UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de neumáticos inservibles

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES:

Benavente Huamán, Eduardo Joel (0000-0001-5949-3231)

Navarro Cárdenas, Mauricio Enrique (0000-0002-0554-5734)

ASESOR:

Durán Ramirez, Gary (0000-0002-2011-7463)

Lima, Febrero del 2020

DEDICATORIA

A mi padre Eduardo, a mi madre Magaly, a mis hermanos Pamela, Cesar y Micaela, y a mi compañero Mauricio por su constante apoyo.

Al ingeniero Gary Durán Ramírez por su apoyo en el desarrollo de la presente tesis.

Eduardo Joel Benavente Huamán

A mi padre Javier, a mi madre Ivette, a mi hermana Carla y a mi compañero Eduardo por su constante apoyo.

Al ingeniero Gary Durán Ramírez por su apoyo en el desarrollo de la presente tesis.

Mauricio Enrique Navarro Cárdenas

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por todo el apoyo brindado durante mis años de estudio.

Agradezco a mis amigos y compañeros de estudio por todos los consejos brindados y el apoyo en los momentos que mas necesité.

Agradezco a todos mis profesores por transmitirme sus conocimientos durante mis años de estudio.

RESUMEN

La reutilización de neumáticos desechados puede reducir el gran problema ambiental asociado a su inadecuada disposición final. Una forma, es su adición en suelos compactados lo que puede brindar soluciones a los problemas mecánico-geotécnicos relacionados con su baja resistencia al corte.

Este estudio presenta el comportamiento de una arena limosa reforzada con caucho rallado de neumáticos inservibles, a través de un estudio experimental. Se realizaron ensayos de caracterización física, Proctor Estándar, corte directo y triaxiales consolidados no drenados (CU) con el fin de establecer patrones de comportamiento mecánico que definan la influencia de la adición de caucho rallado en este suelo. Los ensayos de corte directo y triaxial CU se realizaron en muestras de suelo compactadas en su densidad máxima seca y humedad óptima. Los especímenes ensayados en el corte directo se elaboraron con contenidos de caucho de 0%, 5%, 10%, 15% y 20%, en relación con el peso seco del suelo. Por otro lado, el ensayo triaxial se realizó con especímenes con contenido de caucho rallado de 0% y 5%. Los resultados mostraron que la resistencia al corte incremento en las muestras con 5%, 10% y 15% de adición de caucho respecto a la del suelo natural y que además la inserción es más efectiva para tensiones de confinamiento mayores a 50 kPa.

Palabras Clave: Caucho Rallado; Suelo, Dilatancia; Ensayo Triaxial; Resistencia al Corte

ABSTRACT

The reuse of discarded tires can reduce the great environmental problem associated with their inadequate final disposal. One way is its addition in compacted soils that can provide solutions to mechanical-geotechnical problems related to its low cut resistance.

This study presents the behavior of a silty sand reinforced with grated rubber from unusable tires, through an experimental study. Physical characterization tests, Proctor Standard, direct cutting and consolidated triaxial undrained (CU) were carried out in order to establish patterns of mechanical behavior that define the influence of the addition of grated rubber in this soil. The triaxial and direct cut CU tests were performed on compacted soil samples at their maximum dry density and optimum humidity. The specimens tested in the direct cut were made with rubber contents of 0%, 5%, 10%, 15% and 20%, in relation to the dry weight of the soil. On the other hand, the triaxial test was carried out with specimens with grated rubber content of 0% and 5%. The results showed that the cut resistance increased in the samples with 5%, 10% and 15% of rubber addition with respect to natural soil and that the insertion is more effective for confinement stresses greater than 50 kPa.

Keywords: Grated Rubber, Tire Shred, Soil, Dilance, Triaxial Test, Shear Strenght

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1. Fundamentación	1
1.1.1. Antecedentes.....	1
1.1.2. Realidad Problemática	2
1.1.3. Formulación del Problema.....	3
1.1.4. Hipótesis	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Indicadores de Logros	4
2. CAPITULO 2: MARCO TEORICO	6
2.1. Neumáticos	6
2.1.1. Descripción.....	6
2.1.2. Estructura.....	6
2.1.3. Composición.....	7
2.1.4. Vida Útil y Ciclo de Vida de un Neumático.....	9
2.1.5. Tratamientos y Tecnologías de Reciclaje	13
2.1.6. Legislación en el Perú.....	14
2.2. Suelos	15
2.2.1. Definición	15
2.2.2. Suelos Granulares	16
2.2.3. Suelos Cohesivos.....	16
2.2.4. Propiedades Físicas y Mecánicas	17
2.3. Compactación de Suelos.....	19
2.3.1. Influencia en diferentes tipos de suelos	19
2.3.2. Influencia de la energía de compactación.....	20
2.3.3. Influencia de la compactación en la resistencia al corte.....	21
2.4. Resistencia y Deformación de los Suelos.....	23
2.4.1. Resistencia al Corte	23
2.4.2. Criterio de Rotura de Coulomb	23
2.4.2.1. Ángulo de Fricción Interna.....	26
2.4.2.2. Cohesión	26

2.4.3.	Criterio de Rotura de Mohr – Coulomb	27
2.5.	Ensayos de Laboratorio	30
2.5.1.	Granulometría.....	30
2.5.2.	Límites de Atterberg.....	30
2.5.3.	Peso Específico de las partículas	34
2.5.4.	Ensayo de Compactación Proctor Estándar	34
2.5.5.	Ensayo de Corte Directo.....	35
2.5.5.1.	Generalidades	35
2.5.5.2.	Tipo de Ensayos	36
2.5.5.3.	Equipo.....	37
2.5.5.4.	Ventajas e Inconvenientes	39
2.5.5.5.	Determinación de los Parámetros de Resistencia	39
2.5.6.	Ensayo Triaxial.....	40
2.5.6.1.	Generalidades	40
2.5.6.2.	Tipos de Ensayos	41
2.5.6.3.	Equipo.....	41
2.5.6.4.	Determinación de parámetros de resistencia	47
3.	CAPITULO 3: METODOLOGIA.....	48
4.	CAPITULO 4: PROCESO EXPERIMENTAL.....	52
4.1.	Materiales Utilizados.....	52
4.1.1.	Suelo	52
4.1.2.	Caucho Rallado	53
4.1.3.	Agua	54
4.1.4.	Mezcla Suelo-Caucho.....	54
4.2.	Ensayos: Métodos y Procedimientos.....	55
4.2.1.	Ensayos de Caracterización Física	55
4.2.1.1.	Granulometría.....	56
4.2.1.2.	Límites de Atterberg.....	57
4.2.2.	Ensayo de Estado.....	58
4.2.2.1.	Peso Específico de las Partículas.....	58
4.2.3.	Ensayo de Compactación.....	59
4.2.3.1.	Ensayo de Proctor Estándar	60
4.2.4.	Ensayos de Resistencia.....	62
4.2.4.1.	Ensayo de Corte Directo.....	62

4.2.4.2.	Ensayo Triaxial (CU).....	67
4.2.4.2.1	Equipo utilizado.....	67
4.2.4.2.2	Preparación de las muestras de prueba	67
4.2.4.2.4	Introducción de las muestras a la cámara del ensayo Triaxial	69
5.	CAPITULO 5: ANALISIS DE RESULTADOS	71
5.1.	Ensayos de Caracterización Física	71
5.1.1.	Suelo	71
5.1.1.1.	Análisis Granulométrico.....	71
5.1.1.2.	Límites de Atterberg.....	72
5.1.2.	Caucho	73
5.1.2.1.	Análisis Granulométrico.....	73
5.2.	Ensayo de Estado.....	75
5.2.1.	Ensayo de Peso Específico	75
5.3.	Ensayo de Compactación.....	75
5.3.1.	Ensayo de Proctor Estándar	75
5.4.	Ensayos de Resistencia.....	78
5.4.1.	Ensayo de Corte Directo.....	78
5.4.2.	Ensayo Triaxial (CU).....	86
5.4.2.1	Círculo de Mohr	86
5.4.2.1.1	Suelo natural	86
5.4.2.1.2	Suelo con adición del 5% de caucho	90
5.4.2.2	Deformación unitaria.....	93
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
6.1.	CONCLUSIONES.....	99
6.2.	RECOMENDACIONES	102
7.	REFERENCIAS	104
8.	ANEXOS.....	107

Índice de Tablas

Tabla N° 1. Composición por peso de automóviles y camiones.	9
Tabla N° 2. Vida Útil de los Neumáticos	11
Tabla N° 3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	33
Tabla N° 4. Especificaciones técnicas del equipo	42
Tabla N° 5. Especificaciones técnicas del equipo	44
Tabla N° 6. Ensayo de Proctor Estándar	49
Tabla N° 7. Ensayo de corte directo	50
Tabla N° 8. Ensayo Triaxial	50
Tabla N° 9. Tamizado del suelo	71
Tabla N° 10. Límites de Atterberg	72
Tabla N° 11. Datos de ensayo de Peso Especifico de las partículas	75
Tabla N° 12. Datos de ensayo de Proctor Estandar	76
Tabla N° 13. Datos de Máxima densidad seca y Coeficiente optimo de humedad de las mezclas.	77
Tabla N° 14. Datos de Esfuerzo de corte respecto al desplazamiento horizontal.	80
Tabla N° 15. Angulo de fricción y Cohesión de cada muestra	81
Tabla N° 16. Esfuerzos totales del suelo sin adición.....	86
Tabla N° 17. Esfuerzos efectivos del suelo sin adición.....	88
Tabla N° 18. Esfuerzos totales del suelo con adición del 5% de caucho	90
Tabla N° 19. Esfuerzos efectivos del suelo con adición del 5% de caucho	92
Tabla N° 20. Esfuerzo desviador y Presión de poros del suelo sin adición	94
Tabla N° 21. Esfuerzo desviador y Presión de poros del suelo con adición de 5% de caucho	96

Índice de Figuras

Figura N° 1. Estructura de un Neumático	6
Figura N° 2. Ciclo de vida del neumático	12
Figura N° 3. Distribución de tamaños de materiales	18
Figura N° 4. Porosidad y permeabilidad	19
Figura N° 5. Energía de compasión en ensayo Proctor	21
Figura N° 6. Alta humedad del ensayo disminuye la rigidez	22
Figura N° 7. Modelo del criterio de rotura propuesto por Coulomb.	24
Figura N° 8. Envolvente de rotura del suelo o envolvente de falla.	25
Figura N° 9. Círculo de Mohr.....	28
Figura N° 10. Relación Mohr-Coulomb	29
Figura N° 11. Carta de Plasticidad de Casagrande.	32
Figura N° 12. Diagrama de un arreglo de prueba de Corte Directo	36
Figura N° 13. Colocación de la muestra de suelo en la caja de corte.....	37
Figura N° 14. Representación gráfica de la tensión del corte vs la deformación (Derecha). Representación gráfica de la tensión del corte vs esfuerzo normal para obtener el Angulo de fricción. (Izquierda)	40
Figura N° 15. Panel de Control	42
Figura N° 16. Dispositivo de cambio de volumen	43
Figura N° 17. Prensa Triaxial	44
Figura N° 18. Blader.....	45
Figura N° 19. Cámara Triaxial	46
Figura N° 20. Etapa de confinamiento	47
Figura N° 21. Aplicación de esfuerzo incremental	47
Figura N° 22. Mapa de Satipo	52
Figura N° 23. Material de Cantera Laguna – Satipo	53
Figura N° 24. Tamaños de Caucho rallado	54
Figura N° 25. Caucho rallado utilizado	54
Figura N° 26. Tamizado de la muestra	56
Figura N° 27. Lavado de la muestra retenida en la Malla N° 200.....	56
Figura N° 28. Preparación de la pasta	57
Figura N° 29. Herramienta Casablanca	57

Figura N° 30. Muestras llevadas al horno	58
Figura N° 31. Pesado de fiola con suelo.....	58
Figura N° 32. Pesado de fiola con suelo y agua destilada.....	59
Figura N° 33. (a) Peso del suelo puro hasta llegar a 3 000 gramos de material. (b) Peso del suelo puro con una adición de 5% de caucho rallado respecto al peso seco del suelo. (150 gramos de caucho rallado)	60
Figura N° 34. (a) Aplicación de 3% de agua al suelo (b) Mezcla homogenizada del suelo y separada en 3 fragmentos	61
Figura N° 35. (a) Relleno de los fragmentos separados en el molde cilindrico de compactación. (b) Aplicación de 25 golpes por capa.....	61
Figura N° 36. Molde en balanza digital.....	62
Figura N° 37. Muestras de Suelo natural y con sus respectivas mezclas de adición de caucho.....	64
Figura N° 38. Muestra moldeada de suelo con 20% de caucho añadido	64
Figura N° 39. Equipo de Corte Directo	65
Figura N° 40. Especímenes extraídos del ensayo con 10% y 20% de caucho añadido .	66
Figura N° 41. Muestras en horno para su respectivo secado.....	66
Figura N° 42.	67
Figura N° 43. Muestra de suelo con adición de caucho	68
Figura N° 44. Muestra preparada para ingresar a la cámara triaxial	69
Figura N° 45. Muestra dentro de la cámara triaxial	69
Figura N° 46. Muestra de suelo rota.....	70
Figura N° 47. Curva Granulométrico del Suelo	72
Figura N° 48. Curva granulométrica del cuacho	73
Figura N° 49. Curva granulométrica de las muestras: S100, S95/C5, S90/C10, S85/C15, S80/C20.....	74
Figura N° 50. Curvas de Proctor para las muestras S100. S95/C5, S90/C10, S85/C15, S80/20.....	76
Figura N° 51. Densidad seca máxima vs. Adición de caucho.....	77
Figura N° 52. Densidad seca máxima vs. Contenido óptimo de humedad.....	78
Figura N° 53. Esfuerzo de Corte (kPa) Vs. Deformación Horizontal (mm)	79
Figura N° 54. Envolvente de rotura del suelo	80
Figura N° 56. Envolvente de rotura del suelo de 0 a 50 kPa.....	81
Figura N° 57. Envolvente de rotura del suelo de 50 a 100 kPa.....	82

Figura N° 58. Envolvente de rotura del suelo	82
Figura N° 59. Cohesión vs. Desplazamiento	83
Figura N° 60. Ángulo de fricción vs. Desplazamiento.....	84
Figura N° 61. Desplazamiento vertical (mm) vs. Desplazamiento horizontal (mm)	85
Figura N° 62. Círculo de Mohr de esfuerzos totales del suelo sin adición	87
Figura N° 63. Círculo de Mohr de esfuerzos efectivos del suelo sin adición	89
Figura N° 64. Círculo de Mohr de esfuerzos totales del suelo con adición de 5% de caucho	91
Figura N° 65. Círculo de Mohr de esfuerzos efectivos del suelo con adición de 5% de caucho	93
Figura N° 66. Esfuerzo desviador vs Deformación unitaria del suelo sin adición.....	95
Figura N° 67. Presión de poros vs Deformación unitaria del suelo sin adición.....	95
Figura N° 68. Esfuerzo desviador vs Deformación Unitaria.....	97
Figura N° 69. Presión de Poros vs Deformación Unitaria.....	97
Figura N° 70. Esfuerzo de corte vs Esfuerzo de deformación	98

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1. Fundamentación

1.1.1. Antecedentes

En el Departamento de Geología de la Universidad Cukurova, ubicada en Turquía, se investigó sobre las propiedades geotécnicas de las partículas de caucho provenientes de neumáticos inservibles tanto de grano fino como de grano grueso y sus mezclas (10, 20, 30, 40 y 50% en relación con el peso seco) con un suelo arcilloso a través de una serie de pruebas mecánicas para investigar las posibilidades del uso de este material como relleno ligero. (Cetin, Fener, & Gunaydin, 2006)

Se realizaron ensayos granulométricos, plásticos, permeables, de corte directo y compactación, utilizando partículas de caucho (tanto finas como gruesas). Los resultados indican que es posible utilizar este residuo mezclado con suelo arcilloso como material de relleno. Las mezclas de hasta 20% de grano grueso y 30% de grano fino de partículas de caucho se pueden utilizar encima de la napa freática, donde los rellenos con bajo peso unitario, menor permeabilidad y alta resistencia son necesarios al momento de construir terraplenes de carreteras y relleno detrás de muros de contención, especialmente cuando deben construirse sobre suelos blandos de baja capacidad de carga y altos problemas de asentamiento. No deben usarse donde el drenaje es necesario para prevenir el desarrollo de presiones de poro durante la carga de rellenos en condiciones saturadas. En estos casos, sin embargo, se pueden utilizar mezclando con materiales de alta permeabilidad tales como arena y grava. (Cetin, Fener, & Gunaydin, 2006).

El Departamento de Ingeniería Civil de la universidad Clemson, en Estados Unidos, realizó un estudio de las propiedades geotécnicas de caucho granular en mezclas con arena en varios porcentajes con relación al peso seco. Para determinar la amplitud potencial como material ligero, se realizaron Ensayos de Compactación Proctor, Ensayos de corte Directo, Ensayos Triaxiales y Ensayos de Permeabilidad en mezclas de caucho-arena en proporciones de 100%, 75%, 50% y 25%. de caucho. Los resultados muestran

que el nuevo material compuesto es ligero, pero tiene alta permeabilidad y ángulo de fricción que son comparables con los de un suelo granular. Sobre la base de estas propiedades se cree que el nuevo material puede ser utilizado como relleno ligero detrás de un muro contención, capa de drenaje en rellenos sanitarios, aislante en subrasante de carreteras y relleno de terraplenes. (Kyser & Ravichandran, 2016)

1.1.2. Realidad Problemática

La disposición final de neumáticos inservibles representa un problema de difícil solución, pues son residuos que ocupan gran volumen y que necesitan ser almacenados en condiciones apropiadas. Asimismo, la disposición inadecuada de estos produce un impacto negativo y duradero en el medio ambiente, ya que la degradación de sus residuos es muy lenta. Se consideran neumáticos inservibles aquellos que, después de la producción, contengan algún defecto que los imposibilite de ser utilizados, o que hayan llegado al final de su vida útil, es decir, que ya no puedan ser utilizados en vehículos por perder su condición de rodaje tras haber sido rencauchados.

La conservación de grandes pilas de neumáticos en el medio ambiente genera focos de infección, proliferación de insectos y roedores que constituye un problema añadido al de la quema de este material, el cual produce emisiones de gases que poseen partículas nocivas. Las montañas de neumáticos forman arrecifes donde la proliferación de roedores, insectos y otros animales dañinos constituye un problema añadido. La reproducción de ciertos mosquitos, que transmiten por picadura fiebres y encefalitis, llega a ser 4.000 veces mayor en el agua estancada de un neumático que en la naturaleza.

Con la presente investigación, a través de ensayos experimentales de laboratorio, se busca conocer la viabilidad del empleo del caucho rallado como refuerzo en obras de tierra. La utilización de este como material alternativo puede potenciar la disminución de la explotación de recursos naturales, contribuir con la minimización de pasivos ambientales, agregar valor al residuo y evitar problemas ambientales, tales como contaminación del aire y la sedimentación de ríos y lagos, eliminando problemas actuales de disposición de residuos en vertederos y rellenos sanitarios.

La técnica de inserción de materiales alternativos en obras geotécnicas auxilia en la disminución de los costos de las obras, incentivando la inversión en este tipo de infraestructura y atendiendo así parcelas de la sociedad que son menos favorecidas. La eliminación de neumáticos inservibles del medio ambiente contribuye a la mejora de la salud pública, ya que estos desechos son ambientes propicios para el desarrollo de las causantes de enfermedades. En Perú, donde el clima por sí solo ya contribuye al desarrollo natural de estas mismas, buscar un uso adicional para los neumáticos inservibles se vuelve aún más relevante.

Este proyecto de investigación aborda los primeros conocimientos sobre el comportamiento de suelos reforzados con este residuo (caucho rallado proveniente de neumáticos inservibles), en el cual se comprueba que este material puede ser utilizado para potenciar los proyectos de obras geotécnicas (terraplenes, rellenos temporales, rasantes) y a su vez contribuye para el equilibrio entre el medio ambiente y la sociedad.

1.1.3. Formulación del Problema

¿Utilizar caucho reciclado de neumáticos inservibles como agregado a un suelo granular, podrá aumentar sus propiedades mecánico-geotécnicas y a su vez contribuir al medio ambiente?

1.1.4. Hipótesis

La implementación de caucho rallado reciclado proveniente de neumáticos inservibles en suelos granulares incrementará su resistencia al corte y disminuirá sus deformaciones.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Identificar la influencia del caucho rallado de neumáticos inservibles en el comportamiento mecánico geotécnico de un tipo suelo granular.

Este objetivo será alcanzado a través de la evaluación del comportamiento físico y mecánico de los suelos y de las mezclas, estableciendo parámetros de comportamiento que puedan medir la influencia de la adición del caucho rallado.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar ensayos de caracterización física del suelo, a través de ensayos de laboratorio normalizados.
- Evaluar el comportamiento mecánico del suelo puro y en mezclas con diversos porcentajes de caucho rallado de neumático, a través de ensayos de compactación y ensayos de corte directo y triaxial consolidado no drenado (CU), a fin de obtener los parámetros de resistencia al corte.
- Analizar los parámetros de resistencia y el comportamiento del suelo y sus mezclas con relación al nivel de su deformación.
- Analizar la influencia del contenido de caucho agregado en cada tipo de mezcla.
- Calcular qué porcentaje de caucho reciclado en los suelos brinda una resistencia máxima favorable y compararlo con la resistencia máxima del suelo sin adición.
- Comprobar que la adición de caucho reciclado en suelos brinda mayor resistencia al corte y menores deformaciones.

