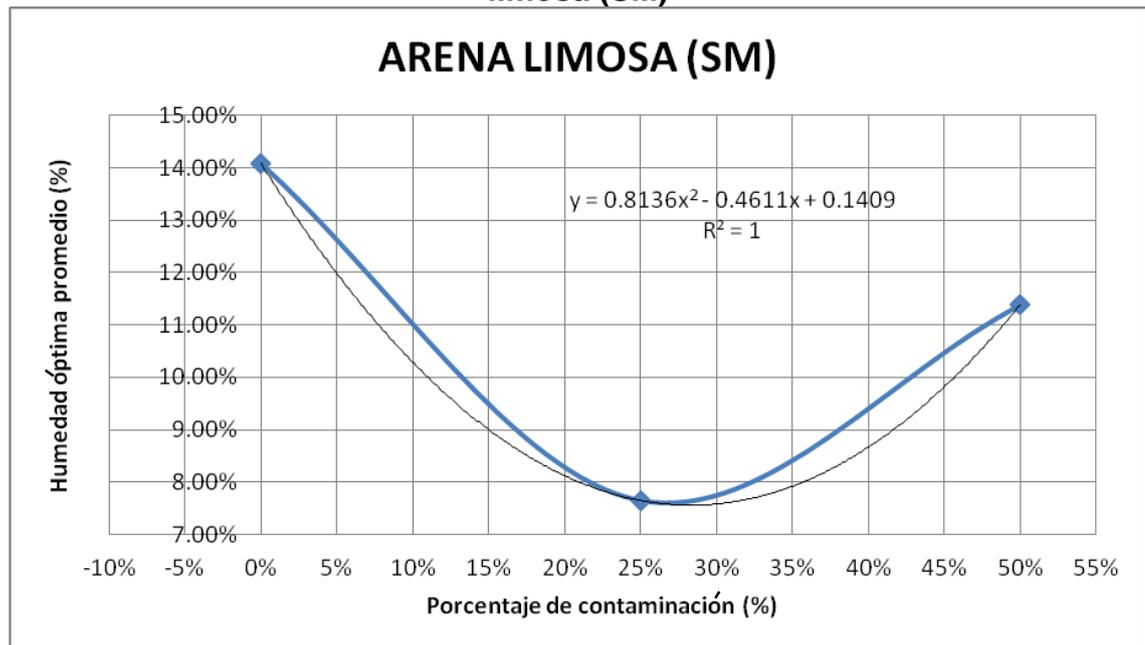
Tabla 53: Resultados del suelo arena limosa (SM) del próctor modificado

ARENA LIMOSA (SM)						
ENSAYO #	1	2	3	4	5	PROMEDIO
% CONTAMINADO						
0%	13.40%	14.08%	14.86%	13.50%	14.61%	14.09%
25%	6.18%	7.85%	8.63%	7.75%	7.83%	7.65%
50%	10.15%	11.29%	13.07%	11.32%	11.05%	11.38%

Fuente: Autor

La figura 108 muestra que el suelo arena limosa (SM) presenta un comportamiento polinómico donde el material sin contaminar presenta la mayor humedad óptima de compactación. La humedad óptima para el material contaminado al 25% disminuye a la mitad del material sin contaminar y el material contaminado al 50% presenta un aumento de la humedad óptima respecto al material contaminado al 25%.

Figura 108: análisis de resultados del ensayo de próctor en el suelo arena limosa (SM)



Fuente: Autor

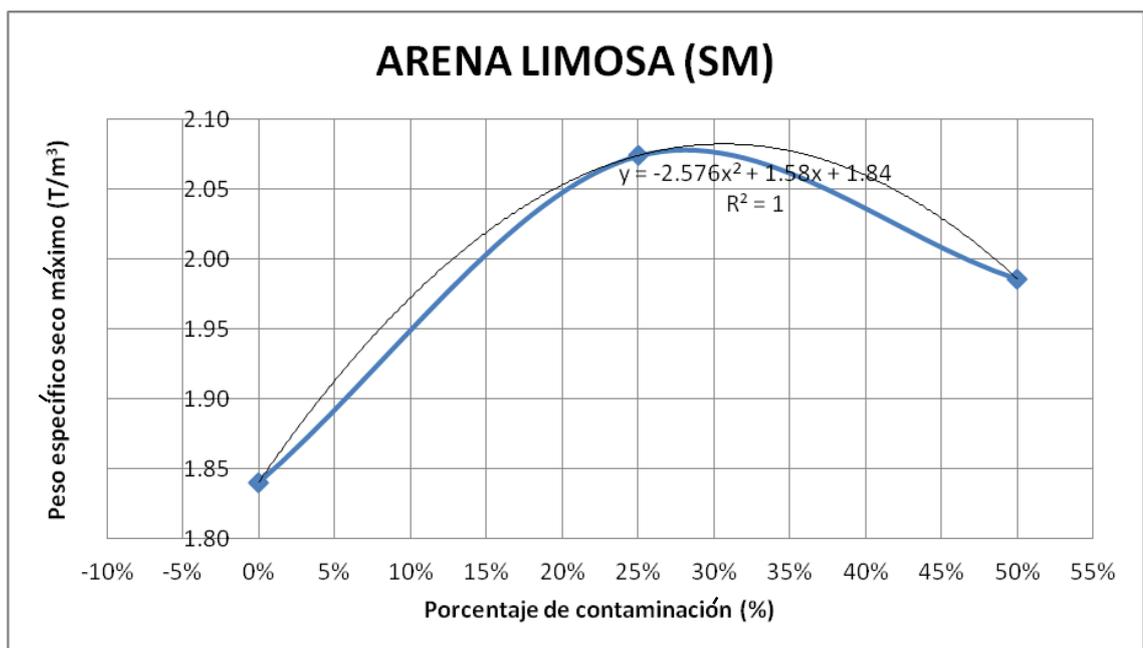
La densidad seca máxima se relacionó de forma inversa con la humedad óptima de compactación. La tabla 54 muestra los resultados de los pesos específicos para cada porcentaje de contaminación. El material sin contaminar presenta menor densidad que el material contaminado al 50% y el material contaminado al 25% presenta la mayor densidad seca máxima como se muestra en la figura 109.