1.3. Indicadores de Logros

Obtener las propiedades físicas del suelo, tales como, su nombre típico, sus límites de consistencia y la gravedad específica de sus sólidos.

Obtener la densidad seca máxima y el porcentaje de humedad óptimo del suelo puro y de sus respectivas mezclas con adición de caucho rallado en 5%, 10%, 15% y 20% con relación a su peso seco.

Obtener los parámetros de resistencia al corte de suelo puro y de sus respectivas mezclas con adición de caucho rallado en 5%, 10%, 15% y 20% con relación a su peso seco mediante el ensayo de Corte Directo.

Obtener los parámetros de resistencia del suelo natural y de la mezcla con el porcentaje de caucho óptimo mediante el ensayo Triaxial.

Definir la mezcla de suelo-caucho que posea el mejor comportamiento mecánico-geotécnico basándonos principalmente en los parámetros de la resistencia al corte, tales como, la cohesión y el ángulo de fricción.

Obtener el módulo de elasticidad del suelo puro y de la mezcla con mejor comportamiento mecánico-geotécnico basándonos principalmente en los parámetros de la resistencia al corte, tales como, la cohesión y el ángulo de fricción.

2. CAPITULO 2: MARCO TEORICO

2.1. Neumáticos

2.1.1. Descripción

El neumático es un elemento complejo de estructura tubular formado por un conjunto de características sugestivas que desde muchas décadas atrás lo hace una fuente de investigación predominante en la ingeniería. Está constituido por un armazón hueco, negro, circular y lleno de aire comprimido que le permite soportar hasta más de 50 veces su peso propio. Creado con la finalidad de integrar a los vehículos y permitirles desplazarse a través de superficies rugosas, húmedas, resbaladizas y secas de una manera suave y segura gracias a los diversos materiales que lo componen.

2.1.2. Estructura

Las características externas de los neumáticos no han cambiado mucho durante las últimas cinco décadas. Poseen una estructura formada por diferentes materiales mostradas en la Figura N° 1, que cumplen una función específica y se describen aquellas que de acuerdo con (Ferreira, 2011, pág. 58) impactan en posibles acciones de reciclaje.

Figura N° 1. Estructura de un Neumático

Fuente: (Ferreira, 2011, pág. 58) adaptado por el autor

La **banda de rodamiento** es la parte del neumático que entra directamente en contacto con la superficie de la carretera. Dependiendo del tipo de neumático varia la cantidad de caucho natural. Sin embargo, esta es la parte del neumático que posee su mayor concentración.

Los **pliegues de acero** ofrecen soporte estructural a la banda de rodamiento, ayudando a mantener la forma del neumático. Está conformado por bandas de goma que contienen latón cubierto por alambres de acero con gran contenido de carbono.

La **carcasa** es la parte que proporciona la forma y estructura interna del neumático. Es fabricada de manera tradicional con alambres de metal retorcido, rayón natural, nylon o poliéster, siendo estas posteriormente recubiertas con una sustancia de caucho natural.

El **aislamiento interior** o también llamado innerliner es una parte fundamental del neumático. Está formada por una superficie compuesta de caucho que brinda un revestimiento a la carcasa con el objetivo de retener el aire y mantener la presión constante.

El **talón** es la parte del neumático que entra en contacto con el aro. Está conformado por alambres de acero de alta resistencia cubiertos por caucho. Tiene una función estructural, ayudando en el anclaje entre el neumático y el aro.

Se puede apreciar, de las previas descripciones, que la combinación de materiales tales como alambres de acero o nylon, y caucho natural y sintético son los elementos predominantes en la estructura de un neumático.

2.1.3. Composición

Durante el proceso de fabricación se tiene presente el uso de derivados del petróleo como el negro humo, y productos químicos como el azufre. La proporción de cada material en la composición de un neumático varía según el uso final del producto, como en camiones de carga, automóviles de pasajeros, vehículos industriales, y otros.

Independientemente del uso final de los neumáticos, para su elaboración, los materiales, según (Shulman, 2004, pág. 7), se dividen en cuatro grupos fundamentales: cauchos, negro humo, materiales de refuerzo y facilitadores.

El primer grupo está conformado por el caucho natural y sintético, los cuales tienen la mayor cantidad de presencia, cuya cantidad varía entre el 40% y 45% en peso al neumático. El caucho natural se obtiene mediante la extracción del árbol Hevea y el sintético es generalmente obtenido de productos derivados del petróleo. Asimismo, la relación entre caucho natural y sintético es de aproximadamente 2: 1 en neumáticos de camión y 4: 3 en neumáticos de automóviles.

El negro humo conforma el segundo grupo fundamental. Este posee una participación de entre 23% y 27% respecto al peso del neumático. Debido a que tiene diferentes formas y tamaños puede ser usado tanto en el forro inferior como también en la carcasa del neumático.

El tercer grupo de mayor presencia son los metales y textiles, considerados como materiales de refuerzo. En un neumático de camión el textil solo abarca el 1% del peso, mientras que el metal en el talón, pliegues y carcasa puede añadir alrededor de un 25% al peso de este. Sin embargo, dicho valor se reduce a un intervalo de entre 11% y 13% cuando se trata de un neumático para automóvil, ya que posee 5% de textil en la carcasa; mayor a comparación a la de un camión.

El cuarto grupo de materiales es utilizado como facilitador durante las diversas etapas de la producción de un neumático. Con el objetivo de aumentar la eficiencia de la fabricación, mejorar el rendimiento y facilitar el curado se agregan pequeñas cantidades de aceites extendedores, antioxidantes, ceras, antiozonorantes y otros ingredientes. Asimismo, para poder facilitar el proceso de vulcanización se distribuyen homogéneamente variedades de negro humo, óxido de zinc, dióxido de titanio y azufre. En la Tabla N° 1 se presenta la composición de los neumáticos en automóviles y camiones.

Tabla N° 1. Composición por peso de automóviles y camiones.

Fuente: (Shulman, 2004, pág. 7) Adaptado por el autor

Material	Automóvil %	Camión %
Caucho natural y sintético	±43	±45
Negro Humo	±27	±20
Metales	±11	±22
Textiles	±5	±1
Vulcanizadores	±3	±3
Aditivos	±3	±3
Aceites	±8	±8

El proceso que se realiza para combinar los componentes de un neumático modifica la dureza del caucho e incrementa la resistencia al calor, a la abrasión, a los aceites, a los disolventes químicos, al oxígeno y al medio ambiente. En el momento que todos los componentes ya han sido procesados y se tiene la estructura definida, el neumático pasa a ser vulcanizado. Este es un proceso de curado con azufre que tiene como fin incrementar la dureza, resistencia y elasticidad del caucho. Finalmente se obtiene una estructura alterada, totalmente integrada por todos sus materiales y que ya no puede ser reversible, es decir, que las moléculas de caucho ya no podrán retornar a su forma original.

2.1.4. Vida Útil y Ciclo de Vida de un Neumático

Según la Asociación de la industria del neumático (Tire Industry Association – TIA), (Ferreira, 2011) , los factores que influyen la vida útil de los neumáticos son:

- La presión baja genera una deflexión excesiva del neumático provocando desgaste, grietas superficiales en el área del talón, aumento en el consumo de combustible, reduciendo la vida útil del neumático y, al final de la vida útil, los neumáticos se clasifican como inservibles, disminuyendo la cantidad disponible para el proceso de reforma.
- La presión alta reduce la capacidad de flexión del neumático, dejando de amortiguar los impactos y causando rupturas en la carcasa del neumático con mayor facilidad. El neumático tiene desgaste en las ramas centrales de la banda

de rodamiento en los neumáticos diagonales / convencionales y desgaste en los hombros en los neumáticos radiales.

- La geometría vehicular es un conjunto de parámetros geométricos que rige el posicionamiento de los ejes y ruedas de un vehículo para asegurar que las ruedas siempre rueden sin deslizamiento o arrastre, evitando con ello el desgaste excesivo de los neumáticos, el exceso de consumo de combustible, el desgaste o la ruptura prematura de los componentes del sistema de suspensión.
- El camber es el ángulo que representa la inclinación de la parte superior de las ruedas delanteras dentro y fuera del vehículo en sentido transversal. Cuando el camber está fuera de lo especificado, ocurre el desgaste irregular de los neumáticos, problemas de conducción, interferencia en la convergencia y aumento de la resistencia al rodamiento.
- La rotación de los neumáticos evita desgastes irregulares y desarrolla un trabajo particular sobre el diseño del neumático. Después del cambio a otra posición, el neumático pasa por un período de adaptación en el cual el desgaste es acentuado. La rotación debe realizarse cada 10.000 km.
- La alineación de las ruedas (convergencia y divergencia) tiene la función de compensar la elasticidad del mecanismo de dirección (pivotes, brazos, terminales, barras de dirección y conexión) en razón de la carga y velocidad, y hace que las ruedas queden paralelas cuando el vehículo está en movimiento. En el caso de la alineación fuera de lo especificado, ocurre el desgaste prematuro de los neumáticos.
- Todos los ejes deben estar paralelos entre sí y perpendiculares al chasis para mantener la dirección en línea recta.
- Combinación y espaciamiento de neumáticos dobles.
- Montaje de las ruedas.
- Actitud del conductor al conducir.
- Tipo de carretera en el que gira el vehículo, con o sin asfalto.

- Posicionamiento de la carga, aceleraciones bruscas y frenados súbitos.
- Impactos en guías y agujeros, temperatura ambiente, entre otros.

La Tabla N° 2, presenta la vida útil de los neumáticos de automóviles, de carga industriales, aviones y de carretera.

Tabla N° 2. Vida Útil de los Neumáticos

Fuente: (Ferreira, 2011)

Tipo de Neumático	Vida Útil (1)
Tractor	10 a 12 años (1)
Transbordo Canavieiro	4 a 5 años (2)
Carretillas Elevadoras	4.000 a 5.000 horas
Automóviles	hasta 80.000 km (3)
Camiones y Ómnibus	hasta 200.000 km (4)
Motos	30.000 km
Aviones	200 despegues (5)
Agrícolas	8.000 a 10.000 horas

(1) Consideraciones 1ra vida del neumático, con el uso del neumático bajo condiciones normales y debidamente controlado.

(2) Existe una gran diversidad de neumáticos fuera de carretera "Off the Road - OTR", la vida útil depende del tamaño del neumático y la severidad del servicio prestado.

(3) Los neumáticos de automóviles pueden ser reformados una sola vez.

(4) Los neumáticos de carga (autobuses y camiones) pueden ser reformados de dos a tres veces.

(5) Depende de la frecuencia de uso de los aviones y del número de escalas, entre otros.

El ciclo de vida del neumático se compone de cinco etapas: extracción, producción, consumo, recolección de los neumáticos inservibles y gestión del destino final del residuo. (Van Beukering & Janssen, 2001)

En la etapa de extracción se produce la generación de los componentes básicos de un neumático. Estos consisten en caucho natural y sintético, acero, aditivos químicos y textiles, los cuales varían en proporción según el tipo de neumático. En general, los neumáticos para camiones tienen un mayor contenido de caucho natural que el de los automóviles de pasajeros. Para entender la etapa de fabricación, uno debe ser consciente de la composición del neumático. El neumático consiste aproximadamente en la pieza de fundición o la carcasa que forma el esqueleto del neumático y la banda de rodadura que consiste principalmente en caucho y, por lo tanto, en la mayoría de los casos se puede renovar. Como se muestra en la Figura N° 2, el neumático se puede producir de tres maneras: como neumáticos nuevos, como neumáticos recauchutados y como neumáticos reutilizados.

Figura N° 2. Ciclo de vida del neumático

Fuente: (Van Beukering & Janssen, 2001) – Adaptado por el autor

La fase de consumo puede ocurrir por la adquisición de neumáticos nuevos, reencauchados o reutilizados. Los neumáticos nuevos necesitan un alto consumo de energía, recursos y mano de obra. El reencauchado es un método simple y económico, que consiste únicamente en la sustitución de la parte de goma gastada en la banda de rodaje, utilizando únicamente el 20% de los recursos necesarios para la fabricación de un

neumático nuevo. La reutilización es un proceso de prolongación de la vida útil del neumático, aplicado normalmente para neumáticos de camiones, debido a que la estructura del neumático es más apropiada.

La recolección de neumáticos es una etapa separada de la vida útil del producto y se realiza junto con la gestión del destino final. En muchos países, después del descarte, los neumáticos son llevados a centros de recolección, donde se analizarán alternativas para el uso del material. Los destinos son el reencauchado, las fuentes de energía, el reciclado de materias primas, entre otros. La Figura N° 2 presenta las etapas generales del ciclo de vida del neumático.

2.1.5. Tratamientos y Tecnologías de Reciclaje

Los tratamientos que se utilizan para reciclar los neumáticos inservibles comprenden desde equipos mecánicos de corte simple hasta procesos químicos, mecano-químicos y térmicos multifásicos sofisticados y complejos. Estos tienen como objetivo aprovechar y mejorar las propiedades de los componentes del neumático. Existen cuatro niveles de tratamiento que se pueden describir de acuerdo a sus funciones. (Shulman, 2004, págs. 10-14)

Nivel 1: Destrucción de la estructura del neumático. Utilización de procesos mecánicos simples por métodos de corte, compresión y eliminación de cuentas que logran destruir las propiedades físicas del neumático, como su forma, rigidez, capacidad de soportar el peso, entre otros. Los procedimientos más comunes en esta fase son las de separación de la banda de rodamiento, pestaña y el perfil del neumático, donde predomina el caucho y es el principal material obtenido. Otro producto adquirido es por el resultado de comprimir los neumáticos con grandes tensiones y cortarlo, en la cual la cantidad de neumáticos y la presión utilizada dependerán del resultado final que se desee. La mayoría de los materiales resultantes se utilizan directamente para aplicaciones en la ingeniería civil, mientras que el resto se utiliza como materia prima en los próximos tratamientos.

Nivel 2: Separación y liberación de los elementos del neumático. Tratamiento por el cual se procesa el neumático para segregar sus elementos principales (textiles, metales, caucho). Usualmente el producto resultante del nivel 1 es utilizado como materia prima en este nivel. Las tecnologías más comunes son las de reducción de tamaño criogénico y ambiental, las cuales se define a continuación:

La molienda ambiental es una tecnología de varios pasos, donde el procesamiento toma lugar a temperatura ambiente normal o mayor. De manera secuencial se separa el caucho, metal y textiles. En caso los alambres de pestaña y refuerzo no hayan sido eliminados antes del proceso, estos se separarán magnéticamente durante la granulación y posterior tamización donde los separadores de aire se encargan de eliminar los residuos textiles.

El procesamiento criogénico generalmente usa neumáticos pretratados como materia prima, usualmente en forma de virutas o granulado, las cuales son producidas por la molienda ambiental. Este procesamiento tiene lugar a bajas temperaturas con ayuda de nitrógeno líquido u otros refrigerantes comerciales con la intención de debilitar el caucho. Consta de cuatro fases que comprende el tamaño inicial, enfriamiento, separación y fresado. La materia prima ingresa a una cámara de congelación donde se utiliza un refrigerante para enfriarlo hasta un rango de -80°C a -120°C , donde el caucho deja de comportarse como un material flexible. Esta fase debilita al caucho otorgándole mayor trabajabilidad para poder fracturarlo al tamaño deseado. El resultado es pasado por tamices y pantallas magnéticas para eliminar las últimas impurezas.

Nivel 3: Tecnologías y tratamientos multifásicos. La modificación de la superficie, la recuperación, la pirolisis y la desvulcanización son los tratamientos y tecnologías que destacan en este nivel. Se utiliza como materia prima el caucho resultante del Nivel 2.

Nivel 4: Tratamiento para el mejoramiento de materiales. La materia prima utilizada en este nivel son las liberadas por el Nivel 3. Esta se refina y mejora aún más que en el nivel anterior por medio de tecnologías que mejoran las características y propiedades seleccionadas. La elaboración de elastómeros termoplásticos, productos de carbono mejorados y recuperación mejorada son los ejemplos más predominantes.

2.1.6. Legislación en el Perú

Los neumáticos son considerados como residuos sólidos, por lo cual se empezará a analizar la problemática de este residuo de manera general. En el Perú la normatividad respecto a los residuos sólidos está dada por la (Ley N° 27314 - Ley General de Residuos Sólidos, 2000), en el Art. N°5 de la presente ley se realiza una clasificación de los residuos sólidos, clasificándolos en residuos urbanos e industriales. Asimismo, no existe una

recolección selectiva, por lo que en un mismo vehículo se recaudan las variedades de residuos sólidos. En cuanto a la disposición final de estos, solo en la ciudad de Lima y Cajamarca se poseen rellenos sanitarios, mientras que en las ciudades restantes predominan los botadores improvisados a cielo abierto, que constituyen un punto crítico para el medio ambiente.

Hasta la actualidad, no se dispone de un marco normativo específico y/o adecuado para enfrentar el problema del tratamiento de los neumáticos fuera de uso. Por ende, se hace necesario que esta situación sea atendida por las entidades responsables, como el Ministerio de Salud, Ministerio del Ambiente, las autoridades locales y regionales, entre otros, con la finalidad de desarrollar una normatividad adecuada que se oriente a resolver esta problemática.

2.2. Suelos

2.2.1. Definición

Villalaz (2004) denominó suelo a “la parte superficial de la corteza terrestre que se encuentra biológicamente activa, el cual llegó a tal estado por un proceso de desintegración mecánica y descomposición química” (p.18).

El término “suelo” posee diferentes tipos de interpretación en cuanto a su definición, ya sea que dicha interpretación provenga de un agrónomo, geólogo o de un ingeniero civil. En el presente proyecto de investigación consideraremos como definición la brindada por el Ingeniero civil Carlos Crespo Villalaz: “Suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella asientan.” (p.18).

Los suelos son materiales complejos que exhiben un rango amplio de comportamientos mecánicos que dependen de la composición y estructura del suelo, del historial de tensiones, de la densidad y de las características de la fuerza aplicada. Esta variedad de comportamientos del suelo nos obliga a clasificar los suelos en dos grupos: cohesivos y no cohesivos (o granulares).

2.2.2. Suelos Granulares

Están divididos en gravas y arenas, los cuales (Villalaz, 2004, págs. 21-22) los ha definido de la siguiente manera:

Gravas: Son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen, cuando son acarreadas por las aguas, las gravas sufren desgaste en sus aristas y por lo tanto son redondas. Como material suelto suelen encontrarse en los lechos de los ríos. Sus partículas varían desde 7.62 cm (3") hasta 2.0 mm.

Arenas: Es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial y cuyas partículas varían entre 2.0 mm y 0.05 mm de diámetro. Su origen y existencia es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla. Las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se le aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.

2.2.3. Suelos Cohesivos

Están divididos en arcillas y limos, los cuales (Villalaz, 2004, pág. 22) los ha definido de la siguiente manera:

Arcillas: Se da el nombre de arcilla a partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en no pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos materiales es, generalmente, cristalina y complicada y sus átomos están dispuestos en forma laminar.

Limos: Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas.

Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.

2.2.4. Propiedades Físicas y Mecánicas

Para comprender este proyecto realizado, se deben tener claras algunas características que adoptan los diferentes tipos de suelos y así poder conocer su comportamiento, las cuáles nos enseña Villalaz (2004).

- Gravedad específica: Se denomina así al peso de dicho suelo contenido en la unidad de volumen y generalmente se expresa en kg/cm^3 . Se denomina peso volumétrico seco y suelto de un suelo al peso volumétrico aparente de él, tomando el peso del mismo previamente cuarteado y secado en un horno a peso constante. El peso volumétrico aparente se refiere al considerar el volumen de los vacíos formando parte del suelo. Para determinar la gravedad específica seca y suelto se coloca el material (que ha sido cuarteado y secado) dentro de un recipiente de volumen conocido, llenándolo y enrasándolo, sin apretarlo, con una regla. Inmediatamente, se pesa y restando el peso del recipiente se obtiene el peso del material, que dividido entre el volumen del recipiente proporcionará el dato de peso volumétrico seco y suelto del suelo (p.41).
- Densidad: Existen 3 tipos de densidad a tener presente. Primero la densidad absoluta de un cuerpo que es la masa de dicho cuerpo contenida en la unidad de volumen, extrayendo los vacíos presentes en la muestra. Segundo, la densidad aparente que es la masa de un cuerpo contenida en la unidad de volumen, incluyendo sus vacíos presentes. Tercero, la densidad relativa de un sólido que es la relación de su densidad a la densidad absoluta del agua destilada a una temperatura de 4°C (p.41-42).

- **Textura:** Es la distribución o diferentes proporciones en que están presentes los diferentes tamaños de las partículas sólidas que lo constituyen. Así se suelen distinguir los materiales gruesos (rocas, retenidos en la malla N°4), materiales medios (arenas, pasantes de la malla N°4 hasta la malla N°200) y materiales finos (arcillas y limos, pasantes de la malla N°200). Se puede apreciar todas las medidas en la siguiente Figura N° 3.

	Fragmentos rocosos	Arena	Limo	Arcilla
diámetro	> 2 mm (piedras y gravas).	0,05 - 2 mm.	0,002 - 0,5 mm.	<0,002 mm.
<p>textura pedregosa, arenosa, arcillosa</p>				

Figura N° 3. Distribución de tamaños de materiales

Fuente: (Cienciasfera, s.f.)

- **Estructura:** Es la agrupación de las partículas en fragmentos mayores, unidos por los coloides del suelo. Hay varios tipos de estructura según la forma de estos bloques (granular, prismática, laminar).
- **Porosidad:** Es el volumen de todos los espacios abiertos que hay entre los granos sólidos del suelo. La porosidad es importante ya que define el volumen de agua que puede ser retenida y dando así volumen al suelo.
- **Permeabilidad:** Es la propiedad del sistema poroso del suelo que permite que fluyan los líquidos. Normalmente, el tamaño de los poros y su conectividad determinan si el suelo posee una alta o baja permeabilidad. El agua podrá fluir fácilmente a través de un suelo de poros grandes con una buena conectividad entre ellos. Los poros pequeños con el mismo grado de conectividad tendrían una baja permeabilidad, ya que el agua fluiría a través del suelo de forma más lenta y este es el caso de los suelos arcillosos. En la siguiente Figura N° 4 se aprecia la relación y diferencia entre porosidad y permeabilidad de los suelos.

Porosidad: El volumen ofrecido por los poros es igual en el suelo A que en el B. Los poros de A son más grandes pero hay menor número, mientras que en B los poros son más pequeños pero más numerosos.

Permeabilidad: El suelo A presenta una permeabilidad más baja ya que el agua fluye por él más lento al ser los poros de menor tamaño. Además, el agua se adhiere a la superficie de los granos dificultando su movilidad. En el suelo B la superficie ofrecida por los clastos es menor y los poros son de mayor tamaño.

Figura N° 4. Porosidad y permeabilidad

Fuente: (Cienciasfera, s.f.)

2.3. Compactación de Suelos

2.3.1. Influencia en diferentes tipos de suelos

Tiene influencia la granulometría del suelo, la forma de sus partículas, el contenido de finos, la cantidad y el tipo de minerales arcillosos, la gravedad específica, entre otros. De acuerdo a la naturaleza del suelo, se aplicarán técnicas adecuadas en el proceso de compactación. En el laboratorio, un suelo grueso alcanzará densidades secas altas para contenidos óptimos de humedad bajos, en cambio los suelos finos presentan valores bajos de densidades secas máximas y altos contenidos óptimos de humedad.

La compactación en diferentes tipos de suelos es explicado a continuación por (Terzagui & Peck, 1986):

Compactación en suelos Cohesivos:

- La compactación se produce por la reorientación y por la distorsión de los granos y sus capas absorbidas. Esto se logra por una fuerza que sea lo suficientemente grande para vencer la resistencia de cohesión por las fuerzas entre las partículas.

Compactación en Suelos No Cohesivos:

- En el caso de suelos granulares el proceso de compactación más adecuado resulta el de la vibración, pero debe tenerse en cuenta, como ya se sabe, que el comportamiento de los suelos gruesos depende mucho de la granulometría. Se requiere una fuerza moderada aplicada en una amplia área, o choque y vibración. La compactación eficiente en los suelos cohesivos requiere presiones más altas para los suelos secos que para los húmedos, pero el tamaño del área cargada no es crítico. La eficiencia se mejora aumentando la presión durante la compactación a medida que el peso específico y la resistencia aumentan.

2.3.2. Influencia de la energía de compactación

La energía específica es explicada por (Montenegro, 2011), la cual es la presión aplicada al suelo por unidad de volumen, durante cualquier proceso de compactación. En laboratorio, la compactación por impacto queda definida por:

$$Ec = \frac{NnWh}{V}$$

Donde:

- Ec: Energía de Compactación
- N: Número de golpes del pisón por capas
- n: Número de capas
- W: Peso del pisón compactador
- h: Altura de caída del pisón
- V: Volumen total del molde de compactación.

Para el ensayo proctor modificado se tiene por lo general una $E_c = 27.2 \text{ kg-cm/cm}$ y para un ensayo proctor estándar una $E_c = 6.1 \text{ kg-cm/cm}$.

El empleo de una mayor energía de compactación permite alcanzar densidades secas mayores y óptimos contenidos de humedad menores, tal como se puede apreciar en la Figura N° 5.

Figura N° 5. Energía de compasión en ensayo Proctor

Fuente: (Montenegro, 2011)

2.3.3. Influencia de la compactación en la resistencia al corte

Los suelos compactados son suelos remoldeados que han perdido su estructura original. La compactación, como proceso mecánico, reduce los vacíos de ese suelo remoldeado pero no restituye la estructura. Para suelos remoldeados, una menor relación de vacíos está siempre asociada a un mayor ángulo de fricción interna y, por lo tanto, una mayor resistencia al corte, tanto drenada como no drenada. La evidencia experimental es que la envolvente de resistencia intrínseca de los suelos compactados es curva. Como el material está remoldeado, la cohesión efectiva es siempre cero y por lo tanto el ángulo de fricción interna depende de la presión de ensayo, o sea:

$$s = \sigma \times \tan (\phi[p])$$

En la práctica, la envolvente de resistencia intrínseca se reemplaza por la recta correspondiente al criterio de rotura de Mohr – Coulomb, o sea:

$$s = c + \sigma \tan (\phi)$$

Donde:

s	=	Resistencia al corte
σ	=	Esfuerzo normal total
c	=	Cohesión
p	=	Presión de ensayo
ϕ	=	Ángulo de fricción interna del material

Por lo que aparece el término de cohesión.

En términos de tensiones totales, el grado de saturación de una muestra compactada ensayada con la humedad de compactación influye en su resistencia.

En el caso de ensayos triaxiales no drenados con muestras ensayadas con su humedad de compactación, al aumentar la humedad de compactación disminuye la resistencia. Si las muestras se saturan, su resistencia depende únicamente del peso unitario, pero la forma de la curva depende de la humedad de compactación. En resumen, a mayores humedades la rigidez disminuye como se puede apreciar en la Figura N° 6.

Figura N° 6. Alta humedad del ensayo disminuye la rigidez

Fuente: (Sagüés, 2007)

La diferencia en la resistencia es causada por el ordenamiento de la estructura al compactar con humedades mayores que la óptima que genera mayores presiones neutras.

Cuando se ejecutan ensayos drenados de muestras compactadas al mismo peso unitario con diferentes humedades y energías de compactación, la resistencia aumenta con el aumento de la humedad de compactación. (Sagüés, 2007)

2.4. Resistencia y Deformación de los Suelos

2.4.1. Resistencia al Corte

Al momento de modificar el estado de tensión de los suelos se producen deformaciones que pueden originar su rotura, siendo el esfuerzo cortante, es decir, la tensión tangencial, la forma más habitual en la que estos fallen.

Se define como resistencia al corte (τ) de una masa de suelo como el valor límite o máximo que se puede inducir antes de que esta ceda. Este no puede considerarse como un parámetro único y constante, ya que según (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 74) depende de su naturaleza, estructura, enlaces, niveles de deformaciones, y especialmente de su estado tensional y presión del fluido que rellena sus poros.

2.4.2. Criterio de Rotura de Coulomb

Coulomb propuso un criterio de rotura de suelos (1776), el cual es el más difundido a la actualidad, en donde se relacionan los esfuerzos efectivos normales y los esfuerzos tangenciales. Un ejemplo didáctico, brindado por (Budhu, 2011), explica que si un bloque de madera se empuja horizontalmente sobre una mesa (Figura N° 7), la fuerza horizontal (H) requerida para iniciar el movimiento, de acuerdo con la ley de fricción de Coulomb, es:

$$H = \mu W$$

Donde μ es el coeficiente de fricción de deslizamiento estático entre el bloque y la mesa y W es el peso del bloque. El ángulo entre la fuerza resultante y la fuerza normal se denomina ángulo de fricción, $\phi = \tan^{-1}(\mu)$

Figura N° 7. Modelo del criterio de rotura propuesto por Coulomb.

Fuente: (Budhu, 2011)

Los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Coulomb que se muestra a continuación:

$$\tau = C + (\sigma - \mu) \times \tan(\phi) \text{ Para suelos saturados}$$

$$\tau = C + (\sigma - \mu) \times \tan(\phi) + (\mu - \mu_a) \times \tan(\phi) \text{ Para suelos parcialmente saturados,}$$

donde:

τ	=	Esfuerzo de resistencia al corte
C	=	Cohesión efectiva
σ	=	Esfuerzo normal total
μ	=	Presión del agua intersticial o de poros
μ_a	=	Presión del aire intersticial
Φ	=	Ángulo de fricción interna del material

La ecuación de Coulomb representa una recta en el espacio (σ', τ) , la cual se denomina envolvente de rotura del suelo o línea de resistencia intrínseca, mostrada en la Figura N° 8. Esta proporciona para cada valor del esfuerzo efectivo normal a un plano que atraviesa un elemento del suelo, la máxima tensión tangencial movilizable a favor de dicho plano.

Figura N° 8. Envolvente de rotura del suelo o envolvente de falla.

Fuente: (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002) - Adaptación Propia.

Asimismo, de la presente Figura 2.8, se pueden deducir 3 aspectos importantes:

- La cohesión efectiva es la ordenada en el origen de la envolvente de rotura. Esta representa la resistencia tangencial máxima movilizable en un plano cualquiera cuando el esfuerzo efectivo normal en tal plano es nulo.
- La máxima tensión tangencial movilizable en un plano es mayor a medida que aumenta la tensión efectiva normal que actúa sobre dicho plano. Es decir, el suelo es más resistente cuanto mayor es su nivel de tensiones efectivas.
- La línea de resistencia (estado de rotura) definida actúa como una envolvente o superficie de estado, separando estados posibles de imposibles. Siendo el estado posible una combinación de cohesión y ángulo de fricción que cuenta con un cierto factor de seguridad ya que, para una determinada tensión efectiva normal, la tensión tangencial es inferior a la máxima movilizable, mientras que el estado imposible significa que se ha sobrepasado la combinación máxima del criterio de rotura, y por lo tanto no es compatible con la resistencia del suelo.

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere predefinir los parámetros, ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo.

La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo dependiendo de las presiones internas o de poros de acuerdo a la ecuación de Coulomb, en la cual el factor μ está restando al valor de la presión normal. La presión resultante se le conoce con el nombre de presión efectiva σ' .

$$\sigma' \text{ (Presión efectiva)} = \sigma - \mu$$

2.4.2.1. Ángulo de Fricción Interna

El ángulo de fricción Interna es la representación matemática del coeficiente de rozamiento en el plano de falla, siendo:

$$\text{Coeficiente de rozamiento} = \tan \Phi$$

El ángulo de fricción depende de varios factores entre los más importantes se encuentran:

- Tamaño de los granos
- Forma de los granos
- Distribución de los tamaños de granos
- Densidad

2.4.2.2. Cohesión

La cohesión es una medida de adherencia entre las partículas de suelo de grano fino. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la adherencia.

En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de adherencia o material que pueda producir esta, la cohesión se supone igual a 0, y a estos suelos se les denomina Suelos no Cohesivos.

2.4.3. Criterio de Rotura de Mohr – Coulomb

La teoría de Coulomb supone que el esfuerzo de corte límite es función del esfuerzo normal que actúa en el plano de falla y que, además, existe una variación lineal entre esos dos tipos de esfuerzos. Esta teoría se complementó con la propuesta por Mohr, la cual elimina la hipótesis de variación lineal entre los esfuerzos normal y tangencial límites en el plano de rotura. De hecho, según la teoría de Mohr la variación puede representarse por medio de una curva (envolvente de Mohr), teoría que explica satisfactoriamente el comportamiento de materiales frágiles como rocas, suelos y hormigón.

El criterio de rotura de Mohr – Coulomb establece que en un punto cualquiera de un cuerpo continuo se produce la rotura cuando en algún plano que pase por dicho punto existe la combinación de tensiones definida por la envolvente de Mohr. En otras palabras, la relación de Mohr – Coulomb representa la relación que existe entre los esfuerzos principales en el momento de la rotura.

Como en cualquier material, el esfuerzo normal en un punto de una masa de suelo es función de la orientación del plano utilizado para definir dicho esfuerzo. Se sabe que por cualquier punto sometido a esfuerzos siempre es posible encontrar tres planos ortogonales entre sí, en los que los esfuerzos tangenciales o de corte son nulos. Estos planos se denominan planos principales.

Los esfuerzos normales a los planos principales se denominan esfuerzos principales. El esfuerzo principal mayor se designa por σ_1 , el esfuerzo principal intermedio por σ_2 y el esfuerzo principal menor por σ_3 .

Luego:

$K < 1$ Entonces: $\sigma_v = \sigma_1$; $\sigma_h = \sigma_3$; $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_h$

$K > 1$ Entonces: $\sigma_h = \sigma_1$; $\sigma_v = \sigma_3$; $\sigma_2 = \sigma_1 = \sigma_h$

$K = 1$ Entonces: $\sigma_v = \sigma_h = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ -> Estado de esfuerzos isotrópico

Se puede definir que el primer caso se trata de un suelo normalmente consolidado, puesto que el esfuerzo vertical es mayor que el horizontal; mientras que el segundo, de un suelo preconsolidado, donde el esfuerzo vertical es menor que el horizontal, producto de la

“memoria” que tiene el suelo. Estos son conceptos que se tratarán más adelante. De este modo, los análisis en mecánica de suelos se pueden llevar a cabo considerando sólo dos direcciones, la de los planos principales mayor y menor.

Mohr propuso que, si se conocen las tensiones principales y sus direcciones, siempre es posible determinar la tensión normal y tangencial en cualquier otra dirección. De este modo, conocidos σ_1 y σ_3 se puede determinar σ_θ y τ_θ ("θ" corresponde al ángulo que forma el plano de rotura con el plano principal mayor medido en el sentido inverso de los punteros del reloj) en el momento de la falla por corte de un suelo.

Analizando el círculo de Mohr en dos dimensiones, como muestra la Figura N° 9, se tiene que:

Figura N° 9. Círculo de Mohr

Fuente: (Espinace & Sanhueza, 2004)

Del cual se pueden determinar analíticamente los valores para $(\sigma_\theta; \tau_\theta)$:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \cos(2\theta)$$

$$\tau_\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \text{sen}(2\theta)$$

Donde:

- σ_θ : Esfuerzo normal en el momento de la rotura por corte del suelo
- τ_θ : Esfuerzo tangencial en el momento de la rotura por corte del suelo
- θ : Inclinación del plano de falla
- σ_1 y σ_3 : Esfuerzos principales mayor y menor, respectivamente.
- $(\sigma_1 - \sigma_3)$: Desviador de esfuerzo

Al relacionar en una misma gráfica σ v/s τ la recta de Coulomb y el círculo de Mohr, se puede establecer analíticamente la relación de Mohr – Coulomb, de la cual se desprende otra importante ley de Mecánica de Suelos (Figura N° 10).

Figura N° 10. Relación Mohr-Coulomb

Fuente: (Espinace & Sanhueza, 2004)

$$\sigma_1 = \sigma_3 \times tg^2(\theta) + 2 \times c \times tg(\theta)$$

Esta ecuación se deduce a partir de:

$$\text{Sea: } \theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}, \text{ en la falla.}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2 \times r \text{ ----- (1)}$$

$$\text{sen} \phi = \frac{r}{\left(\frac{c}{\text{tg} \phi + \sigma_3 + r} \right)}$$

$$r = \frac{c \times \cos \phi}{1 - \text{sen} \phi} + \frac{\sigma_3 \times \text{sen} \phi}{1 - \text{sen} \phi}$$

$$\text{Reemplazando en (1) } \rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 + 2r = \sigma_3 + 2 \times \frac{c \times \cos \phi}{1 - \text{sen} \phi} + \frac{\sigma_3 \times \text{sen} \phi}{1 - \text{sen} \phi}$$

Estableciendo proporciones geométricas y operando, se obtiene la ecuación de Mohr-Coulomb:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \times tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + 2 \times c \times tg \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

2.5. Ensayos de Laboratorio

2.5.1. Granulometría

La granulometría es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto.

2.5.2. Límites de Atterberg

La granulometría nos muestra una primera aproximación a la identificación del suelo, pero en casos como el de la arena limo-arcillosa no queda muy claro, por lo cual se utilizan unos índices derivados de la agronomía. Estos precisan la consistencia del suelo en función del cálculo de la humedad ($W\%$), la cual se expresa en porcentaje y se halla con la siguiente ecuación:

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde:

$W(\%)$ = contenido de humedad.

W_w = peso del agua contenido en el suelo.

W_s = peso del suelo seco.

Atterberg, respecto a esto, definió tres límites. El primero denominado de retracción o consistencia que separa el estado de solido seco y el semisólido. El segundo el limite plástico (LP) que separa el estado semisólido del plástico y el tercero, el limite líquido (LL) que separa el estado plástico del semilíquido; estos dos últimos límites, los cuales

en la práctica son los más usados, se determinan con la fracción de suelo que pasa por el tamiz N° 40 A.S.T.M (0,1 mm).

El límite líquido (LL) se determina amasando bien el suelo seco (previamente disgregado con maza) con bastante agua y extendiendo la masa sobre un molde denominado Cuchara de Casagrande. Se abre, en el centro de la masa extendida, un surco con un acanalador, formando un canal de unos 2 mm de ancho en su parte baja. El molde se coloca sobre una base y se somete a golpes controlados. El límite líquido es la humedad de la muestra cuando al dar 25 golpes se cierra el canal unos 12 mm. Como es difícil conseguir esta condición, se determina la humedad por interpolación, a partir de dos muestras, en las que debe conseguirse el cierre de 12 mm con más o menos golpes que 25.

El límite plástico (LP) se determina amasando el suelo seco con poca agua y formando elipsoides, arrollándolos con la palma de la mano sobre una superficie lisa, hasta llegar a un diámetro de unos 3 mm y una longitud de 25-30 mm. Si, en ese momento, los elipsoides se cuarteán en fracciones de unos 6 mm, su humedad es la del límite plástico (que se determina secando en estufa varios elipsoides en análogas condiciones). Si no se cuarteán se vuelven a formar elipsoides para que pierdan humedad y lleguen a cuartearse.

Obtenidos los datos del límite líquido (LL) y límite plástico (LP), se pueden obtener un punto representativo de cada muestra de suelo en la carta de plasticidad de Casagrande (Figura 2.6), representando la relación del límite líquido con el índice de plasticidad ($IP = LL - LP$), la cual representa el intervalo de humedades para pasar del estado semisólido al semilíquido).

Asimismo, Casagrande definió que los suelos de alta plasticidad, es decir, los que admiten mucha agua y pueden experimentar deformaciones plásticas importantes son aquellos que contienen un límite líquido mayor al 50% ($LL > 50\%$). Por otro lado, el suelo es considerado de baja plasticidad si se obtiene un valor por debajo de este.

Utilizando la línea A, la cual resulta paralela a la dirección en la que se ordenan las muestras de un mismo terreno, y el criterio de baja y alta plasticidad, en la carta de Casagrande se definen varias zonas, representadas en la Figura N° 11; según los estudios del citado autor los suelos limosos y con apreciable contenido orgánico tienen un intervalo

de humedad menor para pasar del estado semisólido a semilíquido, situándose por debajo de la línea A, mientras que las arcillas están por encima de dicha línea.

Figura N° 11. Carta de Plasticidad de Casagrande.

Fuente: (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

En la práctica se representa el punto correspondiente a los valores determinados de LL e IP y se obtiene una clasificación que sirve para completar la identificación de un suelo, con lo que se puede conocer el predominio de la fracción arcillosa o limosa.