Tabla 54 : Resultados de los pesos específicos de los ensayos de próctor modificado en la arena limosa (SM).

ARENA LIMOSA (SM)						
ENSAYO #	1	2	3	4	5	PROMEDIO
% CONTAMINADO						
0%	1.94	1.88	1.84	1.75	1.79	1.84
25%	2.12	2.05	2.07	2.06	2.07	2.07
50%	1.98	1.98	2.00	1.98	1.99	1.99

Fuente: Autor

Figura 109: Análisis de resultados del ensayo de próctor en la arena limosa (SM) respecto al peso específico.

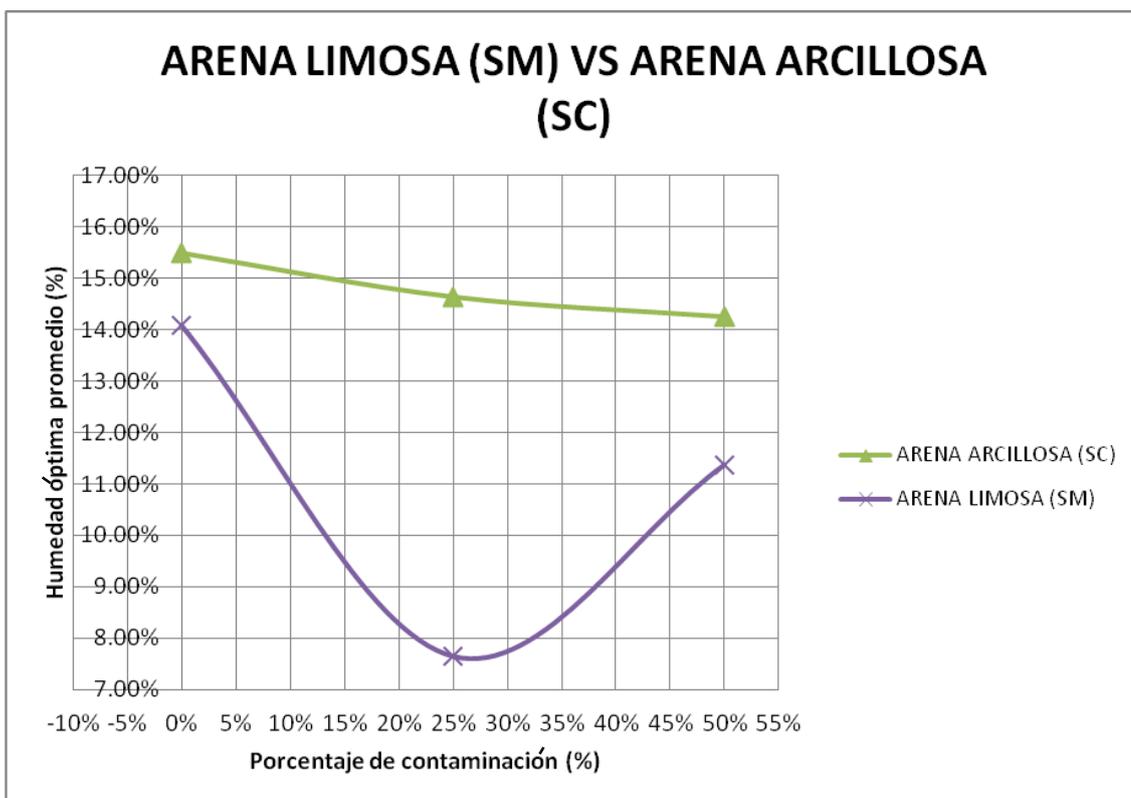


Fuente: Autor

5.2. SUELO ARENA ARCILLOSA (SC) VS SUELO ARENA LIMOSA (SM)

La figura 110 muestra las diferencias entre los comportamientos del suelo arena arcillosa (SC) y el suelo arena limosa (SM) con porcentajes de contaminantes iguales para el calculo de la humedad óptima de compactación.

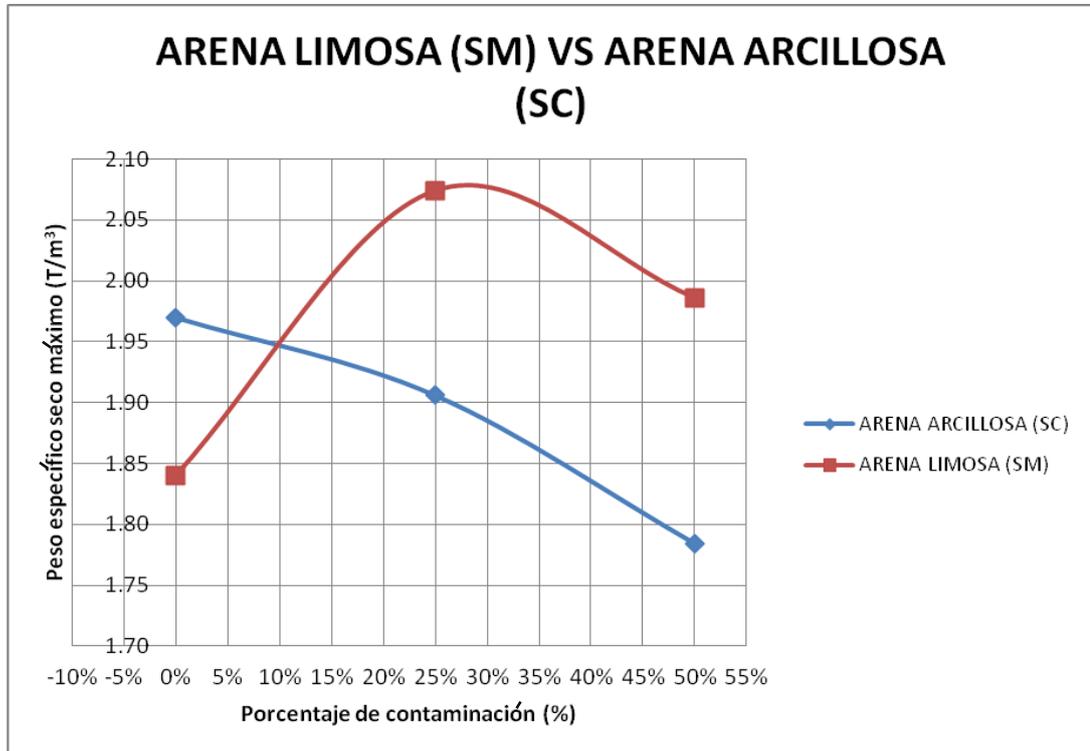
Figura 110: Arena limosa (25%) vs arena arcillosa (25%) basado en los ensayos de próctor modificado