Casagrande completo este sistema de identificación con datos de granulometría y definió el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), muy usado en la práctica, representado en la Tabla N° 3.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR			SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ☉	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS LIMPÍAS Poco o nada de partículas finas	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos
			GRAVAS LIMPÍAS Poco o nada de partículas finas	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos
			GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* GM d u	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
			GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4	PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	ARENAS LIMPÍAS Poco o nada de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.
			ARENAS LIMPÍAS Poco o nada de partículas finas	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.
			ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* SM d u	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
			ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.
			DETERMINENSE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5% GW, GP, SW, SP, más del 12% GM, GC, SM, SC. Entre 5% y 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles **		
			COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$		
			NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.		
			LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.		
			LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.		
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ☉	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50		ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad
			CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
			OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	
	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50		MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.	
			CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.	
			OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.	
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.	
	CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)				

Tabla N° 3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Fuente: (Lambe, Whitman, & Jiménez, 2004)

2.5.3. Peso Específico de las partículas

Es un ensayo donde se divide el peso de los sólidos entre el volumen absoluto ocupado por las partículas sólidas sin tomar en cuenta el aire y agua contenida

Para determinar este parámetro se utiliza un procedimiento donde se igualan los volúmenes de agua y de suelo, mediante un matraz de volumen definido, quedando la ecuación expresada en función de los pesos, de la siguiente forma.

$$\gamma_s = \frac{W_s'}{V_s} = \frac{W_s \times \gamma_w}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}}$$

Donde:

γ_s = Peso Específico

W_s' = Peso de partículas solidas

V_s = Volumen de las partículas solidas

γ_w = Peso específico del agua

W_{FW} = Peso del Picnómetro + agua

W_{FSW} = Peso del picnómetro + suelo + agua

Suele alcanzar un rango de valores que va de 2.30 a 2,90 [g/cm³]. Sin embargo, en suelos volcánicos, con abundante hierro, puede llegar a tener valores de hasta 3.00 [g/cm³] y para turbas se han determinado valores de 1.5 [g/cm³]

2.5.4. Ensayo de Compactación Proctor Estándar

La compactación es el proceso realizado generalmente por medios mecánicos, por el cual se produce una densificación del suelo, disminuyendo su relación de vacíos. El objetivo de la compactación es el mejoramiento de las propiedades geotécnicas del suelo, de tal manera que presente un comportamiento mecánico adecuado. Su finalidad es determinar la densidad seca máxima de un suelo y la humedad óptima necesaria para alcanzar esta densidad. Para ello se utiliza un molde cilíndrico de 1 litro de capacidad que se rellena con 3 capas de material debidamente compactadas mediante una maza estandarizada de 2,5 kg que se deja caer libremente una altura de 305 mm. El material a ensayar previamente se ha desecado y tamizado por el tamiz 20 mm UNE o el correspondiente

ASTM y posteriormente humedecido con distintos valores de humedad, una por cada muestra necesaria. Para la compactación de cada capa de material se emplean 25 golpes de la maza distribuidos homogéneamente sobre la superficie del terreno. Las tres capas deben tener aproximadamente la misma altura de tierras. Una vez compactado el material, se enraza el molde y se mide la densidad y humedad de una muestra tomada del centro del molde. Este proceso se repite con distintos contenidos de humedad y se finaliza el ensayo cuando se obtienen 4 a más puntos que definen una curva que relaciona la densidad seca con la humedad. (Montenegro, 2011)

2.5.5. Ensayo de Corte Directo

2.5.5.1. Generalidades

El ensayo más común para obtener la resistencia de los suelos en los estudios de deslizamientos es el ensayo de corte directo, el cual es simple y económico de realizar, aunque ha sido sustituido en gran parte por el ensayo de compresión triaxial.

El equipo del ensayo de corte directo se representa esquemáticamente en la Figura N° 12. Se trata de una caja rígida de acero de sección cuadrada o circular, que se encuentra dividida en dos mitades en cuyo interior se ubica la muestra de suelo y a su vez se colocan 2 placas porosas en sus caras libres. Encima de la roca porosa superior se coloca una placa rígida sobre la que se aplica una carga vertical “N”. La aplicación de la fuerza cortante en el suelo se logra trasladando la mitad superior de la caja de corte mientras que en la mitad inferior se impide el movimiento.

Una prueba completa sobre un determinado suelo consiste en ensayar tres muestras idénticas del mismo material bajo tres cargas axiales diferentes (N_1 , N_2 , N_3).

Figura N° 12. Diagrama de un arreglo de prueba de Corte Directo

Fuente: (Das & Cervantes, 2015)

2.5.5.2. Tipo de Ensayos

A) Ensayo No consolidado – No drenado (UU)

El corte se inicia antes de consolidar la muestra bajo la carga normal. Si el suelo es cohesivo y saturado se desarrollará exceso de presión de poros.

B) Ensayo Consolidado – Drenado (CD)

Se aplica la fuerza normal lentamente para que se genere el corte y a su vez se vaya desarrollado todo el asentamiento. La fuerza cortante se genera tan lento como sea posible para evitar el desarrollo de presiones de poros en la muestra.

C) Ensayo Consolidado-no drenado (CU)

Se aplica la fuerza normal y se observa el movimiento vertical del deformímetro hasta que se equilibre la deformación vertical (consolidación) antes de aplicar la fuerza córtate. Luego, la fuerza cortante es aplicada de forma rápida sin permitir la disipación del exceso de presión de poros generada en esta etapa.

Para muestras de suelos no cohesivos, estos tres ensayos dan el mismo resultado, esté la muestra saturada o no, ya que la aplicación del corte se hace de manera lenta.

2.5.5.3. Equipo

A) Dispositivo de corte

Es un elemento que fija a la muestra entre dos piedras porosas de tal manera que no se le aplique un torque. Este deberá suministrar medios para aplicar un esfuerzo normal a las caras, así como para medir el cambio de su espesor. Debe permitir el drenaje del agua a través de las piedras porosas en la parte superior e inferior del espécimen, y para sumergir al espécimen en agua. El dispositivo deberá ser capaz de aplicar una fuerza tangencial al espécimen con agua. Asimismo, deberá ser capaz de aplicar una fuerza tangencial al espécimen a lo largo de un plano de corte predeterminado (corte simple) paralelo a las caras de este. Los marcos que sujetan al espécimen deberán ser lo suficientemente rígidos para prevenir su distorsión durante el corte.

B) Caja de corte

Es una caja de corte de forma circular o cuadrada de acero inoxidable que permite el drenaje a través de la parte inferior y superior (Figura N° 13). Se encuentra dividida verticalmente por un plano horizontal en dos partes, que se están sujetas a través de tornillos alineados. Asimismo, esta caja también está sujeta con tornillos ranurados, que controlan el espacio entre cada una de las mitades.

Figura N° 13. Colocación de la muestra de suelo en la caja de corte

Fuente: (Chillihuani, 2017)

C) Dispositivo para medir la fuerza de corte

Un anillo de carga o una celda de carga con una precisión de 0.5 lbs (2.5 N), o de 1 por ciento de la fuerza de corte en la falla, cualquiera que sea mayor.

D) Base de la caja de corte

Es una base metálica que soporta la caja de corte que puede restringir el movimiento de la mitad de la caja o puede tener un dispositivo para alinear la mitad de la caja de corte, la cual tiene libertad de desplazarse de manera coincidente con la fuerza tangencial aplicada en un plano horizontal.

E) Indicadores de deformación

Tanto extensómetro de dial o transformadores de desplazamiento capaces de medir el cambio en el espesor del espécimen, con sensibilidad de por lo menos 0.0001 pulg. (0.0025 mm) y para medir el desplazamiento horizontal con una sensibilidad de por lo menos 0.001 pulg. (0.025 mm).

F) Piedras porosas

La función de las piedras porosas es permitir el drenaje desde el espécimen del suelo, a través de los bordes superior e inferior. La función de ellos también es transferir el esfuerzo de corte horizontal desde las piedras porosas a los bordes superior e inferior del espécimen.

G) Dispositivo para la aplicación y medición de la fuerza normal

La fuerza normal es aplicada por una palanca de yugo de carga, la cual es activada por pesos muertos o por un dispositivo de carga neumática. El dispositivo deberá ser capaz de mantener la fuerza normal dentro de ± 1 por ciento de la fuerza especificada, rápidamente sin excederla.

H) Dispositivo para el corte del espécimen

El dispositivo deberá ser capaz de cortar al espécimen a una velocidad uniforme de desplazamiento, con menos de ± 5 por ciento de desviación, y deberá permitir el ajuste de la velocidad de desplazamiento desde 0.0001 a 0.04 pulg/min. (0.0025 a 1.00 mm/min.). La velocidad para aplicar depende de las características de consolidación de los suelos. La velocidad es usualmente mantenida con un motor eléctrico y una caja de transmisión y la fuerza de corte se determina con un dispositivo indicador de carga tal como un anillo de carga o celda de carga.

2.5.5.4. Ventajas e Inconvenientes

Entre las principales ventajas se encuentra que:

- Sus principios básicos son elementales.
- El equipo es barato y sencillo
- La elaboración de la muestra simple
- Los materiales granulares gruesos se pueden ensayar en cajas de mayor dimensión

En cuanto a sus limitaciones se pueden nombrar:

- No es uniforme la distribución de esfuerzos en la superficie de corte.
- La superficie de rotura es predeterminada.
- La única manera de controlar el drenaje es variando la velocidad de desplazamiento horizontal ya que no se puede medir, en general, presiones intersticiales.
- El área de contacto se reduce a medida que se produce el desplazamiento horizontal relativo entre las mitades de las cajas.

2.5.5.5. Determinación de los Parámetros de Resistencia

Las deformaciones se van midiendo mientras la fuerza horizontal es aplicada, con las cuales se podrá graficar la tensión de corte (τ) en función de la deformación (ϵ). De esta

gráfica se puede tomar el punto máximo de tensión de corte como la resistencia al corte del suelo. Posteriormente, los valores de τ se llevan a un gráfico en función del esfuerzo normal (σ_n), obteniendo la recta intrínseca, donde los valores de τ van en el eje de ordenadas y σ_n en el eje de abscisas. El ángulo que forma esta recta con el eje horizontal corresponde a la fricción interna (ϕ) y la intersección con el eje de las ordenadas corresponderá a la cohesión (c). Este mismo proceso se realiza con otras dos muestras idénticas de suelo, pero sometidas a tensiones normales crecientes (σ_{n2}) y (σ_{n3}) (Figura N° 14).

Figura N° 14. Representación gráfica de la tensión del corte vs la deformación (Derecha). Representación gráfica de la tensión del corte vs esfuerzo normal para obtener el Angulo de fricción. (Izquierda)

Fuente: (Espinace & Sanhueza, 2004)

2.5.6. Ensayo Triaxial

2.5.6.1. Generalidades

La principal finalidad de este ensayo es obtener los parámetros C y ϕ del suelo y la relación esfuerzo-deformación a través de la determinación del esfuerzo cortante. La información que entrega este ensayo es la más representativa del esfuerzo cortante que sufre una masa de suelo al aplicarle una respectiva carga.

Este ensayo consiste en colocar una muestra cilíndrica de suelo dentro de una membrana de caucho o goma, que se introduce en una cámara especial y se le aplica una presión

igual en todo sentido y dirección hasta confinar totalmente el suelo. Alcanzando ese estado de equilibrio, se aumenta la presión vertical (σ_1), sin modificar la presión lateral aplicada (σ_3), hasta que se produzca la falla.

Esta prueba se realiza por lo menos a 3 muestras, con presiones laterales diferentes y en un gráfico esfuerzo-deformación se dibujan los círculos de Mohr que representan los esfuerzos de falla de cada muestra y luego se traza una tangente o envolvente a estos, para así obtener los parámetros ϕ y C, tal como indica (Salas, 2011, pág. 15).

2.5.6.2. Tipos de Ensayos

Según (Salas, 2011, pág. 16) los tipos de ensayos son los siguientes:

- A) Consolidado - Drenado (CD): El drenaje se permite en las dos últimas etapas y el exceso de presión de poros se disipa durante la aplicación de esfuerzo desviador.
- B) Consolidado - No Drenado (CU): Se permite el drenaje en la primera etapa hasta que la presión de confinamiento efectiva sea igual a la presión de cámara y se impide el drenaje durante la aplicación del esfuerzo desviador.
- C) No Consolidado - No Drenado (UU): No se permite el drenaje en ninguna de las dos etapas.

2.5.6.3. Equipo

Según (Salas, 2011, págs. 17-19) las herramientas a usarse en este ensayo son los siguientes:

- Panel triaxial: Es el sistema conformado por válvulas y reguladores mediante los cuales se administra el flujo de aire y agua desaireada entre los equipos para la realización del ensayo triaxial. Cada panel posee 3 válvulas de distribución, reguladores de aire y salidas de medición de presión para 3 presiones (Figura N°15).

Figura N° 15. Panel de Control

Fuente: (Salas, 2011, pág. 17)

- Equipo automático de cambio de volumen: El equipo de cambio de volumen realiza su función comprimiendo un pistón sellado contra un dispositivo de precisión en la cámara de calibración, de tal forma que un movimiento lineal del pistón es exactamente proporcional al cambio de volumen de agua que se da en la cámara de calibración. El pistón está conectado a un medio de medición externo, un transductor de desplazamiento lineal, adecuado para el sistema de adquisición de datos permitiendo que los cambios de volumen de la muestra sean desplegados y registrados directamente en centímetros cúbicos. Se presenta a continuación una tabla con las especificaciones técnicas del dispositivo en la Tabla N° 4 y una imagen del equipo en la Figura N° 16.

Tabla N° 4. Especificaciones técnicas del equipo

Fuente: (Salas, 2011, pág. 17)

Pistón	40.15 cm ²
Distancia de recorrido	25 mm
Capacidad de operación	100 cm ³
Precisión	± 0.05 cm ³
Dimensiones generales	225 x 230 x 390 mm (LxDxh)
Entrada de transductor mayor a	12 Vdc
Carrera del transductor	27 mm

Figura N° 16. Dispositivo de cambio de volumen

Fuente: (Salas, 2011, pág. 18)

- Prensa triaxial: Consiste en un marco de dos columnas con una viga transversal móvil y una base que contiene la unidad de empuje mecánico, el motor eléctrico, los componentes electrónicos y los controles. La acción de carga es realizada por un motor de alta resolución. La unidad de sincronización que maneja el motor es controlada por un microprocesador. Mediante este microprocesador es posible obtener un desplazamiento predeterminado de la unidad de carga constante durante el ensayo, cualquiera que sea la fuerza de resistencia. Se presenta a continuación una tabla con las especificaciones técnicas del dispositivo en la Tabla N° 5 y una imagen del equipo en la Figura N° 17.

Tabla N° 5. Especificaciones técnicas del equipo

Fuente: (Salas, 2011, pág. 18)

Mínima velocidad de desplazamiento (ensayo)	1×10^{-5} mm/min
Máxima velocidad de desplazamiento (ensayo)	10 mm/min
Velocidad de aproximación rápida	25 mm/min
Capacidad máxima de ensayo (Carga)	50 kN
Sistema de limitación de movimiento	2 micro interruptores más dos micro interruptores digitales
Motor	De 5 fases y 1000 impulsos (round stepper motor)
Espacio horizontal máximo	380 mm
Espacio vertical máximo	850 mm
Dimensiones generales	500 x 273 x 1266 mm (LxDxH)

Figura N° 17. Prensa Triaxial

Fuente: (Salas, 2011, pág. 18)

- Blader: Es una cámara constituida por un cilindro de bandas de plexiglass, una placa base, una placa superior y una membrana de hule que trabaja como interface aire/agua (Figura N°18). La membrana de hule está fijada a la placa base mediante un collar plástico. El blader es el encargado de transferir la presión del aire al agua, de forma inmediata, evitando que el aire comience a disolverse. La presión máxima de funcionamiento del blader es de 1000 kPa.

Figura N° 18. Blader

Fuente: (Salas, 2011, pág. 18)

- Cámara triaxial: Está conformada por una cámara de bandas de metacrilato que permiten una presión máxima de funcionamiento de 2000 KPa, una base con cinco conexiones, de las cuales dos son para presión de poros, dos para contrapresión y una para presión de cámara. A su vez cuenta con un pistón de carga instalado mediante un sistema de baja fricción. Es en la cámara triaxial en donde se somete al espécimen a las condiciones específicas de esfuerzos de los ensayos (Figura N° 19).

Figura N° 19. Cámara Triaxial

Fuente: (Salas, 2011, pág. 18)

- **Transductores:** Los transductores se encargan de transformar una señal eléctrica en una magnitud física, la cual, en este caso, es enviada al dataloger para así poder registrar tanto las presiones a las que está sometido el espécimen como las deformaciones que sufre durante el ensayo.
- **Dataloger:** Este se encarga de registrar datos en tiempo real y almacenarlos, brindando la posibilidad de transferir dichos registros a la computadora. Mediante este, también se realiza la calibración de los transductores, lo cual se lleva a cabo mediante comparación con mediciones de instrumentos de precisión.
- **Equipo secundario:** Bombas de vacío, compresor, depósito auxiliar de aire, tanque de almacenamiento de agua destilada, manómetro digital de presión, buretas de cambio de volumen.

2.5.6.4. Determinación de parámetros de resistencia

Este ensayo contiene dos etapas. En la primera etapa conocida como etapa de confinamiento, se aplica una presión hidrostática radial a la muestra (que previamente se ha envuelto en una membrana de goma fina) y esta presión es conocida como σ_3 y luego continuará constante en la siguiente etapa. Se muestra una imagen del proceso en la Figura N° 20.

Figura N° 20. Etapa de confinamiento

Fuente: (UPC, 2015)

En la segunda etapa conocida como rotura, se aplica una presión vertical que se va incrementando progresivamente hasta producir la rotura del suelo. En este momento, se registra el incremento máximo que junto con la presión inicial de confinamiento σ_3 , representarán la carga de rotura del suelo σ_1 . Se muestra una imagen del proceso en la Figura N° 21.

Figura N° 21. Aplicación de esfuerzo incremental

Fuente: (UPC, 2015)

3. CAPITULO 3: METODOLOGIA

El fin de la presente investigación es desarrollar un estudio experimental del comportamiento geotécnico de un suelo mezclado con caucho rallado proveniente de neumaticos inservibles. Asimismo, demostrar las mejoras en las características geotécnicas de la mezcla suelo-caucho y contribuir con el estudio de los beneficios de la reutilización de este material residual.

Los materiales que se usarán son: Suelo proveniente de una cantera y caucho rallado proveniente de neumaticos inservibles. El suelo se obtendrá de la cantera Laguna ubicada en la ciudad de Satipo mientras que el caucho será brindado por un proveedor de grass sintético.

El primer paso de la investigación, una vez obtenidos los materiales mencionados, será realizar estudios de caracterización física. En estos se encuentra el ensayo Granulométrico, que se realizará tanto al suelo como al caucho y el ensayo de Plasticidad o Limites de Atterberg que solo se aplicará al suelo. Seguido de esto, se ejecutará el ensayo de estado denominado Gravedad Específica o Peso Específico de los sólidos exclusivamente para el suelo. De esa manera se podrá comprender a mayor detalle las características principales de los materiales y sus particularidades.

Conseguidos los resultados de los ensayos mencionados se procederá a realizar la clasificación del suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos – SUCS. Esto porque se trata de una investigación geotécnica y dicha clasificación es la mas utilizada en la presente comunidad de estudio respecto al sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), la cual se emplea principalmente para estudios viales.

Finalizados los ensayos de caracterización física y de estado se realizará el ensayo de compactación Proctor Estandar al suelo puro y a las mezclas del suelo con caucho para obtener la densidad seca máxima y el porcentaje de humedad óptimo. Esto, con el objetivo de homogenizar las muestras para su posterior análisis en los ensayos de resistencia. Los porcentajes de caucho respecto al peso del suelo seco serán de 5%, 10%, 15% y 20%,

elegidos en base a investigaciones similares descritas en capítulos anteriores y bajo un criterio propio.

En la siguiente tabla se muestran los ensayos de Proctor Estándar que se realizarán, así como también los parámetros que se recogerán de los mismos.

Tabla N° 6. Ensayo de Proctor Estándar

Fuente: Propia

Suelo	Densidad Seca Máxima (γ)	Humedad Óptima (W)
Suelo Puro	✓	✓
Suelo + 5% caucho	✓	✓
Suelo + 10% caucho	✓	✓
Suelo + 15% caucho	✓	✓
Suelo + 20% caucho	✓	✓

Con los datos obtenidos mediante el ensayo de Proctor Estándar se procederá a la realización de ensayos de resistencia. El primero que se realizará será el de Corte Directo, de donde se conseguirán los parámetros de resistencia al corte del suelo, es decir, la cohesión y el ángulo de fricción. Estos parámetros se utilizarán para conocer la resistencia al corte de todas las muestras con el fin de poder comparar el comportamiento mecánico en relación con la resistencia al corte para cada caso e identificar el porcentaje óptimo de caucho que se requerirá para maximizar las características geotécnicas de la muestra de suelo-caucho.

En la tabla número 7 se observan los ensayos de Corte Directo que se realizarán, así como los parámetros de resistencia que se obtendrán.

Tabla N° 7. Ensayo de corte directo

Fuente: Propia

Suelo	Parámetros de Resistencia	
	Cohesión (C)	Ángulo de Fricción (ϕ)
Suelo Puro	✓	✓
Suelo + 5% caucho	✓	✓
Suelo + 10% caucho	✓	✓
Suelo + 15% caucho	✓	✓
Suelo + 20% caucho	✓	✓

Finalmente se realizará un Ensayo Triaxial con el suelo en estado puro y otro con la mezcla de suelo con porcentaje de caucho óptimo, es decir la mezcla que muestre mejores resultados en sus características geotécnicas obtenidas previamente mediante el ensayo de Corte Directo.

Con la ayuda de este ensayo se podrá calcular los parámetros de resistencia de las muestras de suelo puro y de la mezcla óptima, para que de esa manera se pueda comparar con mayor sustento los cambios que se generan al agregar caucho al suelo estudiado.

En la Tabla N° 8 se presentan los ensayos triaxiales a realizar, así como también los parámetros de resistencia geotécnica más relevantes que se obtendrá de este.

Tabla N° 8. Ensayo Triaxial

Fuente: Propia

Suelo	Parámetros de Resistencia	
	Cohesión (C)	Ángulo de Fricción (ϕ)
Suelo Puro	✓	✓
Suelo + % Óptimo de caucho	✓	✓

Culminados los ensayos triaxiales y el análisis de sus resultados se estará en condiciones de presentar las conclusiones del comportamiento mecánico geotécnico del suelo con

adición de caucho como una nueva alternativa de estabilización de suelo, mostrar las mejoras obtenidas de las características del suelo y los beneficios en su aplicación.

4. CAPITULO 4: PROCESO EXPERIMENTAL

4.1. Materiales Utilizados

4.1.1. Suelo

El suelo utilizado para esta investigación proviene de la cantera Laguna, la cual se encuentra ubicada a 1 230 metros sobre el nivel del mar, en el km 10+300 de la carretera Satipo-Mazamari en la Provincia de Satipo, Departamento de Junín, en la zona central del Perú.

Figura N° 22. Mapa de Satipo

Fuente: (Huhsunqu, 2010) – Adaptado por el autor

Esta cantera cuenta con una potencia de 421 000 m³ y actualmente es explotada para la construcción de una carretera de 16 km en dicha provincia. El material fue extraído entre una profundidad de 0,0 y 2,0 metros, la cual se muestra en la Figura N° 23.

Figura N° 23. Material de Cantera Laguna – Satipo

Fuente: Propia

Aproximadamente se extrajo 120 kg de este material, el cual fue realizado manualmente y depositado en sacos y baldes plásticos de forma circular a una temperatura ambiental de 28°C. Seguidamente se transportó el material al laboratorio y se colocó en una estufa a 60°C hasta alcanzar su humedad constante.

4.1.2. Caucho Rallado

Las tiras de caucho utilizadas provienen de una combinación de la trituración de neumáticos reciclados de autos y camiones (Figura N° 25). Este material fue obtenido a través de la empresa de grass sintético Oak Sports situada en el distrito de los Olivos, en el norte de la ciudad de Lima Metropolitana. Son de color negro, con una resistencia al calor entre 185 y 190 W/m²·K, y un peso específico de 1.60 g/cm³. Las tiras vienen en diferentes tamaños, pero tienen un tamaño promedio de 1,30 cm de largo (Figura N° 24).

Figura N° 24. Tamaños de Caucho rallado

Fuente: Propia

Figura N° 25. Caucho rallado utilizado

Fuente: Propia

4.1.3. Agua

El agua utilizada para realizar los ensayos de compactación, es decir, el Proctor estándar, proviene de la red pública de abastecimiento de la ciudad de Lima Metropolitana. Sin embargo, los ensayos de caracterización física se han realizado con agua destilada.

4.1.4. Mezcla Suelo-Caucho

Con el objetivo de determinar el contenido óptimo para la inserción de este material como refuerzo al suelo se prepararon mezclas con diferentes niveles de caucho. Las mezclas utilizadas fueron de 5%, 10%, 15% y 20% de caucho rallado, calculados en relación con el peso del suelo seco. Estos porcentajes fueron seleccionados con el propósito de

examinar la evolución de la resistencia al cizallamiento de cada mezcla, con la finalidad de establecer una mejora máxima con el mayor volumen de residuo, ya que, el objetivo de uso de este material como refuerzo, es otorgarle un destino ambientalmente correcto para la mayor cantidad posible.

4.2. Ensayos: Métodos y Procedimientos

4.2.1. Ensayos de Caracterización Física

Para determinar las características físicas del suelo ensayado, se realizaron los ensayos correspondientes en un laboratorio geotécnico ubicado en el distrito de Comas, Lima. El suelo fue modificado retirándole únicamente las piedras grandes que no aportaban valor a los ensayos. Los ensayos realizados se han basado según la norma geotécnica peruana E.050 (Suelos y cimentaciones):

- Ensayo de análisis granulométrico: NTP 339.128 (ASTM D422)
- Ensayo de límites de Atterberg: NTP 339.129 (ASTM D4318)
- Ensayo de gravedad específica del suelo: NTP 339.131 (ASTM D854)
- Ensayo proctor estándar: NTP 339.142 (ASTM D698)
- Ensayo de corte directo: NTP 339.171 (ASTM D3080)
- Ensayo triaxial: NTP 339.166 (ASTM D4767)

4.2.1.1. Granulometría

En este ensayo se ha tamizado un total de 1246.60 gr de suelo como se muestra en la Figura N° 26.

Figura N° 26. Tamizado de la muestra

Fuente: Propia

Se seleccionó como pasante mínimo de suelo la malla N°4 para obtener como resultado un suelo arenoso con partículas finas. Las partículas retenidas en la malla N° 200 se lavaron como se muestra en la Figura N° 27 para que el ensayo fuera más exacto y finalmente se secaron las partículas lavadas en el horno durante 24 horas, para así obtener su peso seco pasante.

Figura N° 27. Lavado de la muestra retenida en la Malla N° 200

Fuente: Propia

4.2.1.2. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg (límite de liquidez y límite de plasticidad) fueron determinados utilizando el material pasante en el tamiz #40. Con este material pasante, se procedió a agregarle una cantidad moderada de agua hasta que la pasta preparada tenga una plasticidad adecuada y homogénea como se presenta en la Figura N° 28.

Figura N° 28. Preparación de la pasta

Fuente: Imagen Propia

Luego, con la ayuda de la herramienta llamada Casagrande, se realizaron entre 18 a 26 golpes, hasta que las muestras pastosas se cerraron como se muestra en la Figura N° 29.

Figura N° 29. Herramienta Casablanca

Fuente: Imagen Propia

Finalmente, se separaron las muestras analizadas y se dejaron secar en el horno como se muestra en la siguiente Figura 30. Los resultados de plasticidad del material se presentan más adelante.

Figura N° 30. Muestras llevadas al horno

Fuente: Imagen Propia

4.2.2. Ensayo de Estado

4.2.2.1. Peso Específico de las Partículas

Para este ensayo se utilizó una muestra de suelo pasante de la malla N°4 y se colocó dentro de la fiola un total de 300 gr de este material como se muestra en la Figura N° 31.

Figura N° 31. Pesado de fiola con suelo

Fuente: Propia

Después se rellenó con agua destilada como se muestra en la Figura 32 y se procedió con la extracción de burbujas de aire utilizando una bomba de vacío. Una vez apuntados todos los pesos necesarios, se llevó la fiola al horno por 24 horas para obtener el peso seco de la muestra. Los resultados obtenidos se presentarán más adelante en el análisis de resultados en la Tabla 10.

Figura N° 32. Pesado de fiola con suelo y agua destilada

Fuente: Imagen Propia

4.2.3. Ensayo de Compactación

La compactación consiste en un proceso repetitivo, cuyo objetivo es conseguir una densidad específica para una relación óptima de agua, al fin de garantizar las características mecánicas necesarias del suelo.

Dentro de los ensayos de compactación se encuentra el ensayo Proctor, que, a su vez, posee dos modalidades: El ensayo de Proctor Estándar y el ensayo de Proctor Modificado. La diferencia entre dichas modalidades radica principalmente en la energía de compactación utilizada para realizar el ensayo, es decir, la altura desde la que se deja caer el martillo, el peso de este, el número de capas y la dimensión del molde. (Das & Cervantes, 2015)

El objetivo de realizar el presente ensayo es obtener el óptimo porcentaje de humedad y densidad seca máxima de las muestras con una homogenización de trabajo para el

posterior análisis de Corte Directo y Triaxial CU. Es por esto que en la presente investigación experimental se realizara la modalidad de ensayo de Proctor Estandar ya que realizar el Proctor Modificado resultaría indistinto para los fines del estudio.

4.2.3.1. Ensayo de Proctor Estándar

Los ensayos de Proctor estándar se ejecutaron con el suelo puro y con mezclas de 5%, 10%, 15% y 20% de caucho rallado, calculados respecto al peso del suelo seco. El fin de realizar este ensayo es obtener la densidad seca máxima del suelo ($\gamma_{d\text{máx}}$) y su óptimo porcentaje de humedad ($\%w_{\text{óptimo}}$) para la compactación.

Para iniciar el ensayo se preparó 3 000 gramos de suelo puro y de sus respectivas mezclas como se muestra en la Figura N° 33.

Figura N° 33. (a) Peso del suelo puro hasta llegar a 3 000 gramos de material. (b) Peso del suelo puro con una adición de 5% de caucho rallado respecto al peso seco del suelo. (150 gramos de caucho rallado)

Fuente: Imagen Propia

Después de obtener las muestras, se procedió a aplicarle un porcentaje de 3%, 6%, 9% y 12% de agua a cada muestra como se aprecia en la Figura N° 34 para luego homogenizarlo y dividirlas en tres fragmentos iguales.

(a)

(b)

Figura N° 34. (a) Aplicación de 3% de agua al suelo (b) Mezcla homogenizada del suelo y separada en 3 fragmentos

Fuente: Imagen Propia

Cada fragmento se ubica en modo de capas en un molde cilíndrico de 10 cm de diámetro x 12.7 cm de altura en el cual se le aplica 25 golpes por cada una de las 3 capas de relleno como se muestra en la Figura N° 35.

(a)

(b)

Figura N° 35. (a) Relleno de los fragmentos separados en el molde cilíndrico de compactación. (b) Aplicación de 25 golpes por capa.

Fuente: Imagen Propia

Finalmente se pesaron los cilindros para así obtener las máximas densidades húmedas y luego se metieron unas muestras al horno para obtener las máximas densidades secas (Figura N° 36).

Figura N° 36. Molde en balanza digital

Fuente: Imagen Propia

Con los datos obtenidos, se procede a graficar las curvas de compactación (contenido de humedad vs densidad seca) con el fin de hallar la densidad húmeda máxima para cada muestra. Los resultados se presentarán más adelante.

4.2.4. Ensayos de Resistencia

4.2.4.1. Ensayo de Corte Directo

Los ensayos de Corte Directo realizados en la presente investigación son del tipo Consolidado - Drenado (CD). Todos estos ensayos fueron ejecutados en los laboratorios del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) Lima – Perú. A continuación, se describen los equipos utilizados en estos ensayos, así como las metodologías empleadas en la preparación de los cuerpos de prueba.

4.2.4.1.1. Equipo Utilizado

El equipo utilizado para este ensayo fue el aparato de corte directo marca:

Equipo de Corte Directo Digital - ELE

Modelo: D - 300 A - 4

Número de Serie:1627-6-1218

Este tiene un rango de velocidad continua desde 0.00001 a 0.49999 in/min (0.0001mm hasta 12.99999 mm/min) por minuto controlado por el motor por etapas. Permite efectuar pruebas a las muestras con dimensiones redondas de 60mm, 100mm, 2.5” y 4.0”. El rango de velocidad para la aplicación de la fuerza cortante se ajusta rápidamente en forma manual. La fuerza cortante máxima es de 2,000 lb. (10kN). La fuerza de consolidación máxima es de 2,000 lbs (10kN). Las mediciones de las posiciones hacia delante y de reversa permite que la prueba cortante residual sea tomada como estándar. Las características de seguridad previenen la sobrecarga del sistema de medición de carga. Cumple con Normas ASTM D-3080.

4.2.4.1.2. Preparación de las muestras de prueba

Para realizar el ensayo de cada muestra se realizaron tres pruebas para reducir el riesgo en los resultados. Se trabajó con muestras remoldeadas hasta obtener condiciones uniformes; para ello fue necesario llevar cada muestra a su propia densidad máxima como también a su porcentaje de humedad óptima, los cuales fueron independientemente obtenidos al realizar el ensayo de Proctor Estándar. Esto se realizó tanto para la muestra del suelo puro, como también, para las muestras con 5%, 10%, 15% y 20% de caucho rallado añadido.

- Se secaron y separaron las muestras con sus respectivas mezclas, como se muestra en la Figura N° 37.

Figura N° 37. Muestras de Suelo natural y con sus respectivas mezclas de adición de caucho

Fuente: Imagen Propia

- Se hicieron los cálculos para determinar la cantidad de suelo que necesitaría el molde (Figura N° 38) para obtener un espécimen con la densidad requerida.

Figura N° 38. Muestra moldeada de suelo con 20% de caucho añadido

Fuente: Imagen Propia

- Se introdujo el suelo en el molde en una sola capa para el corte directo.
- Se amasó la muestra dentro del molde hasta meter todo el material con su volumen ya conocido, para alcanzar la densidad requerida.

- Todo el material pesado se introdujo en el molde.
- Después de llenar y amasar el material en el molde, se pesa para conocer la densidad obtenida.
- Después de amasado y pesado se extrae el espécimen del molde.
- Para sacar el espécimen del molde se utilizó un mecanismo que consistió en introducir un pistón apoyado en un respaldo metálico.
- El pistón se desplazaba de arriba hacia abajo auxiliado de una manecilla metálica.

4.2.4.1.3. Introducción de las muestras a la cámara del ensayo de Corte Directo

- Se introduce el espécimen en la recámara del aparato de corte directo como se muestra en la Figura N° 39.

Figura N° 39. Equipo de Corte Directo

Fuente: Imagen Propia

- Se ajustan los tres deformómetros: El del anillo que mide el esfuerzo del suelo, el que mide la deformación del suelo vertical y el que mide el desplazamiento horizontal.
- Se quitan los tornillos de seguridad de la recámara.

4.2.4.2. Ensayo Triaxial (CU)

Los ensayos triaxiales realizados en la presente investigación son del tipo Consolidado – No Drenado (CU). Los dos ensayos fueron ejecutados en los laboratorios de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú. A continuación, se describen los equipos utilizados en estos ensayos, así como las metodologías empleadas en la preparación de los cuerpos de prueba.

4.2.4.2.1 Equipo utilizado

El equipo utilizado es de marca Clockhouse, modelo New Barnet como se muestra en la Figura N° 42.

Figura N° 42.

Fuente: Imagen Propia

4.2.4.2.2 Preparación de las muestras de prueba

Para realizar el ensayo de cada muestra se realizaron tres pruebas de diferentes cargas para poder obtener la data del del círculo de Mohr. Se trabajó con muestras remoldeadas hasta obtener condiciones uniformes; para ello fue necesario llevar cada muestra a su propia densidad máxima como también a su porcentaje de humedad óptima, los cuales fueron independientemente obtenidos al realizar el ensayo de Proctor Estándar. Esto se realizó tanto para la muestra del suelo puro y la muestra con 5% de adición de caucho.

- Se secaron y separaron las muestras con sus respectivas mezclas.
- Se hicieron los cálculos para determinar la cantidad de suelo y humedad que necesitaría el molde para obtener un espécimen con la densidad requerida (Figura N° 43).

Figura N° 43. Muestra de suelo con adición de caucho

Fuente: Imagen Propia

- Se introdujo el suelo en el molde en una sola capa.
- Se amasó la muestra dentro del molde hasta meter todo el material con su volumen ya conocido, para alcanzar la densidad requerida.
- Todo el material pesado se introdujo en el molde.
- Después de llenar y amasar el material en el molde, se pesa para conocer la densidad obtenida.
- Después de amasado y pesado se extrae el espécimen del molde.
- Para sacar el espécimen del molde se utilizó un mecanismo que consistió en introducir un pistón apoyado en un respaldo metálico.

4.2.4.2.4 Introducción de las muestras a la cámara del ensayo Triaxial

- Se introduce cada espécimen en la recámara del aparato Triaxial (Figura N° 44 y N° 45).

Figura N° 44. Muestra preparada para ingresar a la cámara triaxial

Fuente: Imagen Propia

Figura N° 45. Muestra dentro de la cámara triaxial

Fuente: Imagen Propia

- Se ajustan los dos deformómetros: El del anillo que mide el esfuerzo del suelo y el que mide la deformación del suelo vertical.
- Se quitan los tornillos de seguridad de la recámara.
- Se le coloca el primer peso para el esfuerzo normal. Las cargas aplicadas son de 1 kg/cm², 2 kg/cm² y 4 kg/cm².
- El aparato funciona con un motor eléctrico para desplazar la recámara.
- Se procede a realizar el ensayo
- Se aplica el ensayo hasta obtener una deformación de 15% con respecto al radio de cada muestra.
- Se regresa la recámara a su posición inicial y se extrae el espécimen (Figura N° 46).

Figura N° 46. Muestra de suelo rota

Fuente: Imagen Propia

5. CAPITULO 5: ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. Ensayos de Caracterización Física

5.1.1. Suelo

5.1.1.1. Análisis Granulométrico

El tamizado de la muestra presenta un pasante mínimo del tamiz N°200 y una buena distribución del tamaño de sus partículas. En la Tabla N° 9 se detallan los pesos y porcentajes pasantes por cada malla. Asimismo, con estos datos se presenta la tabla granulométrica del suelo utilizada para la investigación, en la Figura N° 41.

Tabla N° 9. Tamizado del suelo

Fuente: Propia

Tamiz		Material Retenido			
Ø		Peso	Retenido	Acumulado	Pasante
Pulgada	mm	(g)	(%)	(%)	(%)
N °4	4.76				100
N °6	3.36	95.1	12.28	12.3	87.7
N °8	2.38	49.2	6.35	18.6	81.4
N °10	2.00	8.8	1.14	19.8	80.2
N °16	1.19	36.6	4.73	24.5	75.5
N °20	0.84	17.0	2.19	26.7	73.3
N °30	0.59	14.0	1.81	28.5	71.5
N °40	0.43	11.6	1.50	30.0	70.0
N °50	0.30	13.7	1.77	31.8	68.2
N °80	0.18	97.6	12.60	44.4	55.6
N °100	0.15	44.0	5.68	50.0	50.0
N °200	0.074	84.4	10.90	60.9	39.1
Bandeja		302.6	39.07	100.0

Figura N° 47. Curva Granulométrico del Suelo

Fuente: Propia

5.1.1.2. Límites de Atterberg

Tabla N° 10. Límites de Atterberg

Fuente: Propia

Descripción	
Humedad (%)	2.50
Arena (%)	60.9
Pasante N° 200 (%)	39.1
Peso Inicial (gr)	774.6
Porción de finos (gr)	472.0
L.L (%)	17
L.P (%)	NP
I.P (%)	NP
CLASIFIC. SUCS:	SM
CLASIFIC. AASHTO:	A-4(0)

5.1.2. Caucho

5.1.2.1. Análisis Granulométrico

El tamizado de la muestra se presenta en la Figura N° 48. Esta está realizada con una muestra de 98.8 g y un pasante mínimo del tamiz N°4 y retenido como máximo en el tamiz N°200. La distribución de esta granulometría nos indica que existen partículas muy finas presentes en la muestra del caucho rallado (las cuáles pueden considerarse como caucho en polvo) y también que, a pesar de que el tamaño del caucho rayado varía alrededor de 1 cm de longitud, las tiras mas largas son tan flexibles que logran pasar hasta mínimo con una longitud de 0.336 mm de longitud.

CURVA GRANULOMETRICA SUELO, CAUCHO Y MEZCLAS

Figura N° 49. Curva granulométrica de las muestras: S100, S95/C5, S90/C10, S85/C15, S80/C20

Fuente: Propia

5.2. Ensayo de Estado

5.2.1. Ensayo de Peso Específico

Los resultados obtenidos del ensayo se muestran en la Tabla N° 11.

Tabla N° 11. Datos de ensayo de Peso Especifico de las particulas
Fuente: Propia

Peso material seco	300.000	(g)
Peso fiola (calibrada con agua)	673.000	(v)
Peso fiola (calibrada con agua) + Peso material	973.000	(g)
Peso fiola + agua + material s.s.s.(extraído el aire)	847.000	(g)
Volumen de la masa + volumen de vacios	126.000	(v)
Peso de material seco	293.700	(g)
Volumen de la masa	119.700	(g)
Peso especifico	2.331	(gr/cm ³)

El valor del peso específico obtenido del ensayo para nuestro suelo arenoso ligeramente limoso es de 2.331 g/cm³.

5.3. Ensayo de Compactación

5.3.1. Ensayo de Proctor Estándar

En la Tabla N° 12 se muestran los resultados del ensayo de compactación con sus diferentes proporciones de adición de caucho y sus cuatro puntos obtenidos para la curva.

Tabla N° 12. Datos de ensayo de Proctor Estandar

Fuente: Propia

S100		S95/C5		S90/C10		S85/C15		S80/C20	
Promedio de humedad (%)	Densidad del suelo seco (g/cm ³)	Promedio de humedad (%)	Densidad del suelo seco (g/cm ³)	Promedio de humedad (%)	Densidad del suelo seco (g/cm ³)	Promedio de humedad (%)	Densidad del suelo seco (g/cm ³)	Promedio de humedad (%)	Densidad del suelo seco (g/cm ³)
5.8	1.991	7.1	1.804	5.2	1.594	5.2	1.479	5	1.397
8.2	2.037	8.6	1.813	8.2	1.713	8.1	1.596	8	1.513
9.9	2.029	9.9	1.825	11.3	1.698	11.1	1.57	10.5	1.471
12	1.803	11.6	1.803	13.4	1.671	14	1.481	13	1.371

A continuación, se muestra en la Figura N° 50 un gráfico con los ensayos proctor que resume el cuadro anterior para poder realizar el análisis respectivo.

Figura N° 50. Curvas de Proctor para las muestras S100. S95/C5, S90/C10, S85/C15, S80/20

Fuente: Propia

Los resultados obtenidos y resumen de máxima densidad seca y coeficiente óptimo de humedad para cada muestra con su diferente porcentaje de adición de caucho se muestran en la Tabla N° 13.

Tabla N° 13. Datos de Máxima densidad seca y Coeficiente optimo de humedad de las mezclas.

Fuente: Propia

Porcentaje de adición de caucho (%)	S100	S95/C5	S90/C10	S85/C15	S80/C20
Máxima densidad seca (g/cm ³)	2.080	1.824	1.718	1.599	1.513
Coeficiente óptimo de humedad (%)	9.20	10.04	9.10	8.90	8.30

Con los datos obtenidos en la tabla anterior, se realizó el grafico “Densidad seca Máxima vs. Adicion de caucho” que se presenta a continuación en la Figura N° 51. En esta se puede apreciar que la tendencia de la densidad seca máxima va disminuyendo a medida que se le adiciona cierto porcentaje de caucho al suelo.