Fuente: Autor

La figura 111 muestra las diferencias entre los comportamientos del suelo arena arcillosa (SC) y el suelo arena limosa (SM) con porcentajes de contaminantes iguales para el calculo del peso especifico seco maximo. El suelo arena arcillosa (SC) presenta una disminucion del peso especifico seco a medida que aumenta el porcentaje de contaminante. Mientras tanto el suelo arena limosa (SM) presenta un comportamiento polinómico, donde el material contaminado al 25% tiene el mayor peso especifico seco y el material sin contaminar tiene el menor peso especifico seco.

Figura 111: Arena limosa (50%) vs arena arcillosa (50%) basado en los ensayos de próctor modificado



Fuente: Autor

5.3. CORTE DIRECTO

5.3.1. ARENA ARCILLOSA (SC)

A partir de los resultados obtenidos se calcula el promedio de los esfuerzos cortantes (τ) para cada esfuerzo normal (σ) y porcentaje de contaminación del material. Además se tomaron los promedios de los ángulos de fricción y de la cohesión para cada caso como se muestra en la siguiente tabla 55.

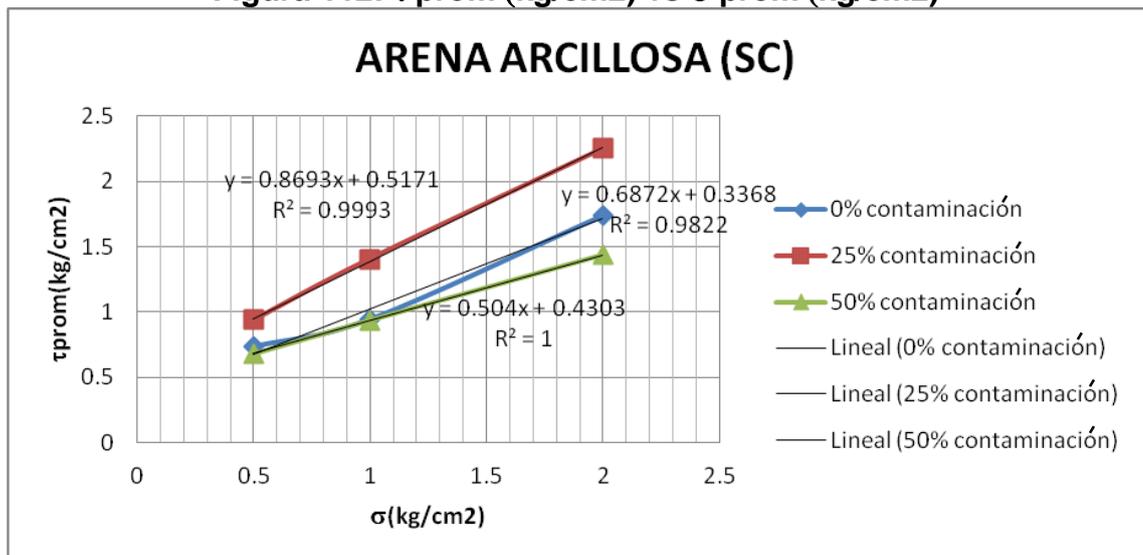
Tabla 55: Resultados de la arena arcillosa (SC) en el ensayo de corte directo

ARENA ARCILLOSA (SC)			
% contaminación	0	25	50
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$	0.73380663	0.93867886	0.68047213
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$	0.94375834	1.40599072	0.9369857
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 2 \text{ kg/cm}^2$	1.73784986	2.24918385	1.43731416
Angulo fricción promedio ($^\circ$)=	33.7667578	41.1420393	26.773138
Cohesión promedio (kg/cm^2)=	0.33674	0.5171	0.43032

Fuente: Autor

Como se puede evidenciar en la figura 112, los esfuerzos cortantes máximos de mayor valor fueron registrados para el suelo contaminado al 25% y los esfuerzos cortantes máximos de menor valor se registraron con el suelo contaminado al 50%. El material presenta un comportamiento polinómico respecto a los esfuerzos cortantes máximos contra los porcentajes de contaminación para cada esfuerzo normal respectivo.

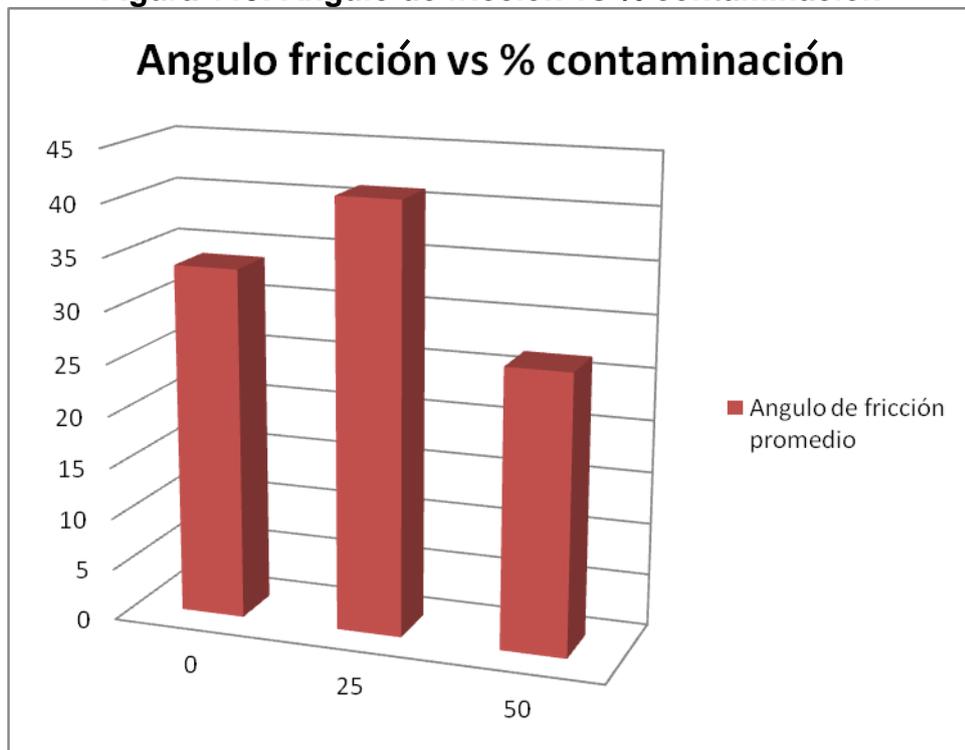
Figura 112: τ prom (kg/cm²) vs σ prom (kg/cm²)