Figura N° 51. Densidad seca máxima vs. Adición de caucho

Fuente: Propia

En el presente análisis se muestra un gráfico con la comparación entre el coeficiente óptimo de humedad y la densidad seca máxima de cada muestra (Figura N° 52)

Figura N° 52. Densidad seca máxima vs. Contenido óptimo de humedad

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la Figura N° 52, hay una tendencia en el porcentaje óptimo de humedad para los ensayos que varía entre 8.4% y 9.3% (menos de 1% de diferencia). Se puede apreciar que el máximo porcentaje de humedad óptimo es para el suelo puro y el mínimo para el suelo con más adición de caucho. Por ende, mientras más porcentaje de caucho exista en el suelo, decrecerá más su coeficiente óptimo de humedad, logrando que el suelo sea más difícil de compactar.

Otra apreciación que se puede visualizar es que la máxima densidad seca de cada muestra tiende a decrecer a raíz que se le va adicionando caucho al suelo. Esto sucede ya que el caucho está llenando varios espacios vacíos del suelo y posee menor densidad en comparación con la del suelo.

5.4. Ensayos de Resistencia

5.4.1. Ensayo de Corte Directo

Para cada muestra se realizó tres pruebas con esfuerzos de 50, 100 y 200 kPa, donominados I, II Y III respectivamente. Con los resultados se elaboro el diagrama, mostrado en la Figura N° 53, “Esfuerzo de Corte (kPa) Vs. Deformación Horizontal

(mm)”, de la cual se obtiene el esfuerzo de corte máximo (kPa) de cada muestra para un confinamiento diferente, presentado en la Tabla N° 14.

GRAFICO ESFUERZO DE CORTE (kPa) VS. DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (mm)

Figura N° 53. Esfuerzo de Corte (kPa) Vs. Deformación Horizontal (mm)

Fuente: Propia

Tabla N° 14. Datos de Esfuerzo de corte respecto al desplazamiento horizontal.

Fuente: Propia

Confinamiento	S100	S95/C5	S90/C10	S85/C15	S80/C20
50 kPa	30.26	36.86	33.09	34.97	27.43
100 kPa	57.60	73.63	66.09	63.26	55.72
200 kPa	112.29	142.46	131.15	117.00	110.40

Con los datos obtenidos de la Figura N° 46 y representadas en la Tabla N° 14 se elaboro la Envolvente de Rotura del Suelo, presentada en la Figura N° 54. Asimismo, esta grafica nos permite conocer los parámetros de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ), que se resumen en la Tabla N° 15.

Figura N° 54. Envolvente de rotura del suelo

Fuente: Propia

Tabla N° 15. Angulo de friccion y Cohesion de cada muestra

Fuente: Propia

	S100	S95/C5	S90/C10	S85/C15	S80/C20
C (kPa)	2.916	2.445	0.558	8.1018	0.0873
ϕ	28.7°	35.1°	33.2°	28.6°	28.9°

Se puede verificar que el ángulo de fricción del suelo natural, el cual es la base y punto de partida para el análisis de mejoramiento de este mismo, es de 28.7° y el mayor valor de ángulo de fricción en las mezclas es el de 35.1° correspondiente al suelo con un agregado de 5% de caucho rallado. Es por esto que podemos decir que, si bien es cierto que las mezclas de 10% y 20% también presentan un mayor ángulo de fricción respecto la del suelo natural, el del 5% es mayor que estos dos últimos y por lo cual es el óptimo.

En la Figura N° 55 se observa que el esfuerzo cortante aumenta con mayor tendencia respecto una a otra cuando el confinamiento aplicado va en aumento. Esto se ve a mas detalle en las Figuras N° 56, 57 y 58.

Figura N° 56. Envolvente de rotura del suelo de 0 a 50 kPa

Fuente: Propia

Figura N° 57. Envolvente de rotura del suelo de 50 a 100 kPa

Fuente: Propia

Figura N° 58. Envolvente de rotura del suelo

Fuente: Propia

En la Figura N° 59 se aprecia el cambio de la cohesión de cada muestra respecto al desplazamiento. Teniendo como base la muestra S100 se puede precisar que hasta los 2 mm de desplazamiento el restante de muestras tiene un valor de cohesión mayor. Sin embargo, pasando dicho desplazamiento, tan solo, la muestra S85/C15 mantiene un mayor valor respecto al S100 y las sobrantes se encuentran por debajo.

Figura N° 59. Cohesión vs. Desplazamiento

Fuente: Propia

En la Figura N° 60 se muestra el cambio del ángulo de fricción respecto al desplazamiento de las muestras en el ensayo de corte directo. Se puede verificar que en todo momento las muestras S90/C5 y S95/C5 mantienen un valor de ángulo de fricción mayor respecto a la muestra base S100, mientras que la muestra S85/C15 tan solo es mayor a 1 mm de desplazamiento y luego descende, y la muestra S80/C20 mantiene un ángulo de fricción menor al del suelo natural en todo el desplazamiento. Por lo cual se puede afirmar que las dos primeras muestras tienen un mejor comportamiento.

Figura N° 60. Ángulo de fricción vs. Desplazamiento

Fuente: Propia

La dilatación de las muestras respecto a su desplazamiento horizontal se puede ver de manera grafica en la Figura N° 61. En esta se tiene como referencia base la muestra de suelo puro (S100) y se observa que las diferentes mezclas tambien se dilatan a medida que se desplazan horizontalmente. Sin embargo, se destaca la muestra S95/C5 debido a que es la que posee menos dilatación y pasa a contraerse después de 1 mm de desplazamiento.

Figura N° 61. Desplazamiento vertical (mm) vs. Desplazamiento horizontal (mm)

Fuente: Propia

5.4.2. Ensayo Triaxial (CU)

Al conocer que el suelo con la adición de caucho del 5% es la que presenta mejor resistencia al corte (conclusión obtenida con los ensayos de corte directo), se procedió a realizar los ensayos triaxiales del suelo puro y con su respectiva adición para tener un mejor cálculo de parámetros.

5.4.2.1 Círculo de Mohr

Para este ensayo, se aplicaron cargas de 1 kg/cm², 2 kg/cm² y 4 kg/cm².

5.4.2.1.1 Suelo natural

En la tabla 16 se muestran los resultados de los esfuerzos totales obtenidos para el suelo.

Tabla N° 16. Esfuerzos totales del suelo sin adición

Fuente: Propia

ESFUERZOS TOTALES								
Variación de θ :	11.25	Variación de θ :	11.25	Variación de θ :	11.25			
Origen:	O1 =	2.4263137	Origen:	O1 =	4.85395	Origen:	O1 =	9.0674722
Radio:	R1 =	1.4263137	Radio:	R1 =	2.85395	Radio:	R1 =	5.0674722
θ	X	Y	θ	X	Y	θ	X	Y
0.000	1.000	0.000	0.000	2.000	0.000	0.000	4.000	0.000
11.250	1.027	0.278	11.250	2.055	0.557	11.250	4.097	0.989
22.500	1.109	0.546	22.500	2.217	1.092	22.500	4.386	1.939
33.750	1.240	0.792	33.750	2.481	1.586	33.750	4.854	2.815
45.000	1.418	1.009	45.000	2.836	2.018	45.000	5.484	3.583
56.250	1.634	1.186	56.250	3.268	2.373	56.250	6.252	4.213
67.500	1.880	1.318	67.500	3.762	2.637	67.500	7.128	4.682
78.750	2.148	1.399	78.750	4.297	2.799	78.750	8.079	4.970
90.000	2.426	1.426	90.000	4.854	2.854	90.000	9.067	5.067
101.250	2.705	1.399	101.250	5.411	2.799	101.250	10.056	4.970
112.500	2.972	1.318	112.500	5.946	2.637	112.500	11.007	4.682
123.750	3.219	1.186	123.750	6.440	2.373	123.750	11.883	4.213
135.000	3.435	1.009	135.000	6.872	2.018	135.000	12.651	3.583
146.250	3.612	0.792	146.250	7.227	1.586	146.250	13.281	2.815
157.500	3.744	0.546	157.500	7.491	1.092	157.500	13.749	1.939
168.750	3.825	0.278	168.750	7.653	0.557	168.750	14.038	0.989
180.000	3.853	0.000	180.000	7.708	0.000	180.000	14.135	0.000

Con los datos de la tabla anterior, se realizó el círculo de Mohr respectivo en la figura 62 y se obtuvieron los parámetros C y ϕ .

Figura N° 62. Círculo de Mohr de esfuerzos totales del suelo sin adición

Fuente: Propia

A continuación, en la Tabla N° 17 se muestran los resultados de los esfuerzos efectivos obtenidos.

Tabla N° 17. Esfuerzos efectivos del suelo sin adición

Fuente: Propia

ESFUERZOS EFECTIVOS								
Variación de θ :	11.25	Variación de θ :	11.25	Variación de θ :	11.25			
Origen:	O1 =	2.4196618	Origen:	O1 =	4.78299	Origen:	O1 =	8.983215
Radio:	R1 =	1.4263137	Radio:	R1 =	2.85395	Radio:	R1 =	5.0674722
θ	X	Y	θ	X	Y	θ	X	Y
0.000	0.993	0.000	0.000	1.929	0.000	0.000	3.916	0.000
11.250	1.021	0.278	11.250	1.984	0.557	11.250	4.013	0.989
22.500	1.102	0.546	22.500	2.146	1.092	22.500	4.301	1.939
33.750	1.234	0.792	33.750	2.410	1.586	33.750	4.770	2.815
45.000	1.411	1.009	45.000	2.765	2.018	45.000	5.400	3.583
56.250	1.627	1.186	56.250	3.197	2.373	56.250	6.168	4.213
67.500	1.874	1.318	67.500	3.691	2.637	67.500	7.044	4.682
78.750	2.141	1.399	78.750	4.226	2.799	78.750	7.995	4.970
90.000	2.420	1.426	90.000	4.783	2.854	90.000	8.983	5.067
101.250	2.698	1.399	101.250	5.340	2.799	101.250	9.972	4.970
112.500	2.965	1.318	112.500	5.875	2.637	112.500	10.922	4.682
123.750	3.212	1.186	123.750	6.369	2.373	123.750	11.799	4.213
135.000	3.428	1.009	135.000	6.801	2.018	135.000	12.566	3.583
146.250	3.606	0.792	146.250	7.156	1.586	146.250	13.197	2.815
157.500	3.737	0.546	157.500	7.420	1.092	157.500	13.665	1.939
168.750	3.819	0.278	168.750	7.582	0.557	168.750	13.953	0.989
180.000	3.846	0.000	180.000	7.637	0.000	180.000	14.051	0.000

Con los datos de la tabla anterior, se realizó el círculo de Mohr respectivo en la figura 63 y se obtuvieron los parámetros C y ϕ .

Figura N° 63. Círculo de Mohr de esfuerzos efectivos del suelo sin adición

Fuente: Propia

5.4.2.1.2 Suelo con adición del 5% de caucho

En primer lugar, en la tabla N° 18 se muestran los resultados de los esfuerzos totales obtenidos para el suelo.

Tabla N° 18. Esfuerzos totales del suelo con adición del 5% de caucho

Fuente: Propia

ESFUERZOS TOTALES								
Variación de θ :	11.25	Variación de θ :		11.25	Variación de θ :		11.25	
Origen:	O1 =	2.684787	Origen:	O1 =	4.35409	Origen:	O1 =	7.80237628
Radio:	R1 =	1.684787	Radio:	R1 =	2.35409	Radio:	R1 =	3.80237628
θ	X	Y	θ	X	Y	θ	X	Y
0.000	1.000	0.000	0.000	2.000	0.000	0.000	4.000	0.000
11.250	1.032	0.329	11.250	2.045	0.459	11.250	4.073	0.742
22.500	1.128	0.645	22.500	2.179	0.901	22.500	4.289	1.455
33.750	1.284	0.936	33.750	2.397	1.308	33.750	4.641	2.112
45.000	1.493	1.191	45.000	2.689	1.665	45.000	5.114	2.689
56.250	1.749	1.401	56.250	3.046	1.957	56.250	5.690	3.162
67.500	2.040	1.557	67.500	3.453	2.175	67.500	6.347	3.513
78.750	2.356	1.652	78.750	3.895	2.309	78.750	7.061	3.729
90.000	2.685	1.685	90.000	4.354	2.354	90.000	7.802	3.802
101.250	3.013	1.652	101.250	4.813	2.309	101.250	8.544	3.729
112.500	3.330	1.557	112.500	5.255	2.175	112.500	9.257	3.513
123.750	3.621	1.401	123.750	5.662	1.957	123.750	9.915	3.162
135.000	3.876	1.191	135.000	6.019	1.665	135.000	10.491	2.689
146.250	4.086	0.936	146.250	6.311	1.308	146.250	10.964	2.112
157.500	4.241	0.645	157.500	6.529	0.901	157.500	11.315	1.455
168.750	4.337	0.329	168.750	6.663	0.459	168.750	11.532	0.742
180.000	4.370	0.000	180.000	6.708	0.000	180.000	11.605	0.000

Con los datos de la tabla anterior, se realizó el círculo de Mohr respectivo en la figura N° 64 y se obtuvieron los los parámetros C y ϕ .

Figura N° 64. Círculo de Mohr de esfuerzos totales del suelo con adición de 5% de caucho

Fuente: Propia

A continuación, en la tabla N° 19 se muestran los resultados de los esfuerzos efectivos obtenidos.

Tabla N° 19. Esfuerzos efectivos del suelo con adición del 5% de caucho

Fuente: Propia

ESFUERZOS EFECTIVOS								
Variación de θ :	11.25	Variación de θ :	11.25	Variación de θ :	11.25			
Origen:	O1 =	2.556184	Origen:	O1 =	3.89732	Origen:	O1 =	7.17931641
Radio:	R1 =	1.684787	Radio:	R1 =	2.35409	Radio:	R1 =	3.80237628
θ	X	Y	θ	X	Y	θ	X	Y
0.000	0.871	0.000	0.000	1.543	0.000	0.000	3.377	0.000
11.250	0.904	0.329	11.250	1.588	0.459	11.250	3.450	0.742
22.500	1.000	0.645	22.500	1.722	0.901	22.500	3.666	1.455
33.750	1.155	0.936	33.750	1.940	1.308	33.750	4.018	2.112
45.000	1.365	1.191	45.000	2.233	1.665	45.000	4.491	2.689
56.250	1.620	1.401	56.250	2.589	1.957	56.250	5.067	3.162
67.500	1.911	1.557	67.500	2.996	2.175	67.500	5.724	3.513
78.750	2.227	1.652	78.750	3.438	2.309	78.750	6.438	3.729
90.000	2.556	1.685	90.000	3.897	2.354	90.000	7.179	3.802
101.250	2.885	1.652	101.250	4.357	2.309	101.250	7.921	3.729
112.500	3.201	1.557	112.500	4.798	2.175	112.500	8.634	3.513
123.750	3.492	1.401	123.750	5.205	1.957	123.750	9.292	3.162
135.000	3.748	1.191	135.000	5.562	1.665	135.000	9.868	2.689
146.250	3.957	0.936	146.250	5.855	1.308	146.250	10.341	2.112
157.500	4.113	0.645	157.500	6.072	0.901	157.500	10.692	1.455
168.750	4.209	0.329	168.750	6.206	0.459	168.750	10.909	0.742
180.000	4.241	0.057	180.000	6.251	0.000	180.000	10.982	0.000

Con los datos del cuadro anterior, se realizó el círculo de Mohr respectivo en la figura N° 65 y se obtuvieron los los parámetros C y ϕ .

Figura N° 65. Círculo de Mohr de esfuerzos efectivos del suelo con adición de 5% de caucho

Fuente: Propia

Como se puede apreciar, al realizar la línea tangencial entre cada círculo, el coeficiente de cohesión aumenta cuando se realiza una adición de caucho y el coeficiente θ disminuye.

5.4.2.2 Deformación unitaria

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos para el suelo sin adición de caucho en la tabla N° 20, divididos entre el esfuerzo desviador y la presión de poros para una deformación unitaria alcanzada hasta un 15% de la altura del espécimen en el que se coloca la muestra.

Tabla N° 20. Esfuerzo desviador y Presión de poros del suelo sin adición

Fuente: Propia

S100						
Esfuerzo efectivo (kg/cm²)	1.00		2.00		4.00	
Deformacion unitaria (E - %)	Esfuerzo Desviador (Kg/cm²)	Presión de poros (Kg/cm²)	Esfuerzo Desviador (Kg/cm²)	Presión de poros (Kg/cm²)	Esfuerzo Desviador (Kg/cm²)	Presión de poros (Kg/cm²)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	2.045	0.000	1.128	0.002	1.259	0.011
1	2.557	0.000	1.331	0.004	3.157	0.013
2	2.609	0.000	3.668	0.022	4.417	0.016
3	2.684	0.007	4.755	0.031	8.411	0.022
4	2.732	0.007	5.136	0.038	9.311	0.031
5	2.729	0.004	5.333	0.040	9.589	0.033
6	2.775	0.004	5.401	0.047	9.711	0.040
7	2.794	0.002	5.515	0.053	10.049	0.051
8	2.788	0.000	5.601	0.069	10.135	0.055
9	2.806	0.000	5.708	0.071	10.073	0.058
10	2.799	0.000	5.693	0.071	10.057	0.060
11	2.838	0.000	5.676	0.069	10.039	0.062
12	2.853	0.000	5.659	0.069	9.973	0.071
13	2.843	-0.020	5.617	0.069	9.882	0.078
14	2.833	-0.020	5.576	0.067	9.769	0.082
15	2.823	-0.020	5.511	0.067	9.677	0.084

Figura N° 66. Esfuerzo desviador vs Deformación unitaria del suelo sin adición
Fuente: Propia

Figura N° 67. Presión de poros vs Deformación unitaria del suelo sin adición
Fuente: Propia

Ahora se muestran los resultados obtenidos para el suelo con la adición del 5% de caucho en la tabla N° 21, divididos entre el esfuerzo desviador y la presión de poros para una deformación unitaria alcanzada hasta un 15% de la altura del espécimen en el que se coloca la muestra.

Tabla N° 21. Esfuerzo desviador y Presión de poros del suelo con adición de 5% de caucho

Fuente: Propia

S95 C5						
Esfuerzo efectivo (kg/cm²)	1		2		4	
Deformacion unitaria (E - %)	Esfuerzo Desviador (Kg/cm²)	Presión de poros (Kg/cm²)	Esfuerzo Desviador (Kg/cm²)	Presión de poros (Kg/cm²)	Esfuerzo Desviador (Kg/cm²)	Presión de poros (Kg/cm²)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	0.284	0.004	0.826	0.035	0.903	0.038
1	0.513	0.024	1.181	0.058	1.027	0.071
2	0.915	0.038	1.626	0.080	2.109	0.104
3	1.459	0.069	2.037	0.169	3.094	0.215
4	1.817	0.082	2.738	0.235	3.784	0.257
5	2.340	0.106	2.981	0.324	4.385	0.404
6	2.438	0.118	3.266	0.364	5.485	0.428
7	2.653	0.122	3.593	0.399	6.029	0.479
8	2.863	0.129	4.008	0.424	6.274	0.490
9	2.926	0.120	4.200	0.437	6.607	0.519
10	3.081	0.124	4.434	0.446	6.955	0.537
11	3.370	0.115	4.708	0.452	7.270	0.554
12	3.263	0.115	4.701	0.455	7.553	0.574
13	3.249	0.113	4.693	0.457	7.603	0.585
14	3.234	0.113	4.683	0.455	7.605	0.614
15	3.196	0.113	4.673	0.452	7.560	0.623

Figura N° 68. Esfuerzo desviador vs Deformación Unitaria

Fuente: Propia

Figura N° 69. Presión de Poros vs Deformación Unitaria

Fuente: Propia

Después de realizar los respectivos ensayos para determinar los parámetros respectivos de nuestro suelo natural y con adición de caucho, se hace una comparación de estos resultados en la figura N° 70 en la que se puede apreciar que hasta esfuerzos normales de 323.102 kg/cm^2 (esfuerzos muy altos), el esfuerzo de corte es mayor y después, tiende a descender.

Figura N° 70. Esfuerzo de corte vs Esfuerzo de deformación

Fuente: Propia

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados y de los análisis realizados fue posible llegar a las conclusiones abordadas en este capítulo.

Las muestras presentaron un comportamiento propio debido a la influencia del caucho rallado. Así, el desarrollo de un nuevo material geotécnico con la utilización de este residuo tiene su inicio en esta investigación, ya que se observó una mejora de las propiedades mecánicas de este nuevo material.

Se utilizó un suelo granular para este estudio, el cual es clasificado como Arena Limosa proveniente de la cantera “Laguna” ubicada en la Provincia de Satipo, Departamento de Junín, en la zona central del Perú.

El caucho rallado de neumáticos inservibles, utilizado como material de refuerzo de los suelos, tiene un largo medio de $= 7 \text{ mm}$.

A continuación, se resumen las principales conclusiones relacionadas con la adición de caucho molido a los suelos utilizados en este trabajo:

- De acuerdo al ensayo de Gravedad Específica, se pudo obtener que el valor de la gravedad específica del suelo es 2.331 g/cm^3
- El suelo solo presenta límite líquido, el cual tiene un valor de 17%. Al no poseer límite plástico, tampoco posee índice de plasticidad. Este resultado corresponde al contenido de humedad que se obtiene de la curva de flujo con una ordenada de 25 golpes, el valor obtenido se aproxima a un número entero.

- De acuerdo a la granulometría y los límites de Atterberg, se obtuvo como material una arena limosa (SM) según el Sistema de Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
- Los parámetros de compactación de las mezclas de nuestro suelo arenoso limoso con caucho rallado están influenciados por el contenido de adición de este mismo, ya que el peso específico seco máximo de cada muestra disminuye a medida que se le aumenta este material de adición, así como su contenido óptimo de humedad también tiene una tendencia a decrecer.
- El comportamiento mecánico de las mezclas depende del contenido de caucho rallado añadido al suelo. La tendencia a mejorar la resistencia al corte con el aumento del contenido es que a partir de cierto porcentaje la inserción de caucho es perjudicial en relación a las propiedades del suelo puro.
- La tensión de confinamiento bajo la cual es cortado la mezcla influye grandemente en el comportamiento mecánico de éste. Para tensiones de confinamiento mayores a 50 kPa la resistencia al corte aumenta significativamente.
- La adición de caucho es más efectiva para tensiones de confinamiento entre 100 y 200 kPa y el contenido óptimo de caucho se encuentra entre 0% y 15% para el ensayo de corte directo.
- Las mezclas presentan un mayor ángulo de fricción para deformaciones horizontales de 2mm respecto a deformaciones horizontales de 1 mm para el ensayo de corte directo.
- La tendencia de la cohesión en las mezclas para deformaciones de 1 y 2 mm no es completamente clara. Pero se verifica que para mezclas entre 0% a 10% se tiene una inclinación a juntarse, mientras que de 15% a 20% ocurre lo contrario.
- Las curvas granulométricas de las mezclas suelo-caucho: S95/C5, S90/C10, S85/C15 y S80/C20 son similares por lo cual se creía que la resistencia al corte de estas no debería variar de manera importante. Sin embargo, después de los

análisis de resistencia se muestra que no es así, por lo que el caucho en cantidad no es la principal influencia para una mayor resistencia al corte, si no, se considera que es el porcentaje de distribución entre suelo y caucho lo que influye.

- Los ensayos de compactación indican que las densidades secas máximas de las mezclas suelo-caucho reciclado son menores que la densidad seca del suelo puro. Dichos valores indican una potencial aplicación de este material compuesto como relleno liviano en situaciones donde es necesario disminuir las cargas aplicadas.
- La muestra que presenta menor dilatación es la de S95/C5. Asimismo, esta es también la que presenta mayor resistencia al cortante.
- Aunque para la mezcla con mayor contenido de caucho (S80/C20) el comportamiento mecánico es menor en comparación al del suelo natural, esta posee características de resistencia que podrían cumplir las exigencias de determinadas obras geotécnicas como, por ejemplo, rellenos sobre suelos blandos, vertederos temporales y capas de rellenos sanitarios. Posibilitando de esta forma el menor consumo de material natural y reduciendo consecuentemente los costos de transporte y el volumen de material movilizado.
- La línea tangencial que forman los círculos de Mohr nos muestran que el suelo natural posee un mejor ángulo de fricción, pero menor cohesión, mientras que para el suelo con 5% de adición de caucho, la cohesión tiende a aumentar y el ángulo de fricción a disminuir.
- Las deformaciones del suelo natural y suelo con adición de caucho que se forman respecto al esfuerzo desviador tienden a ser menores cada vez que se aplica una carga mayor. De igual manera, la deformación unitaria con respecto a la presión de poros que se le aplica al suelo, tiende a disminuir al aumentarse la cantidad de caucho. Esto sucede ya que el caucho ocupa espacios vacíos que el suelo granular no puede y a su vez se comporta de forma elástica, proporcionando una mayor resistencia a la deformación.

- Hasta un esfuerzo normal de 323.102 kg/cm², el suelo con adición del 5% de caucho tiene un mejor comportamiento mecánico-geotécnico ya que sus parámetros de cohesión y fricción permiten que el esfuerzo de corte sea mayor hasta aplicar dicho esfuerzo normal. El esfuerzo de corte máximo que soporta que el suelo sea de mejor condición es de 222.068 kg/cm².

6.2. RECOMENDACIONES

A continuación, se citan algunas sugerencias para ampliar el conocimiento y proseguir con los estudios sobre el refuerzo de suelos con la inserción de caucho rallado de neumáticos inservibles.

- Realizar ensayos de permeabilidad en las mezclas suelo-caucho y en los suelos puros, para poder apreciar la influencia de la presencia de caucho rallado en la conductividad hidráulica.
- Realizar tanto ensayos triaxiales convencionales de compresión, así como triaxiales de extensión en mezclas suelo-caucho, para verificación de diversos tipos de comportamiento.
- Realizar ensayos triaxiales drenados para evaluar la influencia de la variación de volumen en la resistencia al corte, tanto en suelos granulares como finos
- Realizar ensayos con caucho en grandes dimensiones, preferentemente utilizar tiras de goma, para aprovechar con mayor eficacia la resistencia a la tracción de éstas.
- Utilizar un suelo arenoso con mayor porcentaje de finos y con menor presencia de material limo, para elaborar los composites y observar la influencia de la granulometría en los parámetros de resistencia.

- Realizar ensayos de variación de temperatura para conocer el comportamiento de las mezclas suelo-caucho.
- Desarrollar modelos de previsión de comportamiento resistencia-deformación, siendo este de gran importancia para la simulación numérica de obras geotécnicas.
- Realizar investigaciones previas con respecto al tiempo de vida del caucho en pequeños trozos que estén en contacto con suelos químicamente activos o que reciben una constante radiación producto del sol.
- Verificar la pérdida de resistencia que obtiene el caucho para conocer hasta qué instancias es adecuado su respectivo uso

7. REFERENCIAS

- Budhu, M. (2011). *SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Cetin, H., Fener, M., & Gunaydin, O. (2006). Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material. *Engineering Geology*.
- Chillihuani, V. (2017). Diseño e implementación de un equipo de corte directo para suelos gravosos y su aplicación en suelos típicos de cusco (Tesis de Pregrado). Cusco, Perú.
- Cienciasfera. (s.f.). Obtenido de http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/biologiageologia/tema_11/12_caractersticas_fsicas_del_suelo.html
- Das, B. M., & Cervantes, S. R. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4a. ed. ed.). Mexico, DF: CENGAGE Learning.
- Espinace, R., & Sanhueza, C. (2004). *Texto guia para la cátedra de mecánica de suelos*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ferreira, C. (2011). Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa (Tesis Doctoral). Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo, Brasil.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. España, Madrid: Pearson Educación.
- Huhsunqu. (4 de Febrero de 2010). *The Wikipedia Foundation*. Obtenido de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Peru_-_Jun%C3%ADn_Department_\(locator_map\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Peru_-_Jun%C3%ADn_Department_(locator_map).svg)
- Kyser, D., & Ravichandran, N. (2016). Properties of chipped rubber roofing membrane and sand mixtures for civil engineering applications. *Journal of Building Engineering*.
- Lambe, W., Whitman, R., & Jiménez, J. (2004). *Mecánica de Suelos*. Mexima: Limusa.
- Ley N° 27314 - Ley General de Residuos Sólidos. (21 de Abril de 2000). Lima, Perú: Diario oficial de bicentenario El Peruano.
- Montenegro, J. (2011). La compactación de suelos. *Civil Geeks*.
- Sagüés, P. (2007). Propiedades de los suelos compactados.

- Salas, O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. *Ensayos triaxiales para suelos*, 14 - 24.
- Shulman, V. L. (2004). *Tyre Recycling*. Reino Unido: Rapra.
- Terzagui, K., & Peck, R. (1986). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Caracas: EL ATENEO.
- UPC. (2015). *Resistencia al corte de los suelos (MSD)*. Lima.
- Van Beukering, P., & Janssen, M. (2001). Trade and recycling of used tyres in Western and Eastern Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 235-265.
- Villalaz, C. C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (5ª ed.). Ciudad de Mexico, Mexico: Limusa.

8. ANEXOS

ANEXO A: INFORME DE LABORATORIO CORTE DIRECTO S100

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de neumáticos inservibles
PROCEDENCIA neumáticos inservibles
REFERENCIA
FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018

MUESTRA : Suelo alterado
IDENTIFICACIÓN Suelo Natural
PROFUNDIDAD
CANTIDAD : 0.600 kg aprox
PRESENTACIÓN : Bolsa plástica
FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 10.Set.2018

NTP.339.171(2002)		MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS			
DESCRIPCIÓN DEL SUELO					
Clasificación SUCS	(NTP 339.134-1999)	-.-	Límite Líquido, %	(NTP 339.129-1999)	-.-
Clasificación AASHTO	(NTP 339.135-1999)	-.-	Límite Plástico, %	(NTP 339.129-1999)	-.-
Tamaño Máximo, mm	(NTP 400.012-2001)	-.-	Mat. < Tamiz N° 200 (0.074mm), %	(NTP 339.132-1999)	-.-
Consistencia	(NTP 339.150-2001)	-.-	Cementación	(NTP 339.150-2001)	-.-
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO					
DESCRIPCIÓN		(49,03 kPa)	(98,1 kPa)	(196,1 kPa)	
Diámetro	(cm)	6.270	6.270	6.270	
Área	(cm ²)	30.88	30.88	30.88	
Altura Inicial	(cm)	2.015	2.015	2.015	
Altura Final	(cm)	1.820	1.766	1.728	
Volumen Inicial	(cm ³)	62.22	62.22	62.22	
Volumen Final	(cm ³)	56.20	54.54	53.36	
Relación Diámetro / Altura		3.11	3.11	3.11	
Condición de la Estructura del Suelo		Alterado	Alterado	Alterado	
Peso Húmedo Inicial	(g)	141.40	141.40	141.40	
Peso Húmedo Final	(g)	136.59	134.91	133.76	
Peso Seco	(g)	129.47	129.43	129.43	
Humedad Inicial	(%) (NTP 339.127 - 1998)	9.2	9.2	9.2	
Humedad Final	(%) (NTP 339.127 - 1998)	5.5	4.2	3.3	
Densidad Húmeda Inicial	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	2.272	2.272	2.272	
Densidad Húmeda Final	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	2.430	2.474	2.507	
Densidad Seca Inicial	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	2.080	2.080	2.080	
Densidad Seca Final	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	2.303	2.374	2.426	
Condiciones Ambientales del Ensayo					
Temperatura Ambiente (°C)		25.6	Humedad Relativa (%)		55.9
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO					
Nombre		Equipo de Corte Directo Digital - ELE			
N° Serie		1627-6-1218	Modelo		D - 300 A - 4
Factor del Anillo de Corte		LD * 0.2969 + 4.481	Peso del Anillo Tallador (g)		66.00

Nota:

- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
- Maxima Densidad Seca (2.080 g/cm³) y O.C.H (9.2 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
- Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
- Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 10 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de

PROCEDENCIA neumáticos inservibles

REFERENCIA

FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018

MUESTRA : Suelo alterado

IDENTIFICACIÓN Suelo Natural

PROFUNDIDAD

CANTIDAD : 0.600 kg aprox

PRESENTACIÓN : Bolsa plástica

FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 10.Set.2018

NTP.339.171(2002)	MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS
--------------------------	--

Desplaz Horiz. (mm)	ESFUERZO NORMAL (49,03 kPa)				ESFUERZO NORMAL (98,1 kPa)				ESFUERZO NORMAL (196,1 kPa)			
	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)
0.00	1.618	0.0	0.00	0.00	2.019	0.0	0.00	0.00	2.466	0.0	0.00	0.00
0.25	1.661	2.0	5.07	16.12	2.078	5.0	5.97	18.94	2.497	23.0	11.31	35.92
0.50	1.702	4.0	5.67	18.00	2.144	14.0	8.64	27.43	2.560	42.0	16.95	53.83
0.75	1.765	7.0	6.56	20.83	2.230	21.0	10.72	34.03	2.624	54.0	20.51	65.15
1.00	1.803	9.0	7.15	22.72	2.289	26.0	12.20	38.75	2.687	60.0	22.30	70.80
1.25	1.842	11.0	7.75	24.60	2.332	31.0	13.68	43.46	2.725	70.0	25.26	80.23
1.50	1.877	13.0	8.34	26.49	2.388	35.0	14.87	47.23	2.758	80.0	28.23	89.66
1.75	1.905	15.0	8.93	28.37	2.408	39.0	16.06	51.00	2.784	88.0	30.61	97.20
2.00	1.923	16.0	9.23	29.32	2.436	42.0	16.95	53.83	2.807	95.0	32.69	103.80
2.25	1.935	17.0	9.53	30.26	2.449	44.0	17.54	55.72	2.822	99.0	33.87	107.57
2.50	1.951	17.0	9.53	30.26	2.459	45.0	17.84	56.68	2.832	101.0	34.47	109.46
2.75					2.474	46.0	18.14	57.60	2.845	102.0	34.76	110.40
3.00					2.489	46.0	18.14	57.60	2.852	103.0	35.06	111.35
3.25									2.860	104.0	35.36	112.29
3.50									2.870	104.0	35.36	112.29
Velocidad de Deformación**	0.104 mm/min.				0.104 mm/min.				0.104 mm/min.			

**Ensayo realizado despues de la consolidación primaria.

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (2.080 g/cm³) y O.C.H (9.2 %), del solicitante y peso especifico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 10 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO

MUESTRA : Suelo alterado
IDENTIFICACIÓN : Suelo Natural
PROFUNDIDAD

PROCEDENCIA

CANTIDAD : 0.600 kg aprox

REFERENCIA

PRESENTACIÓN : Bolsa plástica

FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018

FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 10.Set.2018

NTP.339.171(2002)

MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kPa)	2.9	kg/cm ²	0.030
ÁNGULO DE FRICCIÓN (ϕ)	28.7°		

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (2.080 g/cm³) y O.C.H (9.2 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 10 de Setiembre del 2018

ANEXO B: INFORME DE LABORATORIO S95/C5

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO	Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de neumáticos inservibles	MUESTRA IDENTIFICACIÓN	: Suelo alterado Suelo+Caucho 5%
PROCEDENCIA		PROFUNDIDAD	
REFERENCIA		CANTIDAD	: 3.20 kg aprox
FECHA DE RECEPCIÓN	: 07-Set-2018	PRESENTACIÓN	: Envuelta en papel de envalaje
		FECHA DE ENSAYO	: 07-Set al 11.Set.2018

NTP.339.171(2002) MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

DESCRIPCIÓN DEL SUELO				
Clasificación SUCS	(NTP 339.134-1999)	..	Límite Líquido, %	(NTP 339.129-1999) ..
Clasificación AASHTO	(NTP 339.135-1999)	..	Límite Plástico, %	(NTP 339.129-1999) ..
Tamaño Máximo, mm	(NTP 400.012-2001)	..	Mat. < Tamiz N° 200 (0.074mm), %	(NTP 339.132-1999) ..
Consistencia	(NTP 339.150-2001)	..	Cementación	(NTP 339.150-2001) ..
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO				
DESCRIPCIÓN		(49,03 kPa)	(98,1 kPa)	(196,1 kPa)
Diámetro	(cm)	6.270	6.270	6.270
Área	(cm ²)	30.88	30.88	30.88
Altura Inicial	(cm)	2.015	2.015	2.015
Altura Final	(cm)	1.852	1.823	1.725
Volumen Inicial	(cm ³)	62.22	62.22	62.22
Volumen Final	(cm ³)	57.19	56.29	53.26
Relación Diámetro / Altura		3.11	3.11	3.11
Condición de la Estructura del Suelo		Alterado	Alterado	Alterado
Peso Húmedo Inicial	(g)	125.20	125.20	125.20
Peso Húmedo Final	(g)	127.54	126.70	123.65
Peso Seco	(g)	113.37	113.37	113.37
Humedad Inicial	(%) (NTP 339.127 - 1998)	10.4	10.4	10.4
Humedad Final	(%) (NTP 339.127 - 1998)	12.5	11.8	9.07
Densidad Húmeda Inicial	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	2.012	2.012	2.012
Densidad Húmeda Final	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	2.230	2.251	2.322
Densidad Seca Inicial	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	1.822	1.822	1.822
Densidad Seca Final	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	1.982	2.014	2.129
Condiciones Ambientales del Ensayo				
Temperatura Ambiente (°C)		21.3	Humedad Relativa (%)	67.1
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO				
Nombre	Equipo de Corte Directo Digital - ELE			
N° Serie	1627-6-1218	Modelo	D - 300 A - 4	
Factor del Anillo de Corte	LD * 0.2969 + 4.481	Peso del Anillo Tallador (g)	66.00	

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (1.824 g/cm³) y O.C.H (10.4 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO	Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de neumáticos	MUESTRA IDENTIFICACIÓN	: Suelo alterado Suelo+Caucho 5%
PROCEDENCIA		PROFUNDIDAD	
REFERENCIA		CANTIDAD	: 3.20 kg aprox
FECHA DE RECEPCIÓN	: 07-Set-2018	PRESENTACIÓN	: Envuelta en papel de envalaje
		FECHA DE ENSAYO	: 07-Set al 11.Set.2018

NTP.339.171(2002)

MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

Desplaz Horiz. (mm)	ESFUERZO NORMAL (49,03 kPa)				ESFUERZO NORMAL (98,1 kPa)				ESFUERZO NORMAL (196,1 kPa)			
	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)
0.00	1.565	0.0	0.00	0.00	1.849	0.0	0.00	0.00	2.786	0.0	0.00	0.00
0.25	1.590	3.0	5.37	17.06	1.875	15.0	8.93	28.37	2.809	28.0	12.79	40.63
0.50	1.610	8.0	6.86	21.77	1.897	27.0	12.50	39.69	2.852	58.0	21.70	68.92
0.75	1.623	14.0	8.64	27.43	1.915	37.0	15.47	49.12	2.878	77.0	27.34	86.83
1.00	1.631	17.0	9.53	30.26	1.920	44.0	17.54	55.72	2.903	92.0	31.80	100.97
1.25	1.631	20.0	10.42	33.09	1.920	50.0	19.33	61.37	2.896	109.0	36.84	117.00
1.50	1.626	22.0	11.01	34.97	1.920	54.0	20.51	65.15	2.883	117.0	39.22	124.55
1.75	1.618	23.0	11.31	35.92	1.913	57.0	21.40	67.97	2.870	125.0	41.59	132.09
2.00	1.608	24.0	11.61	36.86	1.900	60.0	22.30	70.80	2.863	128.0	42.48	134.92
2.25	1.600	24.0	11.61	36.86	1.885	61.0	22.59	71.75	2.847	131.0	43.37	137.75
2.50					1.875	62.0	22.89	72.69	2.847	134.0	44.27	140.58
2.75					1.864	63.0	23.19	73.63	2.845	135.0	44.56	141.52
3.00					1.854	63.0	23.19	73.63	2.845	136.0	44.86	142.46
3.25									2.842	136.0	44.86	142.46
Velocidad de Deformación**	0.102 mm/min.				0.102 mm/min.				0.102 mm/min.			