Fuente: Autor

Como se puede evidenciar en la figura 113, el ángulo de fricción describe una tendencia polinómica definida, siendo el suelo contaminado al 25% el que tiene un ángulo de fricción de mayor valor y los suelos contaminados al 0% y al 50% tienen ángulos de fricción de menor valor respecto al 25%.

Figura 113: Ángulo de fricción vs % contaminación

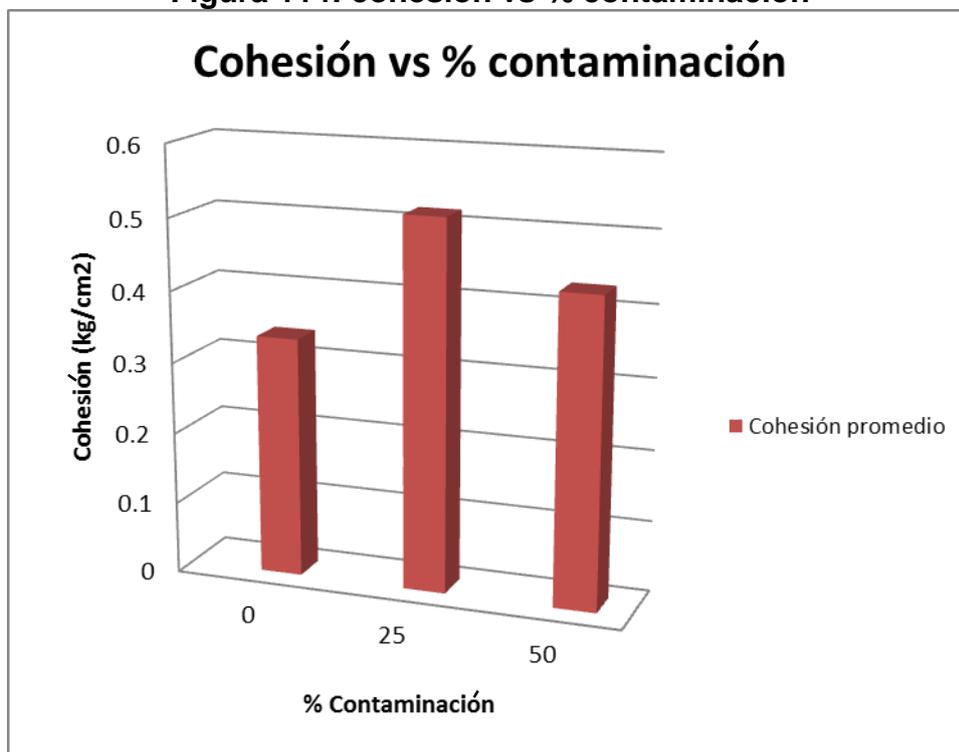


Fuente: Autor

El material contaminado al 25% presenta el mayor ángulo de fricción que traduce un mayor coeficiente de rozamiento entre las partículas.

La figura 114 demuestra que la cohesión, al igual que el ángulo de fricción, también presenta una tendencia polinómica definida, siendo el suelo contaminado al 25% el que tiene la cohesión de mayor valor y los suelos contaminados al 0% y al 50% tienen cohesiones de menor valor respecto al 25%.

Figura 114: cohesión vs % contaminación



Fuente: Autor

El material contaminado al 25% presenta mayor cohesión, lo que representa mayor adherencia de las partículas.

El suelo contaminado al 25% presenta el mayor ángulo de fricción y la mayor cohesión sin embargo los suelos al 0% y al 50% de contaminación no presentan una relación directamente proporcional entre ángulo de fricción y cohesión respecto al porcentaje de contaminación. Por tanto no se puede determinar un comportamiento directamente proporcional entre el ángulo de fricción y la cohesión, así como tampoco un comportamiento inversamente proporcional.

5.3.2. SUELO ARENA LIMOSA (SM)

A partir de los resultados obtenidos se calcula el promedio de los esfuerzos cortantes (τ) para cada esfuerzo normal (σ) y porcentaje de contaminación del material. Además se tomaron los promedios de los ángulos de fricción y de la cohesión para cada caso se pueden apreciar en la siguiente tabla 56.

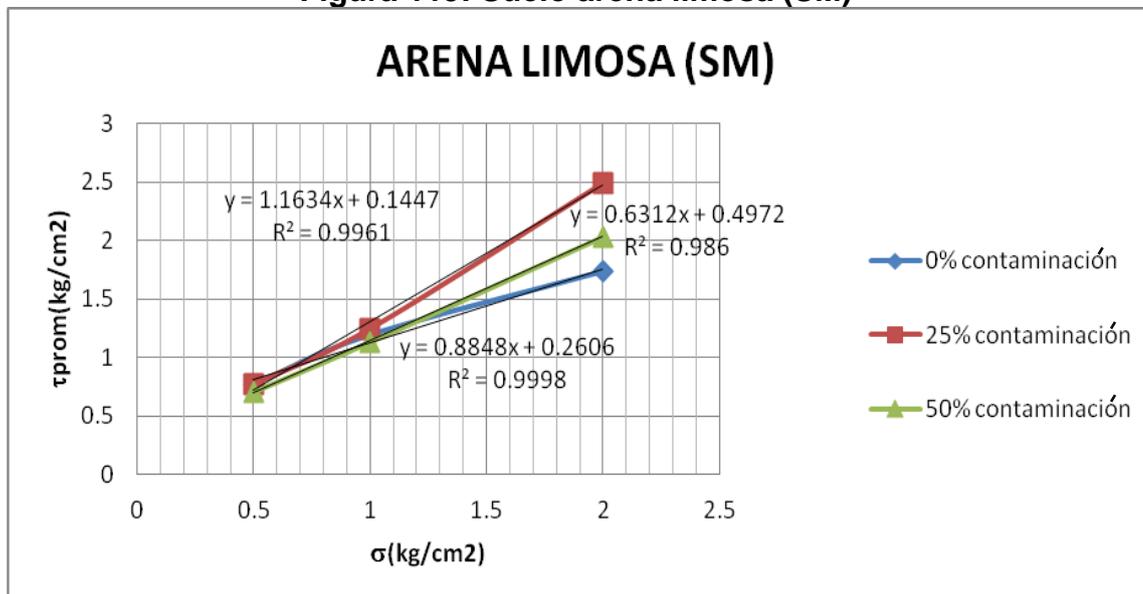
Tabla 56: Resultados del suelo arena limosa (SM) en el ensayo de corte directo

Suelo arena limosa (SM)			
% contaminación	0	25	50
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$	0.76936297	0.76823449	0.70925583
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$	1.19349928	1.2452381	1.13593187
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 2 \text{ kg/cm}^2$	1.73784986	2.49235474	2.03330609
Angulo fricción promedio ($^\circ$)=	32.8470795	48.945328	41.4113844
Cohesión promedio (kg/cm^2)=	0.4972	0.14414966	0.26056

Fuente: Autor

En la figura 115 se muestra que los esfuerzos cortantes máximos de mayor valor fueron registrados en el suelo sin contaminar para el esfuerzo normal $\sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$, y en el suelo contaminado al 25% para los esfuerzos normales $\sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$ y $\sigma = 2 \text{ kg/cm}^2$. Los esfuerzos cortantes máximos de menor valor se registraron en el suelo contaminado al 50% para esfuerzos normales $\sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ y $\sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$, y en el suelo sin contaminar para el esfuerzo normal $\sigma = 2 \text{ kg/cm}^2$. El material no presenta un comportamiento estándar respecto a los esfuerzos cortantes máximos contra los porcentajes de contaminación para cada esfuerzo normal respectivo.

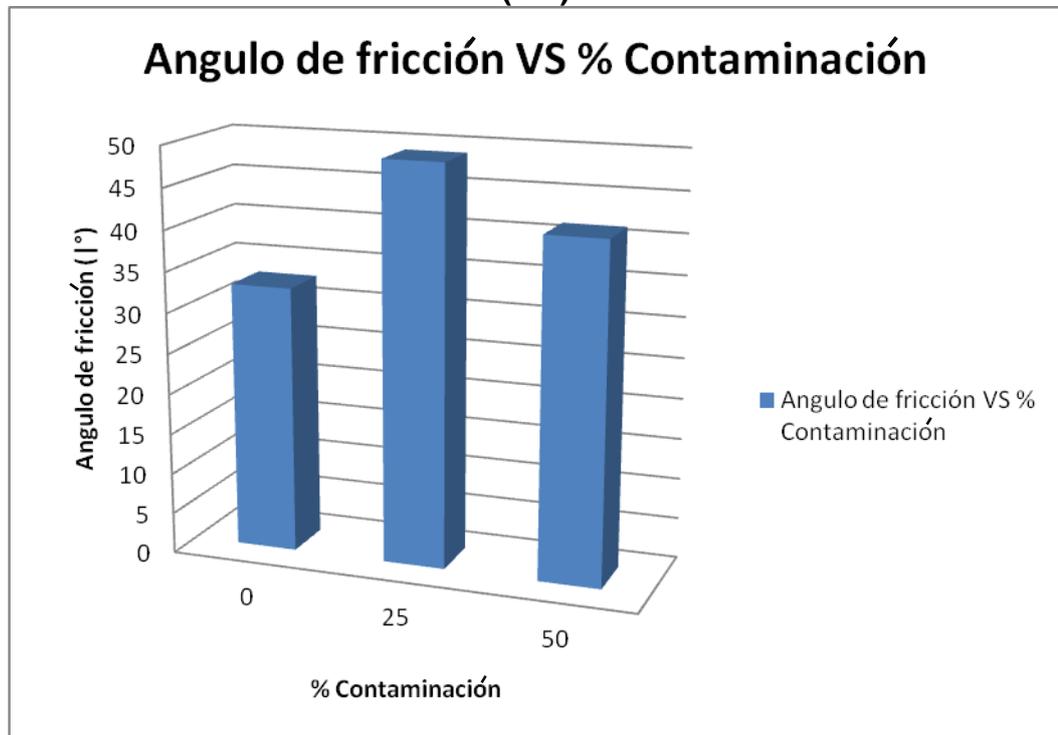
Figura 115: Suelo arena limosa (SM)



Fuente: Autor

Como se muestra en la figura 116, el ángulo de fricción presenta una tendencia polinómica negativa definida siendo el suelo contaminado al 25% el que tiene un ángulo de fricción de mayor valor y los suelos contaminados al 0% y al 50% tienen ángulos de fricción de menor valor respecto al 25%.

Figura 116: ángulo de fricción vs % contaminación suelo arena limosa (SM)



Fuente: Autor

El material contaminado al 25% presenta el mayor ángulo de fricción que traduce un mayor coeficiente de rozamiento entre las partículas.

Como se puede apreciar en la figura 117, la cohesión presenta una tendencia polinómica pero en este caso positiva definida siendo el suelo contaminado al 25% el que tiene la cohesión de menor valor y los suelos contaminados al 0% y al 50% tienen cohesiones de mayor valor respecto al 25%.

Figura 117: cohesión vs % contaminación suelo arena limosa (SM)

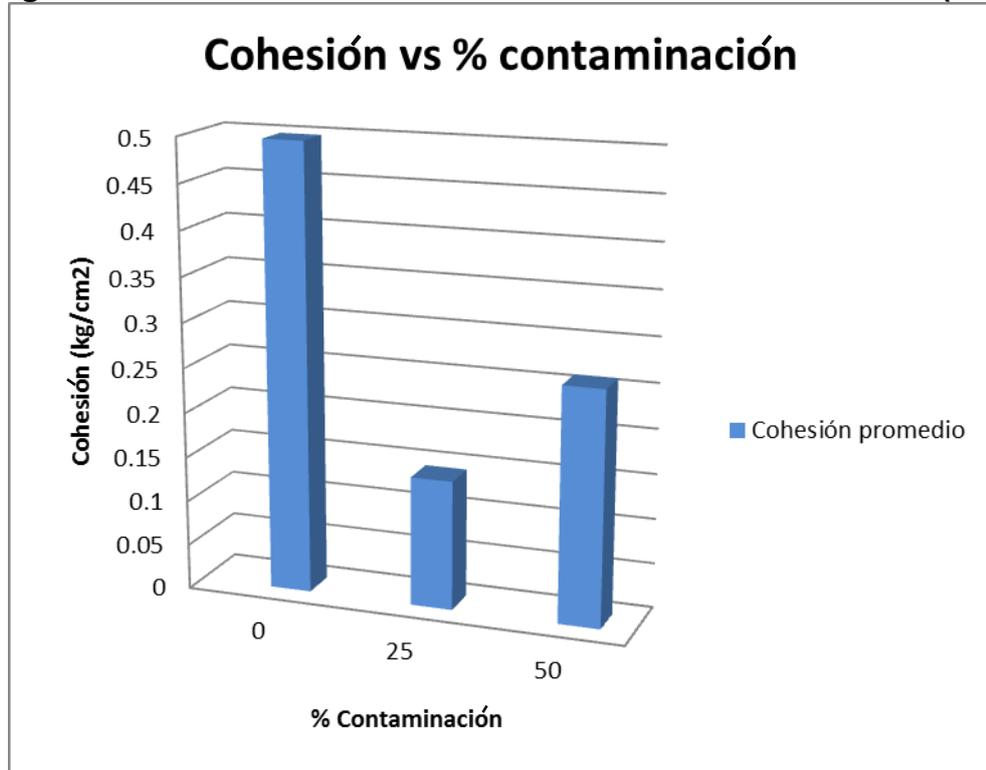


Figura 110
Fuente: Autor

El material sin contaminar presenta mayor cohesión, lo que representa mayor adherencia de las partículas.

El suelo sin contaminar presenta el menor ángulo de fricción y la mayor cohesión mientras que el suelo contaminado al 25% presenta el mayor ángulo de fricción y la menor cohesión de los tres porcentajes. El material contaminado al 50% se mantiene en un punto intermedio entre el 0% y el 25%. El comportamiento es inversamente proporcional entre la cohesión y el ángulo de fricción en cada porcentaje de compactación.

5.4. SUELO ARENA ARCILLOSA (SC) VS SUELO ARENA LIMOSA (SM)

La comparación entre los resultados de el suelo arena arcillosa (SC) y el suelo arena limosa (SM) se hicieron teniendo en cuenta los valores promedios de cada parametro estudiado como se puede apreciar en las siguientes tablas 57 y 58.

Tabla 57: Resultados de la arena arcillosa (SC)

Suelo arena arcillosa (SC)			
% contaminación	0	25	50
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$	0.73380663	0.93867886	0.68047213
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$	0.94375834	1.40599072	0.9369857
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 2 \text{ kg/cm}^2$	1.73784986	2.24918385	1.43731416
Ángulo fricción promedio ($^\circ$)=	33.7667578	41.1420393	26.773138
Cohesión promedio (kg/cm^2)=	0.33674	0.5171	0.43032

Fuente: Autor

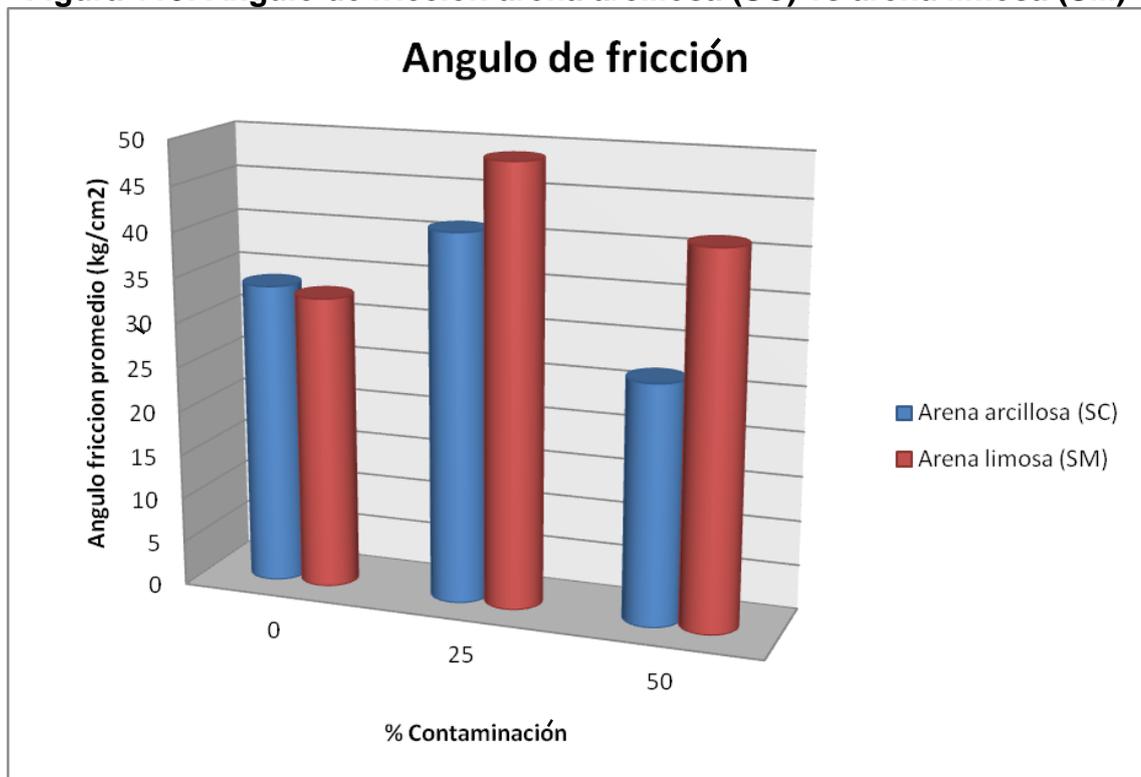
Tabla 58: Resultados del suelo arena limosa (SM)

Suelo arena limosa (SM)			
% contaminación	0	25	50
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$	0,76936297	0,76823449	0,70925583
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$	1,19349928	1,2452381	1,13593187
$\tau_{prom} \rightarrow \sigma = 2 \text{ kg/cm}^2$	1,73784986	2,49235474	2,03330609
Ángulo fricción promedio ($^\circ$)=	32,8470795	48,945328	41,4113844
Cohesión promedio (kg/cm^2)=	0,4972	0,14414966	0,26056

Fuente: Autor

Como se evidencia en la figura 118, el suelo arena arcillosa (SC) sin contaminar arrojó un mayor ángulo de fricción que el suelo arena limosa (SM) sin embargo las diferencias son muy mínimas. Mientras tanto el suelo arena limosa (SM) presentó mayor ángulo de fricción para porcentajes de contaminación del 25% y 50% frente al material arena arcillosa (SC) con los mismos porcentajes de contaminación, estas diferencias son mayores a las presentadas en el material sin contaminar.

Figura 118: Ángulo de fricción arena arcillosa (SC) vs arena limosa (SM)

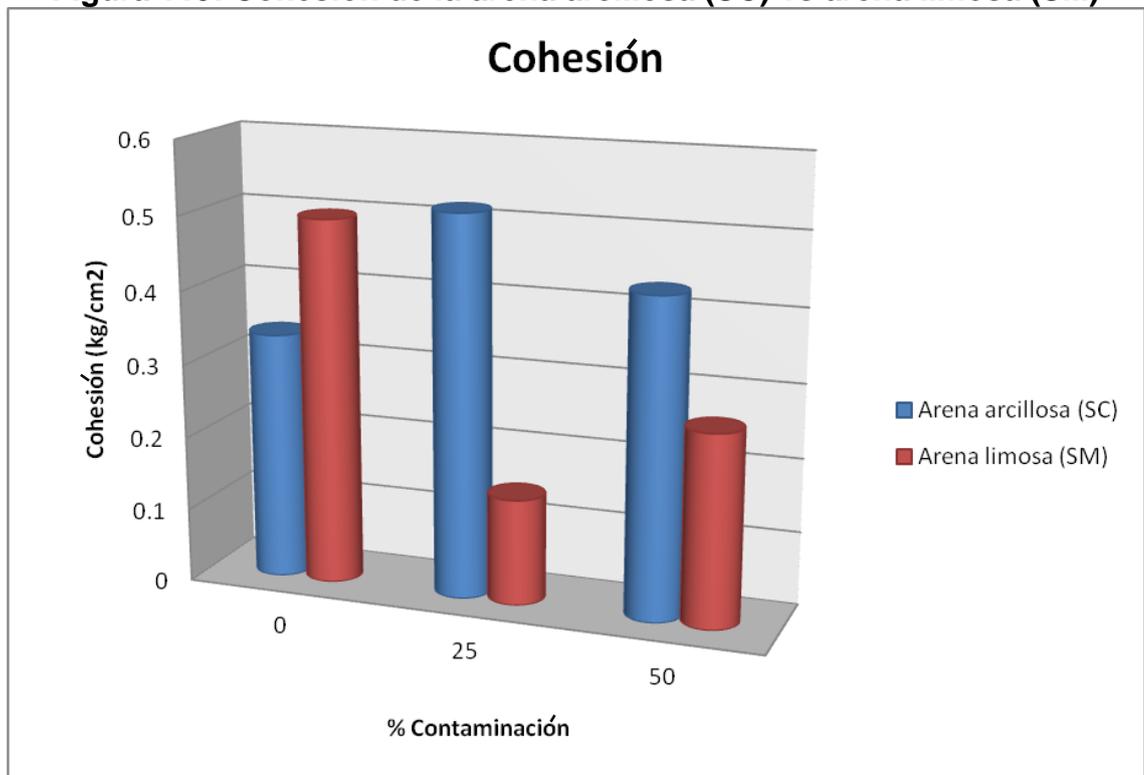


Fuente: Autor

El suelo arena limosa (SM) contaminado al 25% presenta el mayor ángulo de fricción, que traduce un mayor coeficiente de rozamiento entre las partículas.

Como se evidencia en la figura 119, el suelo arena limosa (SM) sin contaminar arroja una cohesión mayor que el suelo arena limosa (SM) con diferencias considerables. Mientras tanto el suelo arena arcillosa (SC) presenta mayor cohesión para porcentajes de contaminación del 25% y 50% frente al material arena limosa (SM) con los mismos porcentajes de contaminación con diferencias significativas.

Figura 119: Cohesión de la arena arcillosa (SC) vs arena limosa (SM)



Fuente: Autor

El suelo arena arcillosa (SC) contaminado al 25% presenta mayor cohesión, lo que representa mayor adherencia de las partículas.

6. CONCLUSIONES

Se evaluaron los parámetros de compactación y resistencia al corte de arenas limosas (SM) y arena arcillosa (SC) contaminados con derivados de hidrocarburos en concentraciones al 25% y 50% de la porosidad.

Los suelos contaminados con concentraciones al 75% y 100% de la porosidad no se dejaban trabajar debido a que se saturaban y no permitían la realización de los ensayos de acuerdo a las normas.

6.1. RESPECTO AL ENSAYO DE COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO

El suelo arena arcillosa (SC) presentó una disminución en el porcentaje de humedad óptima a medida que aumentaban las concentraciones de contaminantes, lo que demuestra que el contaminante influye directamente sobre el suelo disminuyendo la cantidad de agua para alcanzar la humedad óptima de compactación.

El suelo arena limosa (SM) presentó resultados variables con el aumento de concentraciones del contaminante, disminuyendo la humedad óptima cuando la concentración es al 25% y aumentando la humedad óptima cuando la concentración es al 50%. Este comportamiento se dio debido a la poca presencia de vacíos lo que disminuye la cantidad de agua necesaria para llenarlo, pero manteniendo la posibilidad de ser compactado.

El suelo arena limosa (SM) al ser contaminado al 25% de la porosidad presenta un mejoramiento en su capacidad de compactación ya que tiene los mayores valores de densidad seca máxima lo que nos representa menor cantidad de vacíos, es decir, disminución en la capacidad de deformación.

La reacción que genera el contaminante sobre cada suelo es diferente por lo tanto no existen comportamientos similares de los materiales bajo las mismas condiciones de contaminación.

6.2. RESPECTO AL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

En el material arena arcillosa (SC) el contaminante con una concentración al 25% genera un mejoramiento en las propiedades mecánicas de cohesión y ángulo de fricción. El mejoramiento de estas propiedades se debe a que el hidrocarburo elimina los vacíos presentes en el material y las partículas adoptan una nueva configuración. Cuando el porcentaje de contaminación superaba el 25% de la porosidad estas propiedades empiezan a tener comportamientos menos favorables debido a que se empieza a producir saturación del material.

En el material arena limosa (SM) no se evidencio de forma clara bajo que concentraciones de contaminante el suelo empieza a verse afectado negativamente ya que los resultados no tienen alguna tendencia. Sería necesario realizar otras pruebas para identificar el efecto de los hidrocarburos sobre esta clase de suelos.

La propiedad friccional, propia de materiales limosos, fue mejorada por efecto del contaminante en concentraciones no mayores al 25% en el suelo arena limosa (SM).

La propiedad cohesiva, propia de materiales arcillosos, fue mejorada por efecto del contaminante en concentraciones no mayores al 25% en el suelo arena arcillosa (SC).

7. RECOMENDACIONES

Para tomar las humedades en la estufa debe hacerse en un espacio abierto y con ventilación para evitar la inhalación de los vapores producidos por los derivados de hidrocarburos.

Para los ensayos de compactación del material arena limosa (SM) contaminado es necesario aumentar el tamaño de las capas, ya que al perder cohesión, no quedan unidas entre si y las muestras saldrán con el corte sin ser falladas.

Para los ensayos de compactación del material arena arcillosa (SC) contaminado es necesario disminuir el número de golpes y el tamaño de las capas ya que toma propiedades expansivas que provoca que el material no se compacte de manera uniforme.

Para tomar las muestras para el ensayo de corte directo el molde no debe quedar a nivel con el molde de compactación para evitar quiebres en la cara de la muestra.

Se debe establecer un sitio adecuado para almacenar las muestras y que no pierdan humedad por acción del calor y del aire.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Muelas Rodriguez, Angel. Manual de mecánica de suelos y cimentaciones. Capitulo 1. Caracterización de los suelos. Editorial Librería técnica Bellisco. Consultado el 1 de Noviembre de 2013

[2] Crespo Villalaz, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones 5a Ed. Editorial Limusa. Año 2004.

[3] Lambe, William. Whitman, Robert. Mecánica de suelos 1a edición. Editorial Mc Graw-Hill. Año 1970.

[4]<http://proyectobiologia4rota.blogspot.com/2010/03/e-l-s-u-e-l-o-se-denomina-suelo-la.html> Visitada el 7 de Noviembre de 2013.

[5]http://es.123rf.com/photo_12695272_primer-plano-de-suelo-organico-aislado-sobre-fondo-blanco.html Visitada el 7 de Noviembre de 2013

[6] Campos Rodriguez, Jorge. Guardia Niño, Germán. Apoyo didáctico al aprendizaje de la asignatura mecánica de suelos. Capitulo 1. Propiedades de los suelos, pág. 19. Consultado el 1 de Noviembre de 2013

[7] Juárez Badillo, Eulalio. Mecánica de suelos. 3ª edición. Editorial Limusa. Año 1999.

[8] http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010_11_14_archive.html Visitada el 7 de Noviembre de 2013.

[9]<http://www.constructorcivil.org/2010/05/clasificacion-de-suelos-segun-aashto.html> Visitada el 7 de Noviembre de 2013.

[10] Brown, Theodore L. Química, la ciencia central. 9ª edición. Editorial Pearson Prentice Hall. Año 2004.

[11] Silos Rodriguez, Jose Maria. Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos. 1ª edición. Publicado por la Universidad de Cadiz. Año 2008.

[12] Khomechyan, Mashalab. Hussein Amir. Enginnering geology 89(2007) 220-229, effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils.

[13] Alsanad, H.A. and N.F. Ismail, 1997. Aging effect on oil contaminated Kuwait sand. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 123: 290-293..

[14] Aiban, S.A., 1998. The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sand. Environ. Int., 24: 153-161.

- [15] Evgin, E. and B.M. Das, 1992. Mechanical Behaviour of Oil-Contaminated Sand. In: Environmental Geotechnology, Usmen, M.A. and Y.B. Acar (Eds.). Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, pp: 101-108.
- [16] Shin, E.C. and B.M. Das, 2001. Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand. Int. J. Offshore Polar Eng., 11: 220-227..
- [17] Meegoda, N., Ratnaweera, P., 1994. Compressibility of contaminated fine-grained soils. Geotech. Test. J. 17, 101
- [18] Carrigy, M.A. 1967. The physical and chemical nature of typical tar sand; bulk properties and behaviour. Proc Int 7th world petroleum congress. Vol 1. Pag 573-581
- [19] Ola, S.A. 1991. Geotechnical properties and behaviour of Nigerian tar sand. Journal of engineering geology 30, 325-336 or 1. Pag 573-581
- [20] Galvis, Guillermo. Mantilla, Camilo. Caracterización mecánica de suelos orgánicos ajustados afectados por derrames superficiales de crudo en concentraciones por porcentaje en peso: 5, 10, 15 y 30. Tesis.
- [21] Invias, Norma INV E-154-07, Determinación de la resistencia al corte método de corte directo (CD) (Consolidado drenado)
- [22] Invias, Norma INV E-142-07, Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (Ensayo modificado de compactación)