**Ensayo realizado despues de la consolidación primaria.

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (1.824 g/cm³) y O.C.H (10.4 %), del solicitante y peso especifico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO

Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de

PROCEDENCIA

REFERENCIA

FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018

MUESTRA

: Suelo alterado

IDENTIFICACIÓN

Suelo+Caucho 5%

PROFUNDIDAD

CANTIDAD

: 3.20 kg aprox

PRESENTACIÓN

: Envuelta en papel de envoltaje

FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 11.Set.2018

NTP.339.171(2002)

MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kPa)	2.4	kg/cm ²	0.025
ÁNGULO DE FRICCIÓN (ϕ)	35.1°		

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (1.824 g/cm³) y O.C.H (10.4 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

ANEXO C: ENSAYOS DE LABORATORIO DE CORTE DIRECTO S90/C10

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO: Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de neumáticos inservibles

PROCEDENCIA: REFERENCIA

FECHA DE RECEPCIÓN: 07-Set-2018

MUESTRA: Suelo alterado

IDENTIFICACIÓN: Suelo+Caucho 10%

PROFUNDIDAD: CANTIDAD: 0.600 kg aprox

PRESENTACIÓN: Bolas plásticas

FECHA DE ENSAYO: 07-Set al 11-Set.2018

NTP.339.171(2002) MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

DESCRIPCIÓN DEL SUELO				
Clasificación SUCS	(NTP 339.134-1999)	-.-	Límite Líquido, %	(NTP 339.129-1999) -.-
Clasificación AASHTO	(NTP 339.135-1999)	-.-	Límite Plástico, %	(NTP 339.129-1999) -.-
Tamaño Máximo, mm	(NTP 400.012-2001)	-.-	Mat. < Tamiz N° 200 (0.074mm), %	(NTP 339.132-1999) -.-
Consistencia	(NTP 339.150-2001)	-.-	Cementación	(NTP 339.150-2001) -.-
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO				
DESCRIPCIÓN		(49,03 kPa)	(98,1 kPa)	(196,1 kPa)
Diámetro (cm)		6.270	6.270	6.270
Área (cm ²)		30.88	30.88	30.88
Altura Inicial (cm)		2.015	2.015	2.015
Altura Final (cm)		1.822	1.710	1.685
Volumen Inicial (cm ³)		62.22	62.22	62.22
Volumen Final (cm ³)		56.26	52.81	52.03
Relación Diámetro / Altura		3.11	3.11	3.11
Condición de la Estructura del Suelo		Alterado	Alterado	Alterado
Peso Húmedo Inicial (g)		116.60	116.60	116.60
Peso Húmedo Final (g)		122.73	119.24	118.44
Peso Seco (g)		106.90	106.92	106.92
Humedad Inicial (%)	(NTP 339.127 - 1998)	9.1	9.1	9.1
Humedad Final (%)	(NTP 339.127 - 1998)	14.8	11.5	10.77
Densidad Húmeda Inicial (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.874	1.874	1.874
Densidad Húmeda Final (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	2.181	2.258	2.277
Densidad Seca Inicial (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.718	1.718	1.718
Densidad Seca Final (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.900	2.025	2.056
Condiciones Ambientales del Ensayo				
Temperatura Ambiente (°C)		21.5	Humedad Relativa (%)	67.0
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO				
Nombre	Equipo de Corte Directo Digital - ELE			
N° Serie	1627-6-1218	Modelo	D - 300 A - 4	
Factor del Anillo de Corte	LD * 0.2969 + 4.481	Peso del Anillo Tallador (g)	66.00	

Nota:

- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
- Maxima Densidad Seca (1.718 g/cm³) y O.C.H (9.1 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
- Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
- Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO PROCEDENCIA REFERENCIA FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018	Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de neumáticos inservibles	MUESTRA : Suelo alterado IDENTIFICACIÓN : Suelo+Caucho 10% PROFUNDIDAD CANTIDAD : 0.600 kg aprox PRESENTACIÓN : Bolsa plástica FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 11.Set.2018
---	---	---

NTP.339.171(2002)

MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

DESCRIPCIÓN DEL SUELO				
Clasificación SUCS	(NTP 339.134-1999)	..	Límite Líquido, %	(NTP 339.129-1999) ..
Clasificación AASHTO	(NTP 339.135-1999)	..	Límite Plástico, %	(NTP 339.129-1999) ..
Tamaño Máximo, mm	(NTP 400.012-2001)	..	Mat. < Tamiz N° 200 (0.074mm), %	(NTP 339.132-1999) ..
Consistencia	(NTP 339.150-2001)	..	Cementación	(NTP 339.150-2001) ..
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO				
DESCRIPCIÓN		(49,03 kPa)	(98,1 kPa)	(196,1 kPa)
Diámetro	(cm)	6.270	6.270	6.270
Área	(cm ²)	30.88	30.88	30.88
Altura Inicial	(cm)	2.015	2.015	2.015
Altura Final	(cm)	1.822	1.710	1.685
Volumen Inicial	(cm ³)	62.22	62.22	62.22
Volumen Final	(cm ³)	56.26	52.81	52.03
Relación Diámetro / Altura		3.11	3.11	3.11
Condición de la Estructura del Suelo		Alterado	Alterado	Alterado
Peso Húmedo Inicial	(g)	116.60	116.60	116.60
Peso Húmedo Final	(g)	122.73	119.24	118.44
Peso Seco	(g)	106.90	106.92	106.92
Humedad Inicial	(%) (NTP 339.127 - 1998)	9.1	9.1	9.1
Humedad Final	(%) (NTP 339.127 - 1998)	14.8	11.5	10.77
Densidad Húmeda Inicial	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	1.874	1.874	1.874
Densidad Húmeda Final	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	2.181	2.258	2.277
Densidad Seca Inicial	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	1.718	1.718	1.718
Densidad Seca Final	(g/cm ³) (NTP 339.139 - 1999)	1.900	2.025	2.056
Condiciones Ambientales del Ensayo				
Temperatura Ambiente (°C)		21.5	Humedad Relativa (%)	67.0
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO				
Nombre	Equipo de Corte Directo Digital - ELE			
N° Serie	1627-6-1218	Modelo	D - 300 A - 4	
Factor del Anillo de Corte	LD * 0.2969 + 4.481	Peso del Anillo Tallador (g)	66.00	

Nota:

- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
- Maxima Densidad Seca (1.718 g/cm³) y O.C.H (9.1 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
- Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
- Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO

**Estudio experimental del comportamiento
mecánico-geotécnico de un suelo granular con
adición de caucho reciclado proveniente de**

PROCEDENCIA

REFERENCIA

FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018

MUESTRA

IDENTIFICACIÓN

PROFUNDIDAD

CANTIDAD

PRESENTACIÓN

FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 11.Set.2018

: Suelo alterado

Suelo+Caucho 10%

: 0.600 kg aprox

: Bolasa plástica

NTP.339.171(2002)

**MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO
DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS**

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kPa)	0.6	kg/cm ²	0.006
ÁNGULO DE FRICCIÓN (ϕ)	33.2°		

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (1.718 g/cm³) y O.C.H (9.1 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

ANEXO D: ENSAYOS DE LABORATORIO DE CORTE DIRECTO S85/C15

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO	Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de neumáticos inservibles	MUESTRA	: Suelo alterado
PROCEDENCIA		IDENTIFICACIÓN	: Suelo+Caucho 15%
REFERENCIA		PROFUNDIDAD	
FECHA DE RECEPCIÓN	: 07-Set-2018	CANTIDAD	: 0.600 kg aprox
		PRESENTACIÓN	: Bolsa plástica
		FECHA DE ENSAYO	: 07-Set al 11.Set.2018

NTP.339.171(2002) MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

DESCRIPCIÓN DEL SUELO				
Clasificación SUCS	(NTP 339.134-1999)	-.-	Límite Líquido, %	(NTP 339.129-1999) -.-
Clasificación AASHTO	(NTP 339.135-1999)	-.-	Límite Plástico, %	(NTP 339.129-1999) -.-
Tamaño Máximo, mm	(NTP 400.012-2001)	-.-	Mat. < Tamiz N° 200 (0.074mm), %	(NTP 339.132-1999) -.-
Consistencia	(NTP 339.150-2001)	-.-	Cementación	(NTP 339.150-2001) -.-
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO				
DESCRIPCIÓN		(49,03 kPa)	(98,1 kPa)	(196,1 kPa)
Diámetro (cm)		6.270	6.270	6.270
Área (cm ²)		30.88	30.88	30.88
Altura Inicial (cm)		2.015	2.015	2.015
Altura Final (cm)		1.729	1.691	1.623
Volumen Inicial (cm ³)		62.22	62.22	62.22
Volumen Final (cm ³)		53.40	52.22	50.11
Relación Diámetro / Altura		3.11	3.11	3.11
Condición de la Estructura del Suelo		Alterado	Alterado	Alterado
Peso Húmedo Inicial (g)		108.30	108.30	108.30
Peso Húmedo Final (g)		115.20	113.94	111.81
Peso Seco (g)		99.46	99.46	99.44
Humedad Inicial (%)	(NTP 339.127 - 1998)	8.9	8.9	8.9
Humedad Final (%)	(NTP 339.127 - 1998)	15.8	14.6	12.44
Densidad Húmeda Inicial (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.741	1.741	1.741
Densidad Húmeda Final (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	2.157	2.182	2.231
Densidad Seca Inicial (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.599	1.599	1.599
Densidad Seca Final (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.862	1.905	1.984
Condiciones Ambientales del Ensayo				
Temperatura Ambiente (°C)		21.1	Humedad Relativa (%)	67.2
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO				
Nombre	Equipo de Corte Directo Digital - ELE			
N° Serie	1627-6-1218	Modelo	D - 300 A - 4	
Factor del Anillo de Corte	LD * 0.2969 + 4.481	Peso del Anillo Tallador (g)	66.00	

- Nota:
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (1.599 g/cm³) y O.C.H (8.9 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO	Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado	MUESTRA	: Suelo alterado
		IDENTIFICACIÓN	Suelo+Caucho 15%
		PROFUNDIDAD	
PROCEDENCIA		CANTIDAD	: 0.600 kg aprox
REFERENCIA		PRESENTACIÓN	: Bolsa plástica
FECHA DE RECEPCIÓN	: 07-Set-2018	FECHA DE ENSAYO	: 07-Set al 11.Set.2018

NTP.339.171(2002)

MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

Desplaz Horiz. (mm)	ESFUERZO NORMAL (49,03 kPa)				ESFUERZO NORMAL (98,1 kPa)				ESFUERZO NORMAL (196,1 kPa)			
	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)
0.00	2.692	0.0	0.00	0.00	2.974	0.0	0.00	0.00	3.668	0.0	0.00	0.00
0.25	2.748	2.0	5.07	16.12	3.000	6.0	6.26	19.89	3.713	28.0	12.79	40.63
0.50	2.797	6.0	6.26	19.89	3.053	12.0	8.04	25.54	3.772	47.0	18.44	58.55
0.75	2.827	10.0	7.45	23.66	3.117	19.0	10.12	32.15	3.807	59.0	22.00	69.86
1.00	2.842	12.0	8.04	25.54	3.139	25.0	11.90	37.80	3.830	67.0	24.37	77.40
1.25	2.852	15.0	8.93	28.37	3.175	30.0	13.39	42.52	3.853	76.0	27.05	85.89
1.50	2.855	17.0	9.53	30.26	3.200	35.0	14.87	47.23	3.871	82.0	28.83	91.55
1.75	2.858	19.0	10.12	32.15	3.226	39.0	16.06	51.00	3.896	88.0	30.61	97.20
2.00	2.858	20.0	10.42	33.09	3.236	43.0	17.25	54.77	3.904	94.0	32.39	102.86
2.25	2.858	21.0	10.72	34.03	3.239	46.0	18.14	57.60	3.907	99.0	33.87	107.57
2.50	2.858	22.0	11.01	34.97	3.239	48.0	18.73	59.49	3.909	104.0	35.36	112.29
2.75	2.858	22.0	11.01	34.97	3.233	50.0	19.33	61.37	3.912	106.0	35.95	114.18
3.00					3.228	51.0	19.62	62.32	3.914	107.0	36.25	115.12
3.25					3.223	52.0	19.92	63.26	3.917	108.0	36.55	116.06
3.50					3.218	52.0	19.92	63.26	3.919	109.0	36.84	117.00
3.75									3.922	109.0	36.84	117.00
Velocidad de Deformación**	0.102 mm/min.				0.102 mm/min.				0.102 mm/min.			

**Ensayo realizado despues de la consolidación primaria.

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (1.599 g/cm³) y O.C.H (8.9 %), del solicitante y peso especifico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO

**Estudio experimental del comportamiento
mecánico-geotécnico de un suelo granular con
adición de caucho reciclado proveniente de**

MUESTRA

: Suelo alterado

IDENTIFICACION

Suelo+Caucho 15%

PROFUNDIDAD

CANTIDAD

: 0.600 kg aprox

PRESENTACIÓN

: Bolsa plástica

PROCEDENCIA

REFERENCIA

FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018

FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 11.Set.2018

NTP.339.171(2002)

**MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO
DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS**

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kPa)	8.1	kg/cm ²	0.083
ÁNGULO DE FRICCIÓN (ϕ)		28.6°	

Nota:

- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
- Maxima Densidad Seca (1.599 g/cm³) y O.C.H (8.9 %), del solicitante y peso específico de 2.331.
- Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
- Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

ANEXO E: ENSAYOS DE LABORATORIO DE CORTE DIRECTO S80/C20

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO : Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado proveniente de neumáticos inservibles
MUESTRA : Suelo alterado
IDENTIFICACIÓN : Suelo+Caucho 20%
PROFUNDIDAD :
CANTIDAD : 0.600 kg aprox
PRESENTACIÓN : Bolsa plástica
FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018
FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 11.Set.2018

NTP.339.171(2002) MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

DESCRIPCIÓN DEL SUELO				
Clasificación SUCS	(NTP 339.134-1999)	-.-	Límite Líquido, %	(NTP 339.129-1999) -.-
Clasificación AASHTO	(NTP 339.135-1999)	-.-	Límite Plástico, %	(NTP 339.129-1999) -.-
Tamaño Máximo, mm	(NTP 400.042-2001)	-.-	Mat. < Tamiz N° 200 (0.074mm), %	(NTP 339.132-1999) -.-
Consistencia	(NTP 339.150-2001)	-.-	Cementación	(NTP 339.150-2001) -.-
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO				
DESCRIPCIÓN		(49,03 kPa)	(98,1 kPa)	(196,1 kPa)
Diámetro (cm)		6.270	6.270	6.270
Área (cm ²)		30.88	30.88	30.88
Altura Inicial (cm)		2.015	2.015	2.015
Altura Final (cm)		1.758	1.663	1.555
Volumen Inicial (cm ³)		62.22	62.22	62.22
Volumen Final (cm ³)		54.29	51.35	48.01
Relación Diámetro / Altura		3.11	3.11	3.11
Condición de la Estructura del Suelo		Alterado	Alterado	Alterado
Peso Húmedo Inicial (g)		101.90	101.90	101.90
Peso Húmedo Final (g)		112.80	109.76	106.49
Peso Seco (g)		94.10	94.10	94.13
Humedad Inicial (%)	(NTP 339.127 - 1998)	8.3	8.3	8.3
Humedad Final (%)	(NTP 339.127 - 1998)	19.9	16.7	13.13
Densidad Húmeda Inicial (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.638	1.638	1.638
Densidad Húmeda Final (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	2.078	2.137	2.218
Densidad Seca Inicial (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.513	1.513	1.513
Densidad Seca Final (g/cm ³)	(NTP 339.139 - 1999)	1.734	1.832	1.961
Condiciones Ambientales del Ensayo				
Temperatura Ambiente (°C)		21.1	Humedad Relativa (%)	67.8
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO				
Nombre	Equipo de Corte Directo Digital - ELE			
N° Serie	1627-6-1218	Modelo	D - 300 A - 4	
Factor del Anillo de Corte	LD * 0.2969 + 4.481	Peso del Anillo Tallador (g)	66.00	

Nota: - Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 -Maxima Densidad Seca (1.513 g/cm³) y O.C.H (8.3%), del solicitante y peso específico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO

Estudio experimental del comportamiento mecánico-geotécnico de un suelo granular con adición de caucho reciclado

PROCEDENCIA

REFERENCIA

FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018

MUESTRA

IDENTIFICACIÓN

PROFUNDIDAD

CANTIDAD

PRESENTACIÓN

FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 11.Set.2018

: Suelo alterado

Suelo+ Caucho 20%

: 0.600 kg aprox

: Bolsa plástica

NTP.339.171(2002)

MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

Desplaz Horiz. (mm)	ESFUERZO NORMAL (49,03 kPa)				ESFUERZO NORMAL (98,1 kPa)				ESFUERZO NORMAL (196,1 kPa)			
	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz Vert. (mm)	Lect. Dial Fuerza	Fuerza (kg)	Esfuerzo Corte (kPa)
0.00	2.322	0.0	0.00	0.00	3.299	0.0	0.00	0.00	4.318	0.0	0.00	0.00
0.25	2.342	2.0	5.07	16.12	3.350	11.0	7.75	24.60	4.369	30.0	13.39	42.52
0.50	2.360	5.0	5.97	18.94	3.383	20.0	10.42	33.09	4.409	43.0	17.25	54.77
0.75	2.395	9.0	7.15	22.72	3.419	25.0	11.90	37.80	4.445	53.0	20.22	64.20
1.00	2.443	11.0	7.75	24.60	3.442	28.0	12.79	40.63	4.468	61.0	22.59	71.75
1.25	2.474	13.0	8.34	26.49	3.462	32.0	13.98	44.40	4.491	68.0	24.67	78.35
1.50	2.555	14.0	8.64	27.43	3.472	34.0	14.58	46.29	4.511	74.0	26.45	84.00
1.75	2.570	14.0	8.64	27.43	3.480	36.0	15.17	48.17	4.526	80.0	28.23	89.66
2.00					3.482	39.0	16.06	51.00	4.547	87.0	30.31	96.26
2.25					3.490	41.0	16.65	52.89	4.557	91.0	31.50	100.03
2.50					3.498	42.0	16.95	53.83	4.569	95.0	32.69	103.80
2.75					3.505	43.0	17.25	54.77	4.575	97.0	33.28	105.69
3.00					3.513	44.0	17.54	55.72	4.582	99.0	33.87	107.57
3.25					3.520	44.0	17.54	55.72	4.590	101.0	34.47	109.46
3.50									4.597	102.0	34.76	110.40
3.75									4.602	102.0	34.76	110.40
Velocidad de Deformación**	0.102 mm/min.				0.102 mm/min.				0.102 mm/min.			

**Ensayo realizado despues de la consolidación primaria.

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (1.513 g/cm³) y O.C.H (8.3%), del solicitante y peso específico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

INFORME DE ENSAYO N° 000 - 2018

PROYECTO

**Estudio experimental del comportamiento
mecánico-geotécnico de un suelo granular con
adición de caucho reciclado proveniente de**

PROCEDENCIA

REFERENCIA

FECHA DE RECEPCIÓN : 07-Set-2018

MUESTRA

IDENTIFICACIÓN

PROFUNDIDAD

CANTIDAD

PRESENTACIÓN

FECHA DE ENSAYO : 07-Set al 11.Set.2018

: Suelo alterado

Suelo+Caucho 20%

: 0.600 kg aprox

: Bolsa plástica

NTP.339.171(2002)

MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE SUELOS BAJO CONDICIONES CONSOLIDADAS DRENADAS

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kPa)	0.1	kg/cm ²	0.001
ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	28.9°		

- Nota:**
- Muestra alterada, muestreada e identificada por el solicitante.
 - Maxima Densidad Seca (1.513 g/cm³) y O.C.H (8.3%), del solicitante y peso específico de 2.331.
 - Muestra ensayada con material pasante el tamiz N° 4.
 - Este documento no autoriza el empleo de los materiales analizados; siendo la interpretación del mismo de exclusiva responsabilidad del usuario.

Lima, 11 de Setiembre del 2018

ANEXO F: ENSAYOS DE LABORATORIO TRIAXIAL

S100

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS
 ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL CONSOLIDADO - NO DRENADO ASTM D - 4767
 0

Solicitante :	
Proyecto :	
Ubicación :	
Calicata : SIN CAUHO	Profundidad (m): -
Fecha : La Molina, 15 Julio del 2015	
Angulo fricción interna de esfuerzo normal	: 31.53 °
Angulo fricción interna de esfuerzo efectivo	: 34.50 °
Cohesión Aparente de esfuerzo normal	: 0.35 kg/cm ²
Cohesión Aparente de esfuerzo efectivo	: 0.00 kg/cm ²
Densidad Promedio (γ_d) Remoldeado	: 2.08 gr/cm ³
Densidad Promedio (γ_d) Consolidada	: 2.10 gr/cm ³
Humedad Natural	: 9.20 %

ANEXO G: ENSAYO DE LABORATORIO TRIAXIAL

S95/C5

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS
 ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL CONSOLIDADO - NO DRENADO ASTM D - 4767
 0

Solicitante :	
Proyecto :	
Ubicación :	
Calicata : MEZCLA SUELO CON CAUCHO	Profundidad (m): -
Fecha : La Molina,	
Angulo fricción interna de esfuerzo normal	: 24.59 °
Angulo fricción interna de esfuerzo efectivo	: 29.40 °
Cohesión Aparente de esfuerzo normal	: 0.75 kg/cm ²
Cohesión Aparente de esfuerzo efectivo	: 0.40 kg/cm ²
Densidad Promedio (γ_d) Remoldeado	: 1.82 gr/cm ³
Densidad Promedio (γ_d) Consolidada	: 1.85 gr/cm ³
Humedad Natural	: 10.40 %

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS
ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL CONSOLIDADO - NO DRENADO ASTM D - 4767
0

Solicitante :	
Proyecto :	
Ubicación :	
Calicata : MEZCLA SUELO CON CAUCHO	
Muestra :	Profundidad (m): -
Fecha : La Molina,	

ESPECIMEN		:	A	B	C
Peso Suelo	gr	:	1026	1026	1026
Densidad Seca	gr/cm ³	:	1.820	1.820	1.820
Contenido de Humedad	%	:	10.40	10.40	10.40
Condiciones Iniciales del espécimen					
Esfuerzo Confinante	Kg/cm ²	:	1.00	2.00	4.00
Diametro Promedio	cm		7.11	7.11	7.11
Altura	cm		14.20	14.20	14.20
Area	cm ²		39.70	39.70	39.70
Volumen	cm ³		563.8	563.8	563.8
Peso Especifico de Sólidos			2.720	2.720	2.720
Volumen de Sólidos	Ws/Gs		377.21	377.21	377.21
Relacion de Vacios	(Pe/γ _{ns nat})-1		0.495	0.495	0.495
Humedad Inicial	%		10.40	10.40	10.40
Condiciones despues dela Consolidación					
Altura final	cm		14.14	14.11	14.08
Cambio de Altura	cm		0.06	0.09	0.12
Diametro final	cm		7.03	6.78	6.77
Altura Consolidada	cm		14.14	14.11	14.08
Area Consolidada	cm ²		39.37	39.20	39.03
Volumen Consolidada	cm ³		556.7	553.1	549.6
Relacion de vacios Consolidada			0.48	0.47	0.46
Densidad Consolidada	gr/cm ³		1.843	1.855	1.867

Observacion: