UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Estudio experimental del efecto en el comportamiento mecánico al adicionar caucho
triturado en un suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del caserío de Callampampa
- Llama–Cajamarca.

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Alvarez Benites, Nicols Cristina (0000-0002-8835-932X)

Gutierrez Gallegos, Julio Alvaro (0000-0002-7545-3755)

ASESOR

Pacheco Miranda, Lidia (0000-0002-5524-5182)

Lima, 10 de Julio del 2020

DEDICATORIA

*La presente investigación está dedicada a todas aquellas personas que me acompañaron a
largo de mi vida universitaria.*

*Con el mayor cariño y respeto a mis padres, por todo su apoyo incondicional y por su
motivación para lograr alzar vuelo y no conocer jamás mis horizontes, para que allá
donde brille una estrella yo apunte mis ideas.*

*Para mis hermanos por ser mi inspiración cada día, para así mirar siempre hacia
adelante y brindarles todo lo que esta vida me pueda dar y aún más.*

*A Martín Vega, mi fiel escudero, por ser un gran amigo siempre durante toda esta etapa y
por ser ese soporte que me apoyó e impulsó a pesar de la adversidad.*

Nicols C. Alvarez Benites.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis especialmente a Dios por darme la fuerza necesaria para poder cumplir mis objetivos y anteponerme ante las adversidades.

A mis padres Julio y Ledy, por ser los guías de mi camino, mi ejemplo de fortaleza y perseverancia.

A mi abuelo Luis, por ser la persona que en todos estos años de formación académica estuvo conmigo en los buenos y malos momentos. Por los consejos de vida y no dejar que jamás me dé por vencido. Gracias de todo corazón.

A todas aquellas personas que me impulsaron siempre, y confiaron en mí, por su paciencia, por escucharme, por ayudarme y enseñar a no rendirme. Gracias por su apoyo.

Julio A. Gutierrez Gallegos

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros asesores, a los ingenieros Gary Duran Ramírez y Lidia Pacheco Miranda quienes desde inicio a fin de la tesis compartieron sus conocimientos brindándonos herramientas que nos sirvieron para la elaboración de la presente investigación. También, les agradecemos por las oportunidades y confianza brindada.

A la empresa Pavimentos Deportivos S.A.C. por brindarnos su tiempo, especialmente al señor Miguel Valdez gerente de la empresa quien amablemente compartió información sobre el rubro del reciclaje de los neumáticos fuera de uso y el proceso que se utiliza para obtener la materia prima que se utilizó en la investigación.

A nuestros padres, por el apoyo monetario y emocional para poder concluir esta investigación.

RESUMEN

La presente investigación presenta la influencia en el comportamiento mecánico de un suelo proveniente del Caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca al adicionar caucho triturado. Este suelo es arcilloso de baja plasticidad y sus parámetros físicos fueron determinados con los ensayos, tales como Análisis Granulométrico por medio del Hidrómetro (MTC E 109 - 2016) y por Tamizado (MTC E 107 -2016, NTP 339.128) y la determinación del Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad (NTP 339.129).

El ensayo de Proctor Modificado (NTP 339.141), Corte Directo (NTP 339.171) se realizó como parte de la metodología con el fin de conocer los parámetros mecánicos de las muestras y explicar la influencia que causa el caucho triturado en la resistencia al esfuerzo de corte, la cohesión, ángulo de fricción, etc. Las muestras ensayadas fueron la del suelo natural (S100) y las mezclas con adición de caucho triturado en un 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5%. Los resultados obtenidos indican que la densidad seca máxima que ofrece la mezcla adicionada con 3.5% de caucho triturado (S100/C3.5) se incrementa en un 1.76%, el contenido de humedad óptimo disminuye en un 5.75%, la resistencia al esfuerzo de corte se incrementa en un 35.2%, la cohesión aumenta en un 64% y el ángulo de fricción disminuye en un 9.1% respecto a la muestra S100. Por otro lado, para el ensayo de CBR (NTP 339.145) se tomó en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos de Proctor Modificado para hallar los parámetros del suelo al esfuerzo de penetración y ver la viabilidad como terreno para una subrasante. Los porcentajes fueron 1.5%, 2.5% y 3.5% cuyos resultados son comparados respecto al suelo natural (S100). Los resultados obtenidos a 2mm de penetración con un 95% de M.D.S fue para un S100 de 3.3% y con la mezcla de S100/C3.5 se incrementa a 9.4%. En conclusión, el suelo arcilloso de baja plasticidad mejora sus propiedades mecánicas cuando se le adiciona caucho triturado.

Palabras Claves: Suelo arcilloso, Caucho, Corte Directo, Proctor Modificado, Plasticidad, Propiedades Mecánicas, Suelo Reforzado, CBR

Experimental study of the effect on mechanical behavior by adding recycled rubber in a clay soil of low plasticity in the Caserío Callampampa - Llama - Cajamarca.

ABSTRACT

The present investigation presents the influence on the mechanical behavior of a soil from the Caserio de Callampampa, Llama, Cajamarca by adding powder rubber. This soil is low plasticity clay and its physical parameters were determined with the tests, such as Granulometric Analysis by means of the Hydrometer (MTC E 109-2016) and by Screening (MTC E 107-2016, NTP 339.128) and the determination of the Limit Liquid, Plastic Limit and Plasticity Index (NTP 339.129).

The Modified Proctor (NTP 339.141) and Shear Box (NTP 339.171) test was performed as part of the methodology in order to know the mechanical parameters of the samples and explain the influence caused by the crushed rubber in the shear strength, cohesion, friction angle, etc. The samples tested were that of natural soil (S100) and mixtures with the addition of crushed rubber at 0.5%, 1.5%, 2.5% and 3.5%. The results obtained indicate that the maximum dry density offered by the S100 / C3.5 mixture is increased by 1.76% with respect to the S100 sample and the optimum moisture content decreases by 5.75%. Likewise, the resistance to shear stress offered by the S100 / C3.5 mixture is increased by 35.2% compared to the S100 sample, cohesion increases by 64% and the friction angle decreases by 9.1%. On the other hand, for the CBR test the results obtained in the Modified Proctor tests will be required to find the parameters of the soil at the shear strength and see the viability as a terrain for a subgrade. The percentages were 1.5%, 2.5% and 3.5% whose results are compared with respect to natural soil. The results obtained from the 2 mm CBR of penetration with 95% of M.D.S was for an S100 of 3.3% and with the mixture of S100 / C3.5 it was increased to 9.4%. In conclusion, the clay floor of low plasticity improves its mechanical properties when crushed rubber is added.

Keywords: Clay soil, Rubber, Shear Box, Modified Proctor, Plasticity, Mechanical Properties, Reinforced Soil, CBR

CONTENIDO

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	2
ESTADO DEL ARTE.	2
OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	5
Objetivos Generales.	5
Objetivos Específicos.	5
Hipótesis.	5
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	6
1.1 SUELO ARCILLOSO.	6
1.2 RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO ARCILLOSO.	7
1.2.1 Ensayo de corte directo.	8
1.3 INTERACCIÓN SUELO – PARTÍCULA	10
1.3.1 Granulometría de los suelos	11
1.4 INFLUENCIA DE LA COMPACTACIÓN EN EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO	12
1.4.1 Ensayo de Compactación.	12
1.4.2 Energía de compactación.	14
1.5 PAVIMENTOS	15
1.5.1 Pavimentos Flexibles.	16
1.6 NEUMÁTICO EN DESUSO.	18
1.6.2 Ciclo de vida de los Neumáticos	22
1.6.3 Proceso de transformación de los neumáticos en desuso a caucho triturado ..	22
1.6.4 Materia prima obtenida de los neumáticos en desuso	25
CAPITULO 2: METODOLOGÍA	29
2.1 MATERIALES	29
2.1.1 Suelo arcilloso	29
2.1.2 Caucho Triturado.	30
2.1.3 Mezcla de Suelo arcilloso con Caucho Triturado.	30
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.	31
2.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS.	32
2.2.1 Ensayos de Caracterización Física.	32
2.2.2 Ensayos de Caracterización Mecánica.	33

CAPITULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	36
3.1 ENSAYOS FÍSICOS	36
3.1.1 Caracterización Física del Caucho Triturado	36
3.1.2 Caracterización Física del Suelo.	41
3.1.3 Caracterización Física del Suelo + Caucho Triturado.	43
3.1.4 Caracterización Mecánica del Suelo.....	49
CAPITULO 4: CONCLUSIONES.....	75
CAPITULO 5: RECOMENDACIONES.....	78
REFERENCIAS	79
ANEXOS	83
ANEXO 1: TIPOS DE CAUCHO.....	84
ANEXO 2: ENSAYOS DE LABORATORIO PARA EL CAUCHO.....	84
ANEXO 3: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL SUELO NATURAL.	87
ANEXO 4: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS MEZCLAS.	88
ANEXO 5: GRAFICAS DE LA VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	90
ANEXO 6: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Tamaño de las Partículas del Suelo Arcilloso	6
Tabla 2	Diferencia Proctor Estándar Y Proctor Modificado	13
Tabla 3	Porcentajes de CBR para la Sub rasante.....	17
Tabla 4	<i>Composición Neumáticos livianos</i>	20
Tabla 5	<i>Composición Neumáticos de vehículos pesados</i>	20
Tabla 6	Composición química del neumático	20
Tabla 7	<i>Coeficientes de Dilatación Térmica Lineal</i>	21
Tabla 8	<i>Ciclo de Vida de un Neumático</i>	22
Tabla 9	<i>Diagrama de Procesos de Transformación</i>	24
Tabla 10	<i>Usos del caucho dependiendo de su tamaño</i>	25
Tabla 11	<i>Usos del Caucho dependiendo de los niveles</i>	26
Tabla 12	<i>Producción de Caucho de Pavimentos Deportivos S.A.C</i>	27
Tabla 13	<i>Cantidad aproximado de caucho anual en Lima</i>	28
Tabla 14	Abreviaturas usadas para las muestras analizadas.....	30
Tabla 15	Datos de laboratorio -Gs del caucho	36
Tabla 16	Gravedad Especifica del Caucho.....	37
Tabla 17	Peso y Tamaño de los tipos de Granulometría del Caucho	37
Tabla 18	Granulométrica Caucho Granulado	38
Tabla 19	Granulométrica Caucho Triturado.....	39
Tabla 20	Granulométrica Caucho Granulado + Triturado	40
Tabla 21	Cantidad de material fino en la curva granulométrica.....	42
Tabla 22	<i>Caracterización Física del suelo del Caserío de Callampampa</i>	42
Tabla 23	Clasificación SUCS y AASHTO de las Mezclas	43
Tabla 24	Límites de Atterberg y Gravedad Especifica de las mezclas (suelo+caucho).....	43
Tabla 25	Tamaño Máximo y Nominal del suelo + caucho	46
Tabla 26	Proctor Modificado del suelo natural	49
Tabla 27	<i>Óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca de las muestras</i>	51
Tabla 28	Cohesión y Ángulo de Fricción (Suelo+Caucho).....	57
Tabla 29	Esfuerzo de Corte Suelo + Caucho.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de Estructuras de las Arcillas. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, por Braja Das, 2014.	7
Figura 2 Variación volumétrica de arena densa y arena suelta Adaptado de “Mecánica de Suelos”, por Berry, P, 1997.	8
Figura 3 Deformación unitaria VS Esfuerzo cortante de arenas sueltas y densas. Adaptad de “Mecánica de Suelos”, por Berry, P,1997	9
Figura 4 Curvas Típicas en arcilla pre consolidada y arcilla normalmente consolidada. Adaptado de “Mecánica de los Suelos”, por Duque y Escobar, 2002.....	10
Figura 5 Estructuras de la mineralización del Suelo. Adaptado de “Mecánica de los Suelos”, por Duque y Escobar, 2002.	10
Figura 6 Límites de Atterberg. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, por Braja Das, 2014.	11
Figura 7 Curvas de Compactación Típicas. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, por Braja Das, 2011.	12
Figura 8 Resultados de pruebas de Proctor estándar y modificada. <i>Adaptado por “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, Braja Das 7^{ta} Edición, 2011.</i>	14
Figura 9 Efecto de la energía de compactación en suelo arcilloso limoso. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, por Braja Das 4 ^{ta} Edición, 2013.	15
Figura 10 Perfil Típico de una Estructura de Pavimento Flexible. Adaptado de “Pavimentos: Materiales, construcción y diseño”, por Rondón, Reyes, 2015.....	16
Figura 11 Componentes de un Neumático Adaptado de “Handbook of Recycling: State of the art for practitioners, analyts and Scintistis, por Worrell y Reuter, 2011.	18
Figura 12 Tamaño del caucho. Adaptado de “Handbook of Recycling: State of the art for practitioners, analyts and Scientists, por Worrell y Reuter, 2011.	25
Figura 13 Muestra Arcilla, elaboración propia.....	29
Figura 14 Caucho Triturado, adaptado de: elaboración propia.	30
Figura 15 Molde Proctor Modificado. Adaptado del Manual de Ensayos de Laboratorio del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.	34
<i>Figura 16</i> Esquema del aparato de resistencia al esfuerzo cortante directo: Adaptado de “Mecánica de Suelos, Volumen I”, por Juárez Badillo, 2012.	34

<i>Figura 17</i> Penetración CBR. Adaptado del “Manual de Ensayos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016.	35
Figura 18 Ensayo del CBR Adaptado del “Manual de Ensayos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016	35
Figura 19 Cálculo de Gravedad Específica. Adaptado del “Manual de Mecánica de suelos”, por Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2019.	36
Figura 20 Curva Granulométrica del Caucho Granulado, por elaboración propia.	38
Figura 21 Curva Granulométrica del Caucho Triturado, por elaboración propia	39
Figura 22 Curva Granulométrica de la mezcla de Caucho Granulado + Triturado, por elaboración propia.	40
Figura 23 Curva Granulométrica del suelo natural, por elaboración propia.	42
Figura 24 Variación del Límite Líquido, por elaboración propia.	44
Figura 25 Variación de Límite Plástico, por elaboración propia.	45
Figura 26 Variación de Índice de Plasticidad, por elaboración propia.	45
Figura 27 Variación de la Gravedad Específica de los Sólidos, por elaboración propia	46
Figura 28 Curva Granulométrica de las mezclas (suelo + caucho), por elaboración propia.	47
Figura 29 Curva Granulométrica de Suelo Natural + 0.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.	48
Figura 30 Curva Granulométrica de Suelo Natural + 1.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.	48
Figura 31 Curva Granulométrica de Suelo Natural + 2.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.	48
Figura 32 Curva Granulométrica de Suelo Natural + 3.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.	48
Figura 33 Curvas de Compactación - Suelo Natural, por elaboración propia.	49
Figura 34 Curvas de Compactación - Suelo Natural + 0.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.	50
<i>Figura 35</i> Curvas de Compactación - Suelo Natural + 1.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.	50
Figura 36 Curvas de Compactación - Suelo Natural + 2.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.	50

Figura 37 Curvas de Compactación - Suelo Natural + 3.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.	50
Figura 38 Curvas de Compactación (Suelo + Caucho), por elaboración propia.	52
Figura 39 Variación de la Densidad Máxima del Suelo Seco, por elaboración propia.	52
Figura 40 Variación del Contenido de Humedad Optimo, por elaboración propia.	53
Figura 41 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100), por elaboración propia.	54
Figura 42 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100/C0.5), por elaboración propia.	55
Figura 43 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100/C1.5), por elaboración propia.	56
Figura 44 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100/C2.5), por elaboración propia.	56
Figura 45 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100/C3.5), por elaboración propia.	57
Figura 46 Esfuerzo Normal Vs Esfuerzo de Corte (Suelo + Caucho), por elaboración propia.	58
Figura 47 Variación de la Cohesión, por elaboración propia.	59
Figura 48 Variación del Ángulo de Fricción, por elaboración propia.	59
Figura 49 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte con un esfuerzo de normal de 49kPa, por elaboración propia.	61
Figura 50 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte con un esfuerzo de normal de 98.1kPa, por elaboración propia.	62
Figura 51 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte con un esfuerzo de normal de 196.1kPa, por elaboración propia.	63
Figura 52 Variación del Esfuerzo de Corte, por elaboración propia.	63
Figura 53 Deformación Volumétrica - S100, por elaboración propia.	65
Figura 54 Deformación Volumétrica - S100/C0.5, por elaboración propia.	66
Figura 55 Deformación Volumétrica - S100/C1.5, por elaboración propia.	67
Figura 56 Deformación Volumétrica - S100/C2.5, por elaboración propia.	68
Figura 57 Deformación Volumétrica - S100/C3.5, por elaboración propia.	69
Figura 58 Variación de la Deformación Vertical, por elaboración propia.	70
Figura 59 Curva de Penetración (S100), por elaboración propia.	71
Figura 60 CBR – Curva de Penetración (S100/C1.5), por elaboración propia.	71

Figura 61 CBR – Curva de Penetración (S100/C2.5).....	72
Figura 62 CBR – Curva de Penetración (S100/C3.5), por elaboración propia.	72
Figura 63 Categorías de Sub rasante según su CBR, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones	73
Figura 64 CBR a 2.5mm de penetración y a 95% de las M.D.S. , por elaboración propia.	74

INTRODUCCIÓN

El problema en el que nos enfocaremos en la presente investigación es el mal comportamiento mecánico que ofrecen los suelos arcillosos de baja plasticidad. Para ello se planteará una solución mediante la adición de caucho, con el objetivo de modificar y/o mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

Hoy en día en el Perú existe poca investigación acerca de cómo los desechos sólidos industriales pueden ayudar a mejorar distintas propiedades, tanto físicas como mecánicas, en diversos materiales de construcción. En términos generales los países extranjeros cuentan con mayores índices de investigación científica, esto se ve reflejado en la brecha de infraestructura que existe entre Perú y dichas naciones. Según los estudios realizados por José Luis Bonifaz, profesor de la Escuela de Gestión Pública de la Universidad del Pacífico, este factor tuvo un valor aproximado de \$88 000 millones en el año 2012 y que para el periodo del año 2016 -2025 se aproximará a los \$159 549 millones (El Comercio, 2015). Por este motivo la presente investigación brindará una alternativa de uso para los desechos sólidos, a su vez se contribuirá al estado de arte y a los conocimientos de la línea de Geotecnia.

Perú tiene una gran diversidad de suelos, las cuales son variables dependiendo a la zona donde se ubican y para su distinción entre ellos se debe tener en cuenta ciertos factores, tales como la altitud, la temperatura, etc. Los suelos arcillosos son los que conforman un gran porcentaje de los suelos existentes en el territorio peruano. Según el Ministerio de Agricultura y Riego (2018), en la selva peruana es donde más predominan los sedimentos de arena fina y arcilla, tal es el caso de la ciudad de Iquitos, donde aproximadamente el 30% de las arcillas son de baja plasticidad. Otra ciudad peruana que presenta similares características de suelos arcillosos de baja plasticidad es Cajamarca, los cuales son peculiares debido a sus características físicas y mecánicas.

Por otro lado, a menudo se observa que el parque automotor tiene un crecimiento exponencial, este suceso ocasiona que la producción de neumáticos se incremente. La fabricación de estos materiales ocasiona serios problemas ambientales, por ejemplo, en Tailandia la empresa Ribbed Smoked Sheet (RSS) es uno de los principales productores de caucho natural y se utiliza como materia prima para la producción de neumáticos en Japón. El 80% de caucho natural que este importa desde Tailandia se convierte en llantas y en Japón el proceso desde su extracción de látex hasta la producción del elemento final produce un

80% del CO₂ que se emite en este país y un 60% de partículas PM. Algunas de estas son las PM₁₀, las cuales son aquellas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, etc. que están dispersas en la atmosfera y miden entre 2,5 y 10 micrómetros. (Phairuang, Hata. 2019).

En el Perú la fabricación de productos de caucho creció un 1.8% en el 2017 luego de tres años. (Andina, 2018). Por ello, actualmente existe una gran cantidad de residuos industriales sólidos, los cuales no son tratados correctamente para su reciclaje. Según el INEI (2011), el plástico y el caucho son los elementos con mayor impacto ambiental en la sociedad peruana, siendo así que el 4% de estos desechos es caucho. Además, en los últimos años, en Perú el crecimiento del sector automotriz causó índices alarmantes de contaminación y generó desechos sólidos, tales como los neumáticos, que en su mayoría no tienen un trato adecuado para su proceso de reciclado. De acuerdo a la Asociación Automotriz del Perú, Lima y Callao concentran cerca del 66% de los autos existentes en todo el país. Estos anualmente generan una gran cantidad de neumáticos en desuso, los cuales en su mayoría van a parar a un relleno sanitario a falta de lugares donde pueda ser correctamente reciclados. Existen diferentes alternativas del uso del caucho (materia prima de los neumáticos) para ser reutilizados de manera eficiente y a su vez contribuir a la conservación del medio ambiente.

Con el objetivo de darle un uso alternativo a los neumáticos desechados, la presente tesis a través de un estudio experimental busca estudiar el comportamiento de los suelos arcillosos de baja plasticidad con la adición de caucho triturado.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

¿Cómo mejorará los suelos arcillosos de baja plasticidad proveniente del caserío de Callampampa - Llama – Cajamarca al adicionar caucho triturado?

ESTADO DEL ARTE.

Las investigaciones sobre el comportamiento mecánico de los suelos con adición de residuos sólidos se van incrementando de manera considerable, esto servirá para dar una solución sustentable a los diferentes problemas geotécnicos que afronta la ingeniería al construir obras de infraestructura, tales como pavimentos, terraplén, etc. Además, los residuos sólidos se van incrementando de manera alarmante, lo cual contribuye al calentamiento global. Por ello es necesario informar a la población sobre la correcta deposición de estos residuos, esto fue expresado por María del Pilar Sánchez (2015) de la siguiente manera:

Un manejo de residuos sólidos adecuado se hace necesario en los sitios urbanos, en los cuales ha aumentado la cantidad de habitantes. Este fenómeno es más evidente en las ciudades de América Latina que en las europeas. La mala disposición de los residuos, genera enfermedades y gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. El uso de material reciclado reduce los índices de contaminación ambientales que genera el calentamiento global en el mundo (p.445).

Existen estudios experimentales que utilizaron fibra de caucho y otros materiales para modificar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, tales como la cohesión y el esfuerzo al corte. Algunos de estos son las siguientes:

Ekrem Kalkan (2013) realizó una investigación en la Universidad Ataturk, Facultad de Ciencias de la Tierra Oltu, Turquía, donde determinó la influencia de los suelos arcillosos al agregar fibras de caucho de neumáticos reciclados y humo de sílice, con el objetivo de mejorar su resistencia al corte y reducir su hinchamiento. En este estudio se observó que el valor máximo del UCS se obtuvo a partir de la adición de una mezcla de 20% de humo de sílice y 2% de fibra de caucho, esto quiere decir que el valor UCS aumento de 92.8 a 182 kPa, que es 0.97 veces más que la muestra no modificada. En conclusión, la investigación demostró que la mezcla del humo de sílice y fibras de caucho en aplicaciones geotécnicas tiene efectos positivos sobre la resistencia a la compresión no confinada, la conductividad hidráulica y la presión de hinchamiento.

Sual Akbulut, Seracettin Arasan y Ekrem Kalkan (2007) realizaron una investigación de la influencia de las fibras sintéticas y neumáticos reciclados en la modificación de suelos arcillosos. En dicha investigación se buscó evaluar el uso de fibras de caucho y polietileno para la modificación del suelo arcilloso. El valor óptimo de fibra de neumático fue de 2%, mientras que para el polietileno fue de 0.2%, con estos valores se obtuvo un valor de UCS 1.97 veces mayor a una muestra no reforzada, para esto la longitud de la fibra debe de aumentarse respecto a las dimensiones de la muestra. Asimismo, el caucho de los neumáticos y las fibras sintéticas aumentaron los valores de la cohesión, al tener una longitud promedio de fibras de caucho de 30mm, el resultado obtenido fue de 219kPa, que es 1.2 veces mayor a la muestra no reforzada. Asimismo, el ángulo de fricción aumento y vario de 17° a 36°, este resultado se dio luego de someter a las muestras a una prueba de corte directo, con un comportamiento no lineal, ya que los materiales de refuerzo mostraron una distribución con direcciones horizontales y verticales a la superficie de corte. Por ello, las fibras de caucho y

polietileno se pueden usar para mejorar la resistencia y el comportamiento dinámico de los suelos arcillosos en aplicaciones geotécnicas.

Cabalar, AF, Karabash, Z, Mustafa, WS (2014) realizaron una investigación en el departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Gaziantep, Turquía, de un suelo arcilloso estabilizado con neumáticos reciclados y cal. El suelo estudiado fue extraído de la universidad de Gaziantep, sus valores de límite plástico y límite líquido (ASTM D4318) son 23.3 y 49.5 respectivamente; la gravedad específica de los granos de arcilla fue de 2.61. Los neumáticos tienen una longitud de 0.6 a 4.75mm. La adición de 4% de cal y 10% de neumáticos triturado dan como resultado los valores más altos de CBR y UCS.

Bekhiti M, Trouzinw, H, Rabehi, M (2019) realizaron una investigación en el departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Djelfa, Argelia, sobre la influencia de las fibras de caucho de los neumáticos reciclados en el comportamiento de hinchamiento, resistencia a la compresión no confinada y ductilidad de un suelo arcillosos estabilizado con cemento. Realizaron experimentos donde se altera la muestra de suelo arcilloso con diferentes porcentajes de fibra de caucho y cemento, los porcentajes del peso del cemento varían entre 5% a 10% y las muestras del caucho de 0% a 2% respecto al peso total de la muestra. Se realizó el ensayo de Proctor estándar, límites de consistencia y ensayo de corte directo; se obtuvo los mejores resultados cuando se agregó un porcentaje de 2% de caucho, la muestra era mucho más dúctil, reduce el hinchamiento y los índices de compresión aumentaron a medida que se aumentó el porcentaje de caucho, el valor de la deformabilidad aumenta al incrementar el contenido de fibra de caucho.

Chandra S, Vladkar M, Nagrale P (2008) realizaron una investigación en el departamento de ingeniería Civil, en el instituto Indio de Tecnología Roorkee, analizaron los beneficios de los suelos subterráneos en pavimentos flexibles. Se tomaron en cuenta tres suelos y una fibra de polipropileno. La cantidad óptima de fibra se decidirá en función del resultado del CBR y los ensayos triaxiales que se llevaran a cabo en los suelos reforzados y no reforzados. Los resultados obtenidos fueron que para los suelos A, B, C que inicialmente tenían un CBR de 1.16, 1.95 y 6.20% respectivamente, que aumentaron a 4.33, 6.42 y 18.03% respectivamente a causa de la fibra de polipropileno.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS.

Objetivos Generales.

Establecer la influencia en el comportamiento mecánico del suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del Caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca al adicionar caucho triturado.

Objetivos Específicos.

- Determinar las propiedades físicas del caucho triturado, del suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del Caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca y las mezclas entre estos dos materiales.
- Obtener las curvas de compactación con el Proctor modificado del suelo arcilloso de baja plasticidad y las mezclas con caucho triturado. Este suelo será extraído del Caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca.
- Realizar la caracterización mecánica del suelo arcilloso extraído del Caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca y de las mezclas de este con diferentes porcentajes de caucho triturado.
- Definir la mezcla de caucho triturado y suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del Caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca con mejor comportamiento mecánico respecto al suelo natural.
- Analizar la viabilidad de mejora de la subrasante de una carretera cuando se adiciona caucho triturado.

Hipótesis.

El comportamiento mecánico del suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del Caserío de Callampampa – Llama - Cajamarca mejorará por medio de la adición de caucho triturado.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 Suelo Arcilloso.

En los suelos arcillosos predomina la arcilla sobre otras partículas de diferentes tamaños, estas son sólidas con diámetro menor de 0.005mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástico al ser mezclado con agua. Un suelo arcilloso tendrá también partículas de limos y de arenas en distintas proporciones y tamaños, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Tamaño de las Partículas del Suelo Arcilloso

Tipo de Material	Tamaño de Partículas (AASHTO T88 -10)
Arena Gruesa	2.00 – 0.42 mm
Arena Fina	0.42 – 0.074 mm
Limo	0.074 – 0.002 mm
Arcilla	Menor a 0.002 mm
Coloides	Menor a 0.001mm

Nota: Para la clasificación de suelos de acuerdo al tamaño de partículas. Adaptado de Tesis “Mejoramiento de un suelo arcillosos de la localidad de Pacisapa- Ayacucho utilizando residuos industriales para evaluarlo en muro hipotético de tierra estabilizada mecánicamente.

Generalmente las arcillas son suelos plásticos que se contraen al secarse, varían su cohesión dependiendo del contenido de humedad y son compresibles cuando se le aplica una carga en su área superficial, con ello tiende a tener una compresión lenta. Este tipo de suelo presenta tres grandes grupos, los cuales dependen de su composición química al momento de ser compactados, ya que su proceso influye directamente a la interacción entre partículas. Entre las cuales tenemos:

- La caolinita (a): Están formadas por una lámina silícica y una lámina alumínica.
- La Illita (b): De comportamiento similar al de las montmorilloníticas, pero con tendencia a formar grumos por la presencia de iones de potasio.
- La montmorillonita (c): Se forma por la superposición indefinida de una lámina alumínica entre dos láminas silícicas, pero con una unión débil entre sus retículas, lo que hace que el agua pueda penetrar.

En la Figura 1 se puede observar la caolinita, illita y montmorillonita.

Figura 1 Diagrama de Estructuras de las Arcillas. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, por Braja Das, 2014.

1.2 Resistencia al Corte del Suelo Arcilloso.

La resistencia al corte de un suelo se resume en la resistencia por unidad de área que ofrece la muestra al ser sometido a la falla en cualquier plano interno. Esto por lo general está en función de la cohesión y ángulo de fricción que se da entre la interacción de sus partículas.

Ecuación de Falla de Mohr -Coulomb.

Coulomb sostiene que la muestra analizada fallará solo a causa de una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, es decir no falla si solo existe un esfuerzo normal máximo o un esfuerzo cortante de manera individual. La ecuación de falla de Mohr-Coulomb es representada de la siguiente manera:

$$\tau_f = c + \sigma * \tan\varphi$$

Donde:

- σ = Esfuerzo normal total en el plano de falla.
- c = Cohesion del suelo.
- φ = Angulo de fricción del suelo.

1.2.1 Ensayo de corte directo.

Es la forma más sencilla y utilizada de hallar el esfuerzo de corte que presenta el suelo arcilloso, para ello se toma en cuenta la norma ASTM D-3080-04, donde solo se aplica una fuerza axial que varía entre $0.5\text{-}2\text{ kg/cm}^2$.

1.2.1.1 Arena

En la Figura 2 se muestran la relación de la deformación vertical vs la deformación horizontal que se obtiene de las arenas sueltas y densas. Las partículas en las arenas sueltas tienen la tendencia de que su volumen se incremente cuando estas se mueven verticalmente. Sin embargo, los vacíos existentes hacen que las partículas adyacentes se reacomoden, por ello las arenas sueltas desde inicio a fin se comprimen. Las arenas densas sufren un fenómeno de compresión por un periodo corto y luego de dilatación con un periodo mayor. Este último acontecimiento se produce porque los granos en este tipo de suelos se separan y se mueven hacia arriba sobreponiéndose una partícula sobre otra.

Figura 2 Variación volumétrica de arena densa y arena suelta Adaptado de “Mecánica de Suelos”, por Berry, P, 1997.

En la Figura 3 se observa que el máximo esfuerzo cortante en las arenas densas es mayor que en las arenas sueltas, entonces relacionando con la Figura 2, se concluye que los cambios volumétricos tienen una influencia directa en el valor de la resistencia al corte que tiene el suelo. Es decir, cuando el esfuerzo de corte sea mayor los cambios volumétricos tendrán un fenómeno primero de compresión y luego de dilatación.

Figura 3 Deformación unitaria VS Esfuerzo cortante de arenas sueltas y densas. Adaptado de “Mecánica de Suelos”, por Berry, P, 1997

1.2.1.2 Arcillas Drenadas

En la Figura 4 se observa tres gráficos típicos que se obtienen del ensayo de corte directo. Primero se tienen las arcillas pre consolidadas las cuales son aquellas que han tenido una fatiga de consolidación mayor a la actual y segundo se encuentra las arcillas normalmente consolidadas, las cuales son las que nunca han tenido una fatiga de consolidación mayor a la existente. En la gráfica superior izquierda se observa la relación de deformación horizontal vs esfuerzo de corte, donde la arcilla normalmente consolidada tiene un esfuerzo de corte menor a la muestra de arcilla pre consolidado. Así mismo en la gráfica superior derecha se encuentra el esfuerzo normal vs el esfuerzo cortante, donde se halla el ángulo de fricción y la cohesión que tiene el suelo arcilloso. Finalmente, en la gráfica inferior se observa el desplazamiento horizontal vs el desplazamiento vertical, es decir el cambio volumétrico que presenta el suelo arcilloso. La muestra de arcilla pre consolidada en un inicio se comprime y luego tiende a expandirse y en el suelo arcilloso normalmente consolidada tiende a comprimirse desde su inicio y aumenta a medida que el desplazamiento horizontal se incrementa.

Figura 4 Curvas Típicas en arcilla pre consolidada y arcilla normalmente consolidada. Adaptado de “Mecánica de los Suelos”, por Duque y Escobar, 2002.

1.3 Interacción Suelo – Partícula

Las partículas de un suelo en su estado natural dependen de la meteorización residual o transportada. En el proceso de sedimentación es cuando las partículas sólidas están sometidas a fuerzas mecánicas y eléctricas. Cuando se hace referencia a las fuerzas mecánicas, afectan directamente a todos los tipos de partículas del suelo, sin embargo las fuerzas eléctricas solo afectan a las partículas finas mediante la atracción, repulsión y enlaces iónicos que presentan dichos suelos. Según la meteorización, las partículas de los suelos pueden ser como se observa en la Figura 5.

Figura 5 Estructuras de la mineralización del Suelo. Adaptado de “Mecánica de los Suelos”, por Duque y Escobar, 2002.

Las arcillas tienen una gran capacidad de intercambio iónico, por ello los minerales que presenta este tipo de suelo, como el silicato de aluminio, genera plasticidad en suelos

arcillosos cuando están en contacto con el agua. Además, se observa distintas características expansivas, esto depende en su totalidad de la masa del suelo a expandirse y de la cantidad de mineral que presenta la arcilla. Por ejemplo, los minerales que generan cambios volumétricos son la vermiculita y la montmorillonita, siendo esta última la más expansiva. Lo contrario sucede con las illitas que raramente son expansivas, ya que pueden tener una variación volumétrica cuando las partículas tienen un tamaño muy pequeño.

Por otro lado, las arcillas cuentan con cationes de sodio, calcio, etc. que disueltos en agua son absorbidas por la superficie de las arcillas e intercambian cationes para lograr un balance respecto a sus cargas eléctricas superficiales.

Los minerales ya mencionados que están presentes en la arcilla son el factor más relevante para que un suelo de grano fino presente cohesión, esto se debe a que el agua absorbida se encuentra alrededor de sus partículas. Para determinar la consistencia del suelo cuando el porcentaje de humedad varié, Atterberg desarrollo los límites de consistencia, esto se observa en la Figura 6.

Figura 6 Límites de Atterberg. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, por Braja Das, 2014.

1.3.1 Granulometría de los suelos

Además, la distribución granulométrica, la forma de las partículas del suelo, la cantidad y tipo de mineral arcilloso que presenta el suelo influye en la compactación, por lo que tiene un gran impacto en la variación del peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo. Como se observa en la Figura 7, el cual fue realizado haciendo uso de los ensayos de Proctor estándar según el ASTM D-698. La arena mal gradada tiene un contenido de

humedad y un peso específico menor respecto a una arena bien graduada, además cuando el contenido de minerales arcillosos se incrementa en un suelo, el contenido de humedad tiende a aumentar, esto se aprecia en la Figura 7, la arcilla altamente plástica tiene un mayor contenido de agua que una arcilla limosa.

Figura 7 Curvas de Compactación Típicas. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, por Braja Das, 2011.

1.4 Influencia de la Compactación en el Ensayo de Corte Directo

La compactación es un medio mecánico que se usa para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos de una forma artificial, en líneas generales este método elimina el aire que contiene el suelo, pero no elimina agua.

El ensayo de Proctor Modificado se realizará con el objetivo de determinar la curva de compactación y así conocer el contenido de humedad óptima y la máxima densidad seca, ya que en base a estos datos se toman los criterios para la elaboración de las muestras del ensayo de corte directo.

1.4.1 Ensayo de Compactación

Antes de realizar el ensayo de compactación es importante identificar el tipo de suelo a compactar, ya que el método a aplicar para la compactación es diferente para cada uno.

Según Juárez Badillo (2012) menciona que “los suelos friccionantes tienen un resultado muy favorable cuando se usan métodos vibratorios y en caso de los suelos plásticos el proceso de carga estática tiene mayores ventajas” (p.575).

Existen dos tipos de este ensayo de compactación, los cuáles se observan en la Tabla 2.

Tabla 2

Diferencia Proctor Estándar Y Proctor Modificado

Características	Proctor Estándar	Proctor Modificado
Numero de golpes por capa	25	25
Numero de capas	3	5
Peso del martillo (Kg)	2.500	4.536
Altura de caída del martillo (m)	0.304	0.457
Volumen del molde (cm³)	943.3	943.3

Nota: Mecánica de Suelos. Adaptado por elaboración propia.

La finalidad de ambos ensayos es realizar una gráfica de contenido de humedad vs peso específico seco. La principal diferencia radica en la energía de compactación usada.

Debido a que en el campo se desarrolla la compactación con rodillos pesados, la prueba de Proctor estándar fue modificada para poder tener un resultado más cercano a la realidad. Para el ensayo de Proctor estándar se utiliza la Norma ASTM D-698 y para el ensayo de Proctor modificado la ASTM D-1557.

En la Figura 8 Podemos observar los resultados de las curvas de contenido de humedad vs peso específico seco que se obtienen de las pruebas de Proctor estándar y modificada. Como ya se ha mencionado antes, la principal diferencia entre estos es la energía de compactación usada, siendo menor en el ensayo de Proctor estándar. Entonces en la Figura 8 se observa que el ensayo de Proctor modificado tiene un contenido óptimo de humedad menor y un peso específico seco mayor respecto al ensayo de Proctor estándar.

Figura 8 Resultados de pruebas de Proctor estándar y modificada. Adaptado por “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, Braja Das 7^a Edición, 2011.

1.4.2 Energía de compactación.

Es la energía de compactación que se le aplica a un suelo por unidad de volumen y se tiene que asegurar que la fuerza sea aplicada de manera uniforme sobre la superficie de la muestra.

La energía de compactación por unidad de volumen (E) se calcula de la siguiente manera:

$$E \left(KN - \frac{m}{m^3} \right) = \frac{(\#golpes\ por\ capa) * (\#capas) * (peso\ del\ martillo\ (KN)) * (altura\ de\ caída\ del\ martillo(m))}{volumen\ del\ molde(m^3)}$$

En la Figura 9 las curvas de compactación fueron realizadas mediante el ensayo de Proctor estándar ASTM D- 698, pero el número de capas tiene una variación entre 20 a 50 golpes.

En consecuencia, al incremento del número de golpes por capa, la energía de compactación se ha incrementado. Como se observa en la Figura 9 a medida que aumentó este factor, el peso seco máximo de compactación también se incrementó y de manera contraria el contenido de humedad óptima se redujo.

Se debe de tener en cuenta que el esfuerzo de compactación no es directamente proporcional al grado de compactación que tiene un suelo.

Figura 9 Efecto de la energía de compactación en suelo arcilloso limoso. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, por Braja Das 4^{ta} Edición, 2013.

1.5 Pavimentos

Vienen a ser estructuras compuestas por diferentes capas las cuales se encuentran una encima de otra, el principal objetivo de estas obras es de soportar las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales. El pavimento se encuentra sobre una sub rasante natural el cual puede estar formado por el mismo suelo de la zona o también puede ser tratada con diferentes tipos de materiales para mejorar sus propiedades. Se puede considerar los siguientes pavimentos.

- Pavimentos flexibles.
- Pavimentos con capas asfálticas gruesas.
- Pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos.
- Pavimentos con estructuras mixtas.
- Pavimentos rígidos.

1.5.1 Pavimentos Flexibles.

Los pavimentos flexibles son estructuras formadas por una capa asfáltica apoyada sobre otras capas de menor rigidez. Estas pueden estar formadas por material granular tratado, en muchos casos la sub rasante mejora con la adición de materiales, como fibras, geosintéticos, residuos sólidos, etc. Estas capas deben de resistir dos factores importantes los cuales son la inclemencia del clima y la congestión vehicular. Los pavimentos flexibles están formados por la capa de rodadura, la base intermedia, base asfáltica y la subrasante. Las principales funciones son:

- Estructural
Debe de ser resistente a los fenómenos de fatiga y acumulación de deformación a causa del tráfico vehicular. Además, se debe de considerar los factores climáticos.
- Funcional
Debe de estar diseñada y construida de tal forma que permita la circulación de los autos de forma segura y cómoda, evitando los accidentes.
- Impermeabilización
Esta capa tiene la función de evitar la penetración del agua a las capas granulares, ya que esto causa que la resistencia al corte disminuya.

Figura 10 Perfil Típico de una Estructura de Pavimento Flexible. Adaptado de “Pavimentos: Materiales, construcción y diseño”, por Rondón, Reyes, 2015.

1.5.1.1 Sub rasantes Mejoradas.

Esta capa se encuentra debajo de la sub base, su función es resistir la fatiga que transmiten los vehículos a medida que aumente el tráfico. Esta capa debe ser mejorada cuando presente

una baja rigidez y resistencia bajo carga cíclica, o cuando aparecen cambios volumétricos por la presencia o ausencia del agua. La subrasante puede ser mejorada con materiales reciclados tales como el caucho, PET, residuos de construcción, etc.

Se realiza el ensayo de CBR para conocer la calidad de la sub rasante, las categorías de este factor según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones se observa en la Tabla 3.

Tabla 3
Porcentajes de CBR para la Sub rasante

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀ : Sub rasante Inadecuado	CBR < 3%
S ₁ : Sub rasante Insuficiente	De CBR $\geq$ 3 % A CBR < 6%
S ₂ : Sub rasante Regular	De CBR $\geq$ 6 % A CBR < 10%
S ₃ : Sub rasante Buena	De CBR $\geq$ 10 % A CBR < 20%
S ₄ : Sub rasante Muy Buena	De CBR $\geq$ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Sub rasante Excelente	CBR $\geq$ 30%

Nota: MC-05-14-Manual de carreteras, suelos geología, geotecnia y pavimentos.

En caso que el CBR sea menor que 3% entonces nos vemos en la obligación de mejorar la subrasante. Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Perú) un CBR adecuado para una carretera es a partir de un 10%.

1.6 Neumático en Desuso.

Es una pieza compuesta fundamentalmente por caucho que llevan los vehículos para poder movilizarse, confiere adherencia, estabilidad y comodidad. Básicamente es una cascara grande, redonda y hueca llena de aire comprimida que puede soportar más de 50 veces su propio peso.

Se caracterizan por su durabilidad y su rendimiento en cualquier tipo de terreno, además en la actualidad se fabrica neumáticos teniendo en cuenta la calidad ambiental.

1.6.1.1 Proceso de Fabricación de Neumáticos

El proceso de fabricación de un neumático tiene como materia prima el caucho, donde cerca de 30 diferentes tipos de esta materia prima son mezclados para crear un componente gomoso de color negro que se triturará posteriormente. Para procesar este componente se enfría y se utiliza un cortado en forma de tiras, las cuales conformaran la estructura básica del propio neumático. Seguidamente, se empalmará desde dentro hacia afuera, en esta parte de la fabricación al caucho se le agrega los diferentes componentes tales como elementos textiles, los cables de acero, los talones, las lonas, las bandas de rodadura y otros componentes. Finalmente, el neumático se vulcaniza con moldes calientes en una máquina de curado que se encarga de comprimir todas sus partes y le confiere su forma final, luego pasa a una etapa de inspección donde un personal calificado emplea una maquinaria especializada para comprobar los estándares de calidad minuciosamente y detectar alguna imperfección.

En importante mencionar que los neumáticos obtienen una alta durabilidad después de vulcanizar la combinación del caucho sintético, natural y el resto de los aditivos.

Figura 11 *Componentes de un Neumático Adaptado de “Handbook of Recycling: State of the art for practitioners, analysts and Scientists, por Worrell y Reuter, 2011.*

1.6.1.2 Composición de los Neumáticos

Los neumáticos están conformados por más de 200 componentes. Las proporciones en que estos son utilizados dependen en gran magnitud de sus características específicas tales como su uso y tipo.

- Rellenos reforzantes: el negro de humo, formado de partículas muy pequeñas de carbono, que aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste.
- Fibras reforzantes: textiles y de acero, usualmente en forma de hilos, que aportan resistencia a los neumáticos: algodón, nylon y poliéster. La cantidad de acero y fibras sintéticas reforzantes en los neumáticos varía según el fabricante.
- Plastificantes: se adicionan para facilitar la preparación y elaboración de las mezclas, utilizándose para el control de la viscosidad. Reducen la fricción interna durante el procesado y mejoran la flexibilidad a bajas temperaturas del producto: aceites minerales (aromáticos, nafténicos y parafínicos) y de tipo éster.
- Agentes vulcanizantes: el azufre se usa para entrecruzar las cadenas de polímero en el caucho.
- Acelerantes: compuestos órgano - sulfurados, benzotiazol y derivados, óxido de zinc y ácido esteárico.
- Retardantes: N-nitroso difenil amina.
- Otros componentes (antioxidantes, adhesivos).

Es importante mencionar que los neumáticos obtienen una alta durabilidad después de vulcanizar la combinación del caucho sintético, natural y el resto de los aditivos.

1.6.1.2.1 Composición de Materiales

Según la Rubber Manufacturers Association, la composición de los neumáticos puede variar según su tipo de uso.

A. Neumáticos de Pasajeros (automóviles y camionetas)

Tabla 4

Composición Neumáticos livianos

Caucho natural	14%
Caucho sintético	27%
Negro de humo	28%
Acero	14 – 15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 – 17%
Peso promedio	8.6 Kg
Volumen	0.06 m ³

Nota: Adaptado de “Materiales y Compuestos para la industria del Neumático”, por Castro 2008

B. Neumáticos MCT (camiones y microbuses)

Tabla 5

Composición Neumáticos de vehículos pesados

Caucho natural	27%
Caucho sintético	14%
Negro de humo	28%
Acero	14 – 15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 – 17%
Peso promedio	45.4 Kg
Volumen	0.36 m ³

Nota: Adaptado de “Materiales y Compuestos para la industria del Neumático”, por Castro 2008

1.6.1.2.2 Composición Química de los Neumáticos

En forma general la composición química de los neumáticos es la siguiente:

Tabla 6

Composición química del neumático

ELEMENTO	%
Carbón	70-83
Hidrógeno	5-7.5
Azufre	1.2-1.9
Color	0.1-0.8
Nitrógeno	1.5
Oxígeno	5
Zinc	1.2-2.7
Hierro	5-18
Otros	5
Cloro	1% de su peso

Nota: Adaptado de “Materiales y Compuestos para la industria del Neumático”, por Castro 2008

1.6.1.3 Influencia del Coeficiente de Dilatación Térmica Lineal.

Tabla 7
Coeficientes de Dilatación Térmica Lineal

MATERIAL	COEFICIENTE DE DILATACIÓN
Caucho	7.7×10^{-7}
Cuarzo	5.9×10^{-7}
Aluminio	2.3×10^{-5}
Hierro	1.1×10^{-5}

Nota: Adaptado de “Materiales y Compuestos para la industria del Neumático”, por Castro 2008

En general los sólidos aumentan de volumen cuando se incrementa la temperatura y disminuye cuando desciende. El cambio que sufrirán los átomos de los minerales de los suelos arcillosos será menor al cambio volumétrico del caucho. Esto se debe a que el coeficiente de dilatación del caucho es menor al coeficiente correspondiente a los minerales que contiene en suelo arcilloso.

1.6.2 Ciclo de vida de los Neumáticos

En el siguiente diagrama se muestra las etapas importantes por donde pasa un neumático durante su ciclo de vida.

Tabla 8
Ciclo de Vida de un Neumático

Nota: Adaptación Viabilidad de la creación de una empresa recicladora y trituradora de llanta en desuso para su comercialización en el mercado peruano, por Llanos y Lujan, 2016.

1.6.3 Proceso de transformación de los neumáticos en desuso a caucho triturado

1.6.3.1 Transformación por Niveles

Según Letcher y Vallero (2011). Los neumáticos reciclados pasan por una serie de transformaciones para obtener la materia prima que es el caucho reciclado. Para lograr este proceso se debe clasificar por categorías y tamaños. Para ello se cuenta con los siguientes niveles.

- **Nivel 1**

Destrucción de la Estructura del Neumático.

Se almacenan los neumáticos como materia prima, sin restricción alguna. Estos pasan por un proceso mecánico donde se destruyen sus atributos físicos, tales como la forma, la

capacidad de carga, la rigidez, entre otros. En este proceso se utilizan maquinarias estacionarias donde se colocan los neumáticos, para luego ser cortados y mezclados entre sí sus compuestos físicos, tales como el caucho, los metales y los textiles. Esto nos servirá como materia prima para el nivel dos.

- **Nivel 2**

Liberación y Separación de los Elementos del Neumático

Este nivel se encarga de separar los principales componentes del material, es decir separar al caucho, los metales y los textiles. Para ello, se utilizan tecnologías y entre las más utilizadas se tienen:

Trituración Mecánica

Este proceso se basa en el reciclado de neumáticos que pasan por distintos procesos mecánicos para eliminar las propiedades elásticas de los desperdicios del caucho, obteniendo las propiedades plásticas en su estado natural.

Los productos obtenidos por este proceso son de altísima calidad y quedan limpio de impurezas. Este proceso se realiza a temperatura ambiente, incluye la descomposición de los neumáticos fuera de uso en granitos donde es separada de componentes tales como el acero y los textiles. El sistema más completo de transformación mecánica de los neumáticos es el granulado. Donde en su primera fase se trituran entre 50 a 30mm. La segunda etapa es reducir aún más su tamaño entre 5 a 25mm, luego se separa magnéticamente los elementos metálicos. Finalmente, el material va entre 0.5 a 3mm en función a la aplicación que se destina.

Trituración Criogénica

La trituración criogénica se realiza a temperaturas cercanas a -200°C , con el fin de fragilizar el caucho y que este pierda sus propiedades elásticas para que la desintegración se realice con facilidad. Se usa nitrógeno líquido para enfriar las piezas de caucho, para que luego pasen por un molino.

- **Nivel 3**

Tecnologías de Tratamientos Múltiples.

Este es un tratamiento especial que se le da al caucho reciclado para modificar sus propiedades mediante procedimiento más complejos tales como térmicos, químicos, mecanos químicos, etc. Los resultados de este nivel se utilizarán como materia prima para el siguiente nivel.

- **Nivel 4**

Mejora de Material

En este nivel la materia prima se refina, se modifica sus propiedades específicas y se trata en lo posible de mejorar sus propiedades.

Tabla 9

Diagrama de Procesos de Transformación

Nota: Diagrama de Procesos de Transformación. Adaptado de “*Handbook of Recycling: State of the art for practitioners, analysts and Scientists*, por Worrell y Reuter, 2011.

1.6.4 Materia prima obtenida de los neumáticos en desuso

Los materiales que resultan de los cuatro niveles de tratamiento se clasifican ampliamente en seis categorías: cortes, desmenuzado, astillas, granulados, polvos y polvos finos.

Figura 12 Tamaño del caucho. Adaptado de “Handbook of Recycling: State of the art for practitioners, analysts and Scientists, por Worrell y Reuter, 2011.

Según Letcher y Vallero (2011). Se puede encontrar diferentes usos dependiendo del tamaño del caucho que se obtendrá, estos datos se aprecian en el siguiente cuadro.

Tabla 10
Usos del caucho dependiendo de su tamaño

Material	Tamaño	Características Claves	Materiales tradicionales
Neumáticos	Unidad	Ligero de baja densidad compactada, alto índice de vacíos, buena compresibilidad, permeabilidad al agua, aislamiento térmico	Bloques de hormigón, arcilla, agregado de cantera, tambores rellenos de grava
Desmenuzados	50 -300 mm	Ligero, baja densidad compactada, altos vacíos	Roca triturada o grava grande
Astillados	10-50 mm	Relación con buena permeabilidad al agua entre 10^{-1} y 10^{-3} m s^{-1} . Buen aislamiento térmico y compresibilidad, baja presión de tierra y características de alta fricción en el camino.	Arena de grano, arcilla liviana o agregado de arcilla expandida ligera, cenizas volantes de la quema de carbón
Granulados y Polvos finos	0.50 –15 mm	La estructura macro reticulada conserva las mismas características que el neumático; Forma irregular; Alguna degradación térmica, temperatura estresada. Puede exhibir grado nominal de reticulación reducida	Producto: Cauchos vírgenes, EPDM, CE: arcilla, arena, grava, cenizas volantes de poliuretano que quema carbón.

Nota: Diagrama de Procesos de Transformación. Adaptado de “Handbook of Recycling: State of the art for practitioners, analysts and Scientists, por Worrell y Reuter, 2011.

Aplicaciones de los materiales que se derivan después de procesar los neumáticos.

Tabla 11
Usos del Caucho dependiendo de los niveles

Niveles de los Procesos de los NFU	Aplicaciones
Nivel 1 Tratamiento Mecánico	Arrecifes artificiales Ingeniería de vertederos Refuerzo Estabilización fluvial Barreras de Sonido
Nivel 2: Tamaño de reducción y separación de materiales	Ingeniería de Vertederos Drenaje Aislamiento Relleno ligero. Relleno Adoquines Superficies deportivas. Capa de alfombra. Superficies viales
Nivel 3: Tecnologías de Tratamientos Múltiples.	Productos de Carbón. Juntas, mangueras, anillos. Pavimentación de carreteras. Selladores de carreteras. Juntas de expansión. Aditivos de asfalto.
Nivel 4: Mejora de Material	Aditivos de asfalto. Revestimientos. Selladores. Pinturas y tintas. Producto de Carbono.

Nota: Diagrama de Procesos de Transformación. Adaptado de “*Handbook of Recycling: State of the art for practitioners, analysts and Scientists*, por Worrell y Reuter, 2011.

1.6.4.1 Datos de la empresa proveedora de caucho.

La empresa con la cual estamos trabajando es Pavimentos Deportivos S.A.C.

La planta de esta entidad se encuentra ubicada en Av. Panamericana Sur Km. 17.8 Lima 42-Perú. Es una de las empresas pioneras en la producción de caucho y se encuentra alrededor de 12 años en el mercado nacional, siendo uno de los principales proveedores de este material reciclado en el Perú.

Proceso de obtención del caucho.

- Pavimentos Deportivos S.A.C tiene una política medioambientalista, su trabajo se basa en tener un trato amable con el medio ambiente, por ello está comprometido a trabajar con materiales que se puedan reciclar. Como materia prima para obtener el caucho triturado, granulado, etc., recicla neumáticos de vehículos pesados, en especial de volquetes o maquinaria pesada que las minas desechan.
- Lo neumáticos una vez en la planta de tratamiento previos a ser triturados por un proceso mecánico, el personal especializado retira los alambres y los textiles de los neumáticos, los cuales posteriormente serán vendidos a otras empresas para su respectivo reciclado.
- Los neumáticos una vez libre de alambres y textiles pasa por una máquina trituradora, la cual es la encargada de darle el adecuado tamaño para su comercialización. Pavimentos deportivos vende diferentes presentaciones del caucho reciclado, tales como, triturado, granulado, granulado de colores, etc.

1.6.4.1.1 Cantidades de producción del caucho.

Producción de Caucho en la actualidad.

Tabla

12

Producción de Caucho de Pavimentos Deportivos S.A.C

Presentación del caucho	Producción diaria (Tn)	Producción mensual (Tn)
Triturada (Rayado)	2.5	75
Granulado	3	90
Otros	0.5	15

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

Se estima que pavimentos deportivos S.A.C aproximadamente al mes produce 180 toneladas de caucho en sus diferentes presentaciones siendo las más usadas los granulados y triturados. Además, en Lima existen otras 6 empresas que se dedican al mismo rubro y tienen una producción similar a la empresa pavimentos deportivos S.A.C. Por ello, haciendo un análisis, se obtiene que anualmente en Lima se produce.

Tabla 13
Cantidad aproximado de caucho anual en Lima

Cantidad de empresas en Lima	Producción mensualmente (Tn)	Producción aprox. de Caucho mensual (Tn)	Producción aprox. de caucho anual (Tn)
7	180	1260	15120

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

Productos derivados de los NFU producidos y/o utilizados en el Perú.

- Asfalto pavimento
- Macetas.
- Suelas de zapatos
- Césped sintético
- Aislamiento acústico
- Accesorio para carros (alfombras y tapabarros)
- Mangueras.
- Muros de contención.
- Rellenos decorativos

CAPITULO 2: METODOLOGÍA

2.1 Materiales

2.1.1 Suelo arcilloso

En la presente investigación se trabajará con un suelo arcilloso de baja plasticidad, el cual será extraído a una profundidad aproximada de 1,5 metros del Caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca. Para ello, es necesario realizar el viaje a la zona de trabajo y extraer el material de manera delicada y evitar la alteración de esta, para obtener valores más exactos al momento de realizar los ensayos en el laboratorio.

Figura 13 Muestra Arcilla, elaboración propia.

2.1.2 Caucho Triturado

El caucho triturado reciclado es el segundo material que se usará en la investigación. Este material será proporcionado por la empresa PAVIMENTOS DEPORTIVOS, el cual fue obtenido de los neumáticos fuera de uso, entre sus principales características físicas presentan un peso de partículas de metal menor al 0.01% y el peso de restos textiles será menor a 1%. Además, presenta una granulometría entre 0.5 a 3mm.

Figura 14 Caucho Triturado, adaptado de: elaboración propia.

2.1.3 Mezcla de Suelo arcilloso con Caucho Triturado

Las mezclas que se usarán estarán preparadas con diferentes porcentajes de contenido de caucho triturado, esto se realizará con el fin de analizar la variación de las propiedades mecánicas a medida que se incremente el contenido de caucho triturado. Luego de realizar dicho análisis se determinará la mezcla óptima, la cual presentará las mejores propiedades mecánicas a comparación de las otras mezclas elaboradas y del suelo natural. Las mezclas de suelo arcilloso se realizarán con un 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5% de caucho triturado. En la Tabla 14 se detalla las abreviaturas utilizadas para la identificación de cada muestra.

Tabla 14

Abreviaturas usadas para las muestras analizadas

Muestras	Suelo (%)	Caucho triturado (%)	Abreviatura
Suelo arcilloso	100	0	S100
Mezcla 1	100	0.5	S100/C0.5
Mezcla 2	100	1.5	S100/C1.5
Mezcla 3	100	2.5	S100/C2.5
Mezcla 4	100	3.5	S100/C3.5

Nota: Elaboración Propia

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Para el desarrollo de la investigación se realizó los siguientes pasos:

- Se recolectó las muestras del suelo arcilloso del caserío de Callampampa y se obtuvo el caucho triturado reciclado de la empresa PAVIMENTOS DEPORTIVOS S.A.C.
- Se tomó en cuenta los antecedentes de investigaciones con cierto grado de similitud, con ello se definió los porcentajes de combinación de caucho triturado y suelo arcilloso para lograr la mejora de las propiedades mecánicas de este.
- Se realizó los ensayos de Análisis Granulométrico por Tamizado para la porción gruesa del suelo, además, por la cantidad de limos y arcillas se realizará Granulometría por Sedimentación. Asimismo, los Límites de consistencia, Peso Específico Relativo de Sólidos y Clasificación de suelos (SUCS y AASHTO) para el suelo arcilloso, proveniente del caserío de Callampampa y las mezclas.
- A continuación, se harán los ensayos de Compactación del Proctor Modificado, de Corte Directo y CBR para evaluar los resultados de la mejora de las propiedades mecánicas del suelo. Cabe resaltar que los ensayos de Compactación, a través de la obtención de la densidad seca máxima y contenido de humedad óptima, permitirán conformar los cuerpos de prueba para los ensayos de Corte Directo y CBR. Con estas condiciones óptimas se podrá analizar los parámetros de resistencia al corte a diferentes porcentajes de caucho. Luego se realizará los ensayos de CBR, para los porcentajes de mezclas más optimas que se obtuvo de los resultados de los ensayos de Corte Directo.
- La información de los ensayos se recopilará con los formatos elaborados y los resultados se analizarán mediante gráficos para poder identificar cual es el porcentaje optimo que se le agrega al suelo arcilloso para tener resultados positivos en las propiedades mecánicas de este suelo.

2.2 Procedimiento de Ensayos.

2.2.1 Ensayos de Caracterización Física.

Se realizaron diferentes ensayos para conocer las propiedades físicas de la muestra extraída del caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca. En el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas se ejecutaron dichos ensayos teniendo en cuenta las normas técnicas peruanas (NTP), de la misma forma se tomó en cuenta el manual que brinda el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). Los ensayos se basaron en las siguientes normativas:

- NTP 339.128 / ASTM D422 (Ensayo de Análisis Granulométrico).
- NTP 339.129 / ASTM D4318 (Ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad).
- NTP 339.127 / ASTM D 2216 (Ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo)
- NTP 339.131 (Ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas del suelo)
- MTC E 118 (Materia orgánica en suelos – Perdida por ignición).

2.2.1.1 Límites de Atterberg.

Este ensayo nos brindará los datos del límite líquido y plástico de la muestra; con esta información se podrá hallar el índice de plasticidad, este se usará para realizar la clasificación del suelo mediante la carta de plasticidad. Para llevar a cabo este ensayo se necesitará el material que pase por la malla N°40 de acuerdo con la norma NTP 339.129 / ASTM D4318.

2.2.1.2 Gravedad Específica de los Sólidos.

Según la NTP 339.131, este ensayo se utiliza para determinar el peso específico de los suelos por medio del picnómetro. Para esto la muestra debe contener partículas de diámetros mayores y menores que la abertura de 2.38mm del tamiz (N°8). La cantidad de muestra a utilizar depende de la capacidad del picnómetro, es recomendable utilizar alrededor de 100g, el cual tiene que ser secado en un horno a temperatura constante de 105°C por un periodo de tiempo determinado. Esta muestra será distribuida entre tres a cuatro picnómetros y se colorea agua destilada hasta la marca de calibración. Luego se tiene que extraer el aire que tiene la muestra del picnómetro mediante una bomba de vacíos, seguidamente llenar el picnómetro con agua destilada hasta que el fondo del menisco coincida con la marca de calibración en el cuello del picnómetro. Finalmente se debe de obtener los datos para su respectivo cálculo.

2.2.1.3 Materia Orgánica en Suelos.

Según el MTC E 118 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones), el objetivo de este ensayo es determinar el contenido orgánico en la muestra arcillosa extraído del caserío de Callampampa. La muestra se debe de secar en un horno a temperatura constante de 110 °C. Escoger una muestra de peso aproximada de 10 a 40g. Finalmente, colocar la muestra dentro de la mufla durante 6 horas a 445°C. Remover la muestra de la mufla, colocar en el desecador y pesar.

2.2.1.4 Ensayo de Granulometría.

Según el NTP 339.128 / ASTM D422 la variabilidad en el tamaño de las partículas de suelos es casi ilimitada y para ser tamizado de forma eficiente se debe realizar el ensayo de granulometría. Este proceso se realizará para el suelo arcilloso de baja plasticidad y para las mezclas con 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5% de caucho triturado.

2.2.2 Ensayos de Caracterización Mecánica.

Los ensayos a realizar fueron.

- Ensayo de Proctor Modificado NTP 339.141/ MTC E115 /ASTM D1557-02.
- Ensayo de Corte Directo NTP 339.171/ MTC E 123 / ASTM D3080.
- Ensayo de California Bearing Ratio (CBR) ASTM D1883

2.2.2.1 Ensayo de Proctor Modificado

Se realizaron 5 ensayos de Proctor Modificado, método A, uno para la arcilla pura y uno con cada mezcla de suelo más caucho en un 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5%, con el objetivo de determinar el contenido óptimo de humedad y el peso unitario seco máximo para cada muestra. Para su desarrollo se tendrá en cuenta el manual de los Ensayos de Mecánica de Suelos proporcionado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016).

Figura 15 Molde Proctor Modificado. Adaptado del Manual de Ensayos de Laboratorio del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

2.2.2.2 Ensayo de Corte Directo

El ensayo de Corte Directo se realizó para la arcilla pura, de la misma forma para las mezclas de 0.5%, 1.5%, 2.5%, 3.5% con caucho triturado con el objetivo de determinar el máximo esfuerzo de corte del terreno mejorado. Los esfuerzos normales aplicados para cada ensayo serán 49kPa, 98.1kPa y 196.1kPa.

Figura 16 Esquema del aparato de resistencia al esfuerzo cortante directo: Adaptado de “Mecánica de Suelos, Volumen I”, por Juárez Badillo, 2012.

2.2.2.3 Ensayo de California Bearing Ratio (CBR).

Con el ensayo de CBR lo que se quiere determinar es el índice de resistencia del suelo para evaluar la resistencia potencial de la subrasante, sub base y material de base. Para esta investigación el ensayo de CBR se realizará a un 95% de la máxima densidad seca y a 5mm

de penetración, para el suelo natural (S100), y para las mezclas con adición de caucho de 1.5%, 2.5% y 3.5%.

El Manual de Ensayos de Laboratorio del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016) indica que el procedimiento para realizar el ensayo de CBR para suelos según los lineamientos de la norma ASTM D1883 es el siguiente. En este se especifica que las lecturas del dial se da generalmente mediante la siguiente tabla.

Milímetros	Pulgadas
0,63	0,025
1,27	0,050
1,90	0,075
2,54	0,100
3,17	0,125
3,81	0,150
5,08	0,200
7,62	0,300
10,16	0,400
12,70	0,500

Figura 17 Penetración CBR. Adaptado del “Manual de Ensayos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016.

El molde estándar para realizar el ensayo de CBR se observa en la Figura 18.

Figura 18 Ensayo del CBR Adaptado del “Manual de Ensayos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016

CAPITULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Ensayos Físicos

3.1.1 Caracterización Física del Caucho Triturado

El caucho será considerado como un agregado el cual será adicionado en 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5% a las muestras de suelo para mejorar su capacidad de resistencia al corte. Por ello, es necesario realizar los siguientes ensayos para entender el comportamiento de dicho material y estos son:

3.1.1.1 Gravedad Específica de los sólidos.

Datos

Tabla 15

Datos de laboratorio -Gs del caucho

Datos del Ensayo de Laboratorio	Muestra 1 (Caucho Granulado)	Muestra 2 (Caucho Triturado)	Muestra 3 (Caucho Granulado y Triturado)
Peso de la muestra	124.1 g	125.5 g	123.2 g
Peso de la Fiola	168.1 g	166.7 g	166.67 g
Peso de la muestra + fiola + agua	686.4 g	682.2 g	682.2 g
Peso de la fiola + agua	666.6 g	665.5 g	667.5 g

$$G_s = \frac{W_0 \times K}{W_0 + W_2 - W_1}$$

Figura 19 Cálculo de Gravedad Específica. Adaptado del “Manual de Mecánica de suelos”, por Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2019.

Donde:

- W1= Peso del picnómetro + agua+ solidos a la temperatura del ensayo (g).
- W0= Peso del suelo seco (g). El peso de la tara debe sr restado de este valor para obtener el peso del suelo seco.
- W2= Peso del picnómetro más agua a la temperatura del ensayo (g).
- K= Factor de corrección basado en el peso específico del agua a 20°C.

Tabla 16

Gravedad Específica del Caucho

Temperatura	22.4°C	k	0.9995	Densidad	997.68	kg/m3
Gs (muestra1)	1.1892			Densidad	1186.4474	kg/m3
					(muestra 1)	
Gs (muestra2)	0.8953			Densidad	893.2368	kg/m3
					(muestra 2)	
Gs (muestra3)	1.1561			Densidad	1153.5120	kg/m3
					(muestra 3)	

Nota: Resultados de laboratorio de la gravedad específica del caucho, por elaboración propia.

Observaciones.

- Se debe de tener en cuenta que al momento de realizar este ensayo el solvente que se utilizara debe de tener una densidad menor que el de la muestra que se quiere ensayar. En este caso el caucho al tener una gravedad específica menor al solvente, el cual era agua, la muestra tuvo una predisposición de no quedar en la base del picnómetro sino de elevarse hasta la superficie. Con ello, se hace difícil obtener los datos exactos.

3.1.1.2 Análisis Granulométrico por Tamizado.

Tabla 17

Peso y Tamaño de los tipos de Granulometría del Caucho

	Muestra 1 (gr)	Muestra 2(gr)	Muestra 3(gr)	
Peso muestra	907.2 g	518.9 g	538.0 g	
Tamaño Máximo	Nº4	Nº4	Nº4	
Tamaño Nominal	Nº10	Nº10	Nº10	
		Muestras		
		Muestra 1 (g)	Muestra 2(g)	Muestra 3(g)
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido	Peso retenido	Peso retenido
Nº10	2.000	277.2	64.1	120
Nº20	0.850	627.8	314.6	370.7
Nº40	0.425	1.8	96.3	32.5
Nº60	0.250		31.8	9
Nº140	0.106		11.4	5.3
Nº200	0.075		0.5	0.4
FONDO				0.5

Nota: Resultados de laboratorio del análisis granulométrico del caucho, por elaboración propia.

CURVAS GRANULOMÉTRICAS

- **Muestra N°1 (Caucho Granulado)**

Tabla 18

Granulométrica Caucho Granulado

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	% Parcial Retenido	% Acumulado	
				Retenido	Pasante
N°4	4.750	0.000	0.0%	0.0%	100.0%
N°10	2.000	277.20	30.6%	30.6%	69.4%
N°20	0.850	627.80	69.2%	99.8%	0.2%
N°40	0.425	1.80	0.2%	100.0%	0.0%
N°60	0.250	0.00	0.0%	100.0%	0.0%
N°140	0.106	0.00	0.0%	100.0%	0.0%
N°200	0.075	0.00	0.0%	100.0%	0.0%
Fondo			0.0%	100.0%	0.0%
TOTAL		906.800	100.0%		

Perdida (gr) =	0.400	D50 =	1.936 mm
Error (%) =	0.044%		

Nota: Resultados de laboratorio del análisis granulométrico del caucho granulado, por elaboración propia.

Figura 20 Curva Granulométrica del Caucho Granulado, por elaboración propia.

- **Muestra N°2 (Caucho Triturado)**

Tabla 19

Granulométrica Caucho Triturado

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	% Parcial Retenido	% Acumulado	
				Retenido	Pasante
N°4	4.750	0.000	0.0%	0.0%	100.0%
N°10	2.000	64.100	12.4%	12.4%	87.6%
N°20	0.850	314.600	60.7%	73.0%	27.0%
N°40	0.425	96.300	18.6%	91.6%	8.4%
N°60	0.250	31.800	6.1%	97.7%	2.3%
N°140	0.106	11.400	2.2%	99.9%	0.1%
N°200	0.075	0.500	0.1%	100.0%	0.0%
Fondo			0.0%	100.0%	0.0%
TOTAL		518.700	100.0%		

Perdida (gr) =	0.200	D50 =	1.452 mm
Error (%) =	0.039%		

Nota: Resultados de laboratorio del análisis granulométrico del caucho triturado, por elaboración propia.

Figura 21 Curva Granulométrica del Caucho Triturado, por elaboración propia

- **Muestra 3 (Caucho Granulado y Triturado)**

Tabla 20

Granulométrica Caucho Granulado + Triturado

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	% Parcial Retenido	% Acumulado	
				Retenido	Pasante
N°4	4.750	0.000	0.0%	0.0%	100.0%
N°10	2.000	120.000	22.3%	22.3%	77.7%
N°20	0.850	370.700	68.9%	91.2%	8.8%
N°40	0.425	32.500	6.0%	97.2%	2.8%
N°60	0.250	9.000	1.7%	98.9%	1.1%
N°140	0.106	5.300	1.0%	99.9%	0.1%
N°200	0.075	0.500	0.1%	100.0%	0.0%
Fondo			0.0%	100.0%	0.0%
TOTAL		538.000	100.0%		

Perdida (gr) =	0.000	D50 =	1.767 mm
Error (%) =	0.000%		

Nota: Resultados de laboratorio del análisis granulométrico de la mezcla de caucho granulado y triturado, por elaboración propia.

Figura 22 Curva Granulométrica de la mezcla de Caucho Granulado + Triturado, por elaboración propia.

3.1.2 Caracterización Física del Suelo.

Las muestras extraídas son del caserío de Callampampa, Llama, Cajamarca, el cual se realizó a una distancia aproximada de 20 metros de la carretera asfaltada y la calicata tuvo una profundidad promedio de 1.5 metros.

3.1.2.1 Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos en el laboratorio son:

- Límite Líquido (LL) = 34%
- Límite Plástico (LP) = 21%
- Índice de Plasticidad (LL-LP) = 13%

3.1.2.2 Clasificación del suelo natural por el método SUCS y AASHTO

De acuerdo con el sistema de clasificación de Suelos (SUCS), el suelo que se estudia es una arcilla de baja plasticidad (CL) y de acuerdo con el método AASHTO es un suelo que pertenece al grupo A-6 con un índice de grupo igual a 8, el cual es calificado como un suelo arcilloso regular o malo.

3.1.2.3 Gravedad Específica (Gs)

Teniendo en cuenta como referencia el NTP 339.131, el valor obtenido de la gravedad específica del terreno (Gs) es igual a 2.130 g/cm³.

3.1.2.4 Materia Orgánica en Suelos.

La zona de extracción de la muestra fue un lugar con una densa vegetación por ello se pudo encontrar una considerable porción de raíces en la muestra. Teniendo los parámetros que plantea el MTC E 118 para realizar de manera correcta el ensayo se tuvo un 13.4% en promedio de materia orgánica en la muestra.

3.1.2.5 Granulometría.

El análisis granulométrico por tratarse de una arcilla se tuvo que realizar en dos etapas. La primera fue por tamizado, donde la muestra a partir de la malla N°4 (4.750mm) empieza a ser retenido hasta la malla N°200 (0.075mm). En la última malla mencionada pasa gran porcentaje de material, esto nos genera una curva granulométrica incompleta. Por ello, en la segunda etapa se realiza la curva granulométría por sedimentación haciendo uso del hidrómetro. Con esto se obtendrá la curva granulométrica a partir de la malla N°200 y nos ayudará a ver el porcentaje de limo, arcilla y coloides. La curva granulométrica del suelo arcilloso que se utilizó en el trabajo se muestra en la Figura 23.

Tabla 21

Cantidad de material fino en la curva granulométrica

	Resultado (%)
Fracción gruesa	28.8%
Limo	17.9%
Arcilla	24.1%
Coloide	29.2%

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

Tabla 22

Caracterización Física del suelo del Caserío de Callampampa

Prof. (M)	Gs	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Mat. Orgánica (%)	SUCS
1.10-1.50	2.130	34	21	13	13.4	CL

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

Figura 23 Curva Granulométrica del suelo natural, por elaboración propia.

3.1.3 Caracterización Física del Suelo + Caucho Triturado.

Para esta investigación se realizó 4 mezclas con diferentes porcentajes de adición de caucho al suelo arcilloso, estos porcentajes fueron variando de acuerdo a los resultados que se iban obteniendo. Por ello, los porcentajes finales con los cuales se decidieron trabajar fueron 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5%. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

3.1.3.1 Clasificación por el Sistema SUCS y AASHTO.

En la Tabla 21 se podrá encontrar la clasificación por el sistema SUCS y AASHTO de las mezclas de 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5%. Para el primer sistema mencionado se ve que sigue siendo un suelo arcilloso de baja plasticidad, mientras que para el segundo sistema se observa que las mezclas están en el grupo de materiales limo arcillosos con un índice de grupo que va desde 4 hasta el 8.

Tabla 23
Clasificación SUCS y AASHTO de las Mezclas

	SUCS	AASHTO
S100/C0.5	CL	A - 6 (8)
S100/C1.5	CL	A - 6 (6)
S100/C2.5	CL	A - 4 (5)
S100/C3.5	CL	A - 4 (4)

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

3.1.3.2 Límites de Atterberg y Gravedad Específica.

Para cada adición definida se realizaron los límites de Atterberg y gravedad específica, estos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24
Límites de Atterberg y Gravedad Específica de las mezclas (suelo+caucho)

	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gs
S100/C0.5	33	20	13	2.131
S100/C1.5	33	22	11	2.134
S100/C2.5	31	22	9	2.142
S100/C3.5	29	21	8	2.135

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

En la Figura 24 se observa la variación del límite líquido respecto al incremento del porcentaje de caucho. Este factor nos indica el contenido de agua en porcentaje respecto al peso del suelo seco, tomando en cuenta que se debe encontrar entre el estado semi líquido y plástico. Para la muestra de S100 se necesita mayor cantidad de agua en comparación con las mezclas de caucho, por ejemplo, la mezcla S100/C3.5 tiene un límite plástico de 29%, lo cual es menor con respecto a las otras muestras. Este comportamiento se debe a que la adición del caucho en la muestra arcillosa interactúa entre las partículas de forma que necesita menos cantidad de agua.

Figura 24 Variación del Límite Líquido, por elaboración propia.

En la Figura 25 se observa la variación del límite plástico, este consiste en calcular el contenido de humedad cuando el suelo al enrollarse en hilos se agrieta, es decir está en el límite del estado semi sólido y plástico. Respecto a las muestras no se observa una gran diferencia, tanto S100 como S100/C3.5 tienen casi el mismo límite plástico, esto quiere decir que necesitan el mismo contenido de humedad. Por otro lado, la mezclas S100/C0.5 disminuye su valor del límite plástico y S100/C1.5 se incrementan respecto a la muestra S100 conllevando a una variación de su contenido de humedad.

Figura 25 Variación de Límite Plástico, por elaboración propia

En la Figura 26 se puede observar la variación del índice de plasticidad, este nos indica la variación del contenido de humedad cuando el suelo se mantiene plástico. También es un indicador de la compresibilidad del suelo, la mezcla S100 tiene un IP de 13% que viene a ser una arcilla de mediana plasticidad, pero a medida que se agrega caucho este porcentaje va disminuyendo. Siendo la mezcla más óptima el S100/C3.5 ya que su IP es de 8% lo que quiere decir que es un suelo menos compresible, de forma que sus partículas de arcillas con las de caucho se reacomodan llenando los espacios vacíos.

Figura 26 Variación de Índice de Plasticidad, por elaboración propia.

En la Figura 27 se puede observar la variación de la gravedad específica de los sólidos. Para S100 se tienen un valor de 2.130 y tiene una variación ascendente hasta la mezcla S100/C2.5 cuyo valor es de 2.142 pero en la mezcla S100/C3.5 este valor disminuye a 2.135.

Figura 27 Variación de la Gravedad Específica de los Sólidos, por elaboración propia

3.1.3.3 Granulometría.

La granulometría se realizó para los diferentes porcentajes de adición de caucho en la muestra de suelo arcilloso. Las diferencias que se obtuvo en cada curva granulométrica se observan en la Figura 28.

Tabla 25

Tamaño Máximo y Nominal del suelo + caucho

	Tamaño Máximo	Tamaño Nominal
S100	N°4 (4.750 mm)	N°6 (3.350 mm)
S100/C0.5	N°4 (4.750 mm)	N°6 (3.350 mm)
S100/C1.5	N°4 (4.750 mm)	N°6 (3.350 mm)
S100/C2.5	N°4 (4.750 mm)	N°6 (3.350 mm)
S100/C3.5	N°4 (4.750 mm)	N°6 (3.350 mm)

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

Figura 28 Curva Granulométrica de las mezclas (suelo + caucho), por elaboración propia.

En la Figura 28 se puede observar la distribución de la curva granulométrica del suelo arcilloso solo y con las diferentes mezclas de caucho triturado. Para la granulometría de S100 se observa que al tener mayor cantidad de material fino sus partículas, aproximadamente el 71% pasan por la malla n°200, esto quiere decir que solamente el 29% de sus partículas forma parte de la porción gruesa del suelo. Para las mezclas se debe de tener en cuenta que la parte gruesa del suelo interactuara directamente con el caucho, ya que su diámetro promedio es de 1.452mm. Al aumentar el contenido del caucho en el suelo causa que más porcentaje de material sea retenido por las mallas del tamiz, esto se debe a que el caucho al ser del tamaño promedio de la porción gruesa del suelo las partículas interactúen entre si quedando distribuida entre todas las mallas del tamizado, es lo que se puede observar en las curvas S100/C0.5, S100/C1.5, S100/C2.5 y S100/C3.5. Donde la última mezcla mencionada se encuentra en la parte inferior, debido a que tiene el mayor porcentaje de caucho entre todas las mezclas. También, se observará que el S100 se encuentra en la parte superior de todas las curvas, ya que al no tener adición de caucho sus partículas de la porción gruesa se podrán distribuir uniformemente en todas las mallas del tamizado.

A continuación, se muestra las curvas granulométricas de cada adición que se realizó a la muestra de suelo arcilloso

Figura 29 Curva Granulométrica de Suelo Natural + 0.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.

Figura 30 Curva Granulométrica de Suelo Natural + 1.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.

Figura 31 Curva Granulométrica de Suelo Natural + 2.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.

Figura 32 Curva Granulométrica de Suelo Natural + 3.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.

3.1.4 Caracterización Mecánica del Suelo.

En esta investigación se realizó el ensayo de corte directo y Proctor modificado para conocer las principales propiedades mecánicas que presenta la muestra de suelo arcillo proveniente del Caserío de Callampampa y ver cómo estas varían con la adición de caucho triturado.

3.1.4.1 Proctor Modificado

Para conocer el contenido de humedad y la densidad seca de un suelo es necesario realizar el ensayo de Proctor. En este caso se realizó el ensayo de Proctor Modificado y las curvas de compactación obtenidas para el suelo natural y con adición de caucho se muestran a continuación.

En la curva de compactación del Proctor modificado para el suelo natural (S100) se observa que el promedio de humedad tilda entre 15.20% a 19.90% y una densidad de suelo seco entre 1.44 g/cm³ a 1.43 g/cm³.

Tabla 26

Proctor Modificado del suelo natural

Promedio de Humedad (%)	15.20	16.70	18.30	19.90
Densidad del suelo Seco (g/cm ³)	1.44	1.53	1.52	1.43

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

Figura 33 Curvas de Compactación - Suelo Natural, por elaboración propia.

Promedio de Humedad (%)	15.10	16.60	18.10	19.70
Densidad del suelo Seco (g/cm^3)	1.447	1.530	1.528	1.437

Figura 34 Curvas de Compactación - Suelo Natural + 0.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.

Promedio de Humedad (%)	14.80	16.40	18.00	19.50
Densidad del suelo Seco (g/cm^3)	1.450	1.534	1.531	1.440

Figura 35 Curvas de Compactación - Suelo Natural + 1.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.

Promedio de Humedad (%)	14.50	16.00	17.60	19.20
Densidad del suelo Seco (g/cm^3)	1.468	1.551	1.548	1.457

Figura 36 Curvas de Compactación - Suelo Natural + 2.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.

Promedio de Humedad (%)	14.20	15.80	17.40	18.90
Densidad del suelo Seco (g/cm^3)	1.470	1.553	1.550	1.459

Figura 37 Curvas de Compactación - Suelo Natural + 3.5% Caucho Triturado, por elaboración propia.

En la Tabla 27 se encuentra un resumen del óptimo contenido de humedad (OCH) y la máxima densidad seca (MDS) obtenida en cada muestra ensayada, además en la Figura 38 se observa como las curvas de compactación cambian cuando se adiciona caucho triturado al suelo arcilloso proveniente del Caserío de Callampampa.

Para el S100 se observa que el OCH es 17.4%, este porcentaje va disminuyendo a medida que se le adiciona las porciones de caucho, la mezcla S100/C3.5 tiene un 16.4%. Sin embargo, pasa lo contrario con la MDS para el S100 se tiene un 1.535 g/cm³ y para un S100/C3.5 se tiene un 1.562g/cm³. Esto se debe a que tanto al suelo natural y a las mezclas se le aplicaron la misma fuerza de compactación (25golpes en 5capas), lo cual género que las partículas del suelo se densifiquen desplazando los espacios vacíos, esto produce que el suelo se consolide. Para el S100 en respecto a las mezclas S100/C0.5, S100/C1.5, S100/C2.5, S100/C3.5 se observará que necesitará mayor cantidad de agua para llegar a su contenido óptimo de humedad. Por otro lado, la densidad máxima seca del suelo S100 aumentará respecto de las mezclas esto quiere decir que habrá un mínimo índice de poros entre las partículas. Con esto se podrá decir que las condiciones de la mezcla S100/C3.5 será más favorable que el S100 ya que necesitara menor cantidad de agua y asimismo tendrá menor cantidad de vacío luego de la compactación, logrando un suelo más densificado.

Tabla 27

Óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca de las muestras

	S100	S100/C0.5	S100/C1.5	S100/C2.5	S100/C3.5
MDS(g/cm ³)	1.535	1.540	1.543	1.56	1.562
OCH (%)	17.4	17.2	17.0	16.7	16.4

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

Figura 38 Curvas de Compactación (Suelo + Caucho), por elaboración propia.

La máxima densidad seca del suelo arcilloso de baja plasticidad tiende a aumentar a medida que la adición de caucho triturado se incrementa. En la Figura 39 se puede observar que el valor de este parámetro para un suelo arcilloso natural es de 1.535 g/cm^3 , para la mezcla de S100/C0.5 es de 1.54 g/cm^3 , para S100/C1.5 es de 1.543 g/cm^3 , S100/C2.5 es de 1.56 g/cm^3 y para S100/C3.5 es de 1.562 g/cm^3 . La máxima densidad seca de la mezcla de suelo arcilloso con un 3.5% de caucho aumento en un 1.76% respecto a la muestra de suelo natural. Este valor representa el índice mínimo de poros, esto quiere decir entre mayor sea la cantidad del MDS en la muestra existirá menos espacios vacíos y las partículas se encontraran más unidas.

Figura 39 Variación de la Densidad Máxima del Suelo Seco, por elaboración propia.

El contenido óptimo de humedad del suelo arcilloso de baja plasticidad tiende a disminuir a medida que la adición de caucho triturado se incrementa. En la Figura 40 se puede observar que el valor de este parámetro para un suelo arcilloso natural es de 17.4%, para la mezcla de S100/C0.5 es de 17.2%, para S100/C1.5 es de 17%, S100/C2.5 es de 16.7% y para S100/C3.5 es de 16.4%. El contenido óptimo de humedad de la mezcla de suelo arcilloso con un 3.5% de caucho disminuyó en un 5.75% respecto a la muestra de suelo natural. Este valor representa la cantidad de agua que debes de agregar a la muestra para tener un contenido óptimo de humedad, esto quiere decir el agua que tiene que existir en los espacios vacíos de la muestra para que al ser sometido a un esfuerzo de compactación conserve sus propiedades mecánicas. Por ello la adición de caucho al no tener comportamiento cohesivo hace que la cantidad de agua necesaria disminuya y el caucho por tener un tamaño adecuado interactúe con los espacios vacíos de la mezcla.

Figura 40 Variación del Contenido de Humedad Óptimo, por elaboración propia.

3.1.4.2 Corte Directo

En esta investigación se incluye los resultados del ensayo de corte directo consolidado drenado que se ejecutaron a las muestras de suelo arcilloso (S100) y a las mezclas con una adición de caucho de 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5%. Para cada caso se aplicaron esfuerzos normales de 49.0kPa, 98.1kPa y 196.1kPa, dichos valores se emplearon basándose en el peso específico del suelo y de la profundidad de la cual fue extraída.

Para este ensayo se tomó en cuenta los resultados obtenidos del Proctor Modificado, ya que la humedad añadida a cada muestra fue el contenido de humedad óptimo encontrado. El ensayo de corte directo se realiza para poder conocer el esfuerzo de corte, desplazamiento vertical y horizontal, cohesión y ángulo de fricción de las muestras.

En la Figura 41 se observa la curva de esfuerzo de corte respecto a la deformación horizontal del suelo natural(S100). Para un esfuerzo normal de 49kPa se ve que el esfuerzo de corte máximo es de 43.2kPa. Para el segundo esfuerzo normal de 98.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 62kPa. Finalmente, para el esfuerzo normal de 196.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 99.4kPa. Todos los esfuerzos de cortes máximos se dieron a una deformación horizontal de 2.5mm. Además, entre mayor esfuerzo normal se aplica a la muestra, esta se densifica más, por ello su resistencia al esfuerzo de corte pico también se incrementa.

Figura 41 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100), por elaboración propia.

En la Figura 42 se observa la curva de esfuerzo de corte respecto a la deformación horizontal para la mezcla S100/C0.5. Para un esfuerzo normal de 49kPa se ve que el esfuerzo de corte máximo es de 45.1kPa. Para el segundo esfuerzo normal de 98.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 63.8kPa. Finalmente, para el esfuerzo normal de 196.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 101kPa. Todos los esfuerzos de cortes máximos se dieron a una deformación horizontal de 2.5mm. Además, entre mayor esfuerzo normal se aplica a la

muestra, esta se densifica más, por ello su resistencia al esfuerzo de corte pico también se incrementa

Figura 42 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100/C0.5), por elaboración propia.

En la Figura 43 se observa la curva de esfuerzo de corte respecto a la deformación horizontal para la mezcla S100/C1.5. Para un esfuerzo normal de 49kPa se ve que el esfuerzo de corte máximo es de 48.2kPa. Para el segundo esfuerzo normal de 98.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 66.6kPa. Finalmente, para el esfuerzo normal de 196.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 103.4kPa. Todos los esfuerzos de cortes máximos se dieron a una deformación horizontal de 2.5mm. Además, entre mayor esfuerzo normal se aplica a la muestra, esta se densifica más, por ello su resistencia al esfuerzo de corte pico también se incrementa

Figura 43 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100/C1.5), por elaboración propia.

En la Figura 44 se observa la curva de esfuerzo de corte respecto a la deformación horizontal para la mezcla S100/C2.5. Para un esfuerzo normal de 49kPa se ve que el esfuerzo de corte máximo es de 55.5kPa. Para el segundo esfuerzo normal de 98.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 72.5kPa. Finalmente, para el esfuerzo normal de 196.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 106.4kPa. Todos los esfuerzos de cortes máximos se dieron a una deformación horizontal de 2.5mm. Además, entre mayor esfuerzo normal se aplica a la muestra, esta se densifica más, por ello su resistencia al esfuerzo de corte pico también se incrementa

Figura 44 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100/C2.5), por elaboración propia.

En la Figura 45 se observa la curva de esfuerzo de corte respecto a la deformación horizontal para la mezcla S100/C3.5. Para un esfuerzo normal de 49kPa se ve que el esfuerzo de corte máximo es de 58.4kPa. Para el segundo esfuerzo normal de 98.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 74.8kPa. Finalmente, para el esfuerzo normal de 196.1kPa se obtiene un esfuerzo de corte máximo de 108.8kPa. Todos los esfuerzos de cortes máximos se dieron a una deformación horizontal de 2.5mm. Además, entre mayor esfuerzo normal se aplica a la muestra, esta se densifica más, por ello su resistencia al esfuerzo de corte pico también se incrementa

Figura 45 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte (S100/C3.5), por elaboración propia.

En la Tabla 28 se observa la cohesión y el ángulo de fricción que se obtuvo para cada muestra, asimismo en la Figura 46 Se ve la envolvente de falla para cada muestra, donde la cohesión aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de caucho triturado y el ángulo de fricción tiene un comportamiento inverso.

Tabla 28

Cohesión y Ángulo de Fricción (Suelo+Caucho)

	Cohesión (kPa)	Angulo Fricción (°)
S100	24.51	20.9
S100/C0.5	26.48	20.8
S100/C1.5	29.42	20.6
S100/C2.5	38.25	19.1
S100/C3.5	40.21	19.0

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

Figura 46 Esfuerzo Normal Vs Esfuerzo de Corte (Suelo + Caucho), por elaboración propia.

En la Figura 47 se observa que la cohesión que presenta un suelo arcilloso de baja plasticidad es de 0.25 y cuando se adiciona un 0.5% de caucho su cohesión asciende a 0.27. Este comportamiento se mantiene en todas las muestras, es por ello que cuando la adición de caucho tiene un valor de 3.5% la cohesión asciende a 0.41, lo cual es una mejora de aproximadamente 64% respecto al suelo natural. La cohesión de la muestra se incrementa debido a que las partículas del caucho y del suelo arcilloso de baja plasticidad tienen una muy buena unión u atracción entre sus moléculas.

Figura 47 Variación de la Cohesión, por elaboración propia.

La influencia de la adición de caucho triturado en el ángulo de fricción de las muestras ensayadas es opuesta al comportamiento de la cohesión, es decir el ángulo de fricción disminuye a medida que la adición de caucho al suelo arcilloso de baja plasticidad aumenta. En la Figura 48 este parámetro tiene un valor de 20.9° para la muestra de suelo natural, para la mezcla S100/C0.5 es de 20.8° , para S100/C1.5% es de 20.6° , para S100/C2.5% es de 19.1° y para S100/C3.5% es de 19° . El ángulo de fricción de la mezcla de suelo adicionado con 3.5% de caucho disminuye en un 9.1% respecto a la muestra de suelo arcilloso natural.

Figura 48 Variación del Ángulo de Fricción, por elaboración propia.

En la Tabla 29 se detalla los valores de esfuerzo de corte para cada mezcla ensayada cuando se le aplica el esfuerzo normal con un valor de 49kPa, 98.1kPa y 196.1Pa.

Tabla 29

Esfuerzo de Corte Suelo + Caucho

Esf Normal (kPa)	Esfuerzo de Corte (kPa)				
	S100	S100/C0.5	S100/C1.5	S100/C2.5	S100/C3.5
49.0	43.2	45.1	48.2	55.5	58.4
98.1	62.0	63.8	66.6	72.5	74.8
196.1	99.4	101.0	103.4	106.4	108.8

Nota: Adaptado de resultados de laboratorio, por elaboración propia.

En las siguientes figuras se presenta la variación de la resistencia al esfuerzo de corte cuando se adiciona caucho triturado al suelo arcilloso de baja plasticidad en un 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5%. Los esfuerzos normales aplicados para cada muestra fueron de 49kPa, 98.1kPa y 196.1kPa.

En la Figura 49 las muestras están sometidas a un esfuerzo normal de 49kPa y los esfuerzos cortantes máximos se dan cuando el desplazamiento horizontal es 2.5mm. Para el S100 la resistencia al corte es de 43.2kPa y para la mezcla S100/C0.5 es de 45.1kPa, es decir la resistencia al esfuerzo de corte aumenta cuando el contenido de caucho se incrementa. Por ello el suelo con un contenido de caucho de 3.5% es mayor que el resto de las muestras, teniendo un esfuerzo de corte de 58.4kPa. Este comportamiento se debe a que los vacíos existentes en el suelo arcilloso de baja plasticidad son llenados por las partículas del caucho triturado, lo que ocasiona que la muestra se pueda densificar a mayores niveles y este a su vez ayuda a que la resistencia al corte se incremente.

Figura 49 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte con un esfuerzo de normal de 49kPa, por elaboración propia.

En la Figura 50 las muestras están sometidas a un esfuerzo normal de 98.1kPa y los esfuerzos cortantes máximos se dan cuando el desplazamiento horizontal es 2.5mm. Para el S100 la resistencia al corte es de 62.0kPa y para la mezcla S100/C0.5 es de 63.8kPa, es decir la resistencia al esfuerzo de corte aumenta cuando el contenido de caucho se incrementa. Por ello el suelo con un contenido de caucho de 3.5% es mayor que el resto de las muestras, teniendo un esfuerzo de corte de 74.8kPa. Este comportamiento se debe a que los vacíos existentes en el suelo arcilloso de baja plasticidad son llenados por las partículas del caucho triturado, lo que ocasiona que la muestra se pueda densificar a mayores niveles y este a su vez ayuda a que la resistencia al corte se incremente. Además, los esfuerzos de corte de todas las muestras son mayores en comparación a los valores obtenidos cuando estas están sometidas a un esfuerzo normal de 49kPa. Este comportamiento se debe a que el nivel confinamiento es mayor cuando se aplica un esfuerzo normal de 98.1kPa.

Figura 50 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte con un esfuerzo de normal de 98.1kPa, por elaboración propia.

En la Figura 51 las muestras están sometidas a un esfuerzo normal de 196.1kPa y los esfuerzos cortantes máximos se dan cuando el desplazamiento horizontal es 2.5mm. Para el S100 la resistencia al corte es de 99.4kPa y para la mezcla S100/C0.5 es de 101.0kPa, es decir la resistencia al esfuerzo de corte aumenta cuando el contenido de caucho se incrementa. Por ello el suelo con un contenido de caucho de 3.5% es mayor que el resto de las muestras, teniendo un esfuerzo de corte de 108.8kPa. Este comportamiento se debe a que los vacíos existentes en el suelo arcilloso de baja plasticidad son llenados por las partículas del caucho triturado, lo que ocasiona que la muestra se pueda densificar a mayores niveles y este a su vez ayuda a que la resistencia al corte se incremente. Además, los esfuerzos de corte de todas las muestras son mayores en comparación a los valores obtenidos cuando estas están sometidas a un esfuerzo normal de 49kPa y 98.1kPa. Este comportamiento se debe a que el nivel confinamiento es mucho mayor cuando se aplica un esfuerzo normal de 196.1kPa.

Figura 51 Deformación Horizontal Vs Esfuerzo de Corte con un esfuerzo de normal de 196.1kPa, por elaboración propia.

En conclusión, en la Figura 52 se observa las variaciones de los valores del esfuerzo de corte para cada esfuerzo normal aplicado en cada una de las muestras ensayadas.

Figura 52 Variación del Esfuerzo de Corte, por elaboración propia.

3.1.4.2.1 Variación Volumétrica

A continuación, se analizará la variación volumétrica (deformación horizontal vs deformación vertical) cuando se le aplica un esfuerzo normal de 49kPa, 98.1kPa y 196.1kPa a una muestra de suelo natural (S100) y a las mezclas con una adición de 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3,5% de caucho triturado respectivamente.

Para la Figura 53 se observa la variación volumétrica de S100 sometido a los esfuerzos normales establecidos para el confinamiento de la muestra. Para el primer valor cuando el esfuerzo de confinamiento es de 49.0kPa, se observa en la curva azul que el suelo tiende a expandirse los primeros 0.5mm del desplazamiento horizontal para luego comprimirse en los 0.25 mm sucesivos, luego nuevamente se expande y se comprime, sin embargo para este nivel de confinamiento el primer tramo de la gráfica debió corresponder a un efecto de compresión, tal como se ve en las gráficas para un esfuerzo de confinamiento de 98.1 kPa y 196.1kPa, donde se observa que a mayor grado de confinamiento menor compresión y mayor expansión, se explica el comportamiento de este hecho que la fase de confinamiento no haya sido concluida con éxito, sin embargo su expansión del cuerpo de prueba es menor que la expansión de las otras muestras debido a su densificación menor. Para el segundo valor, 98.1kPa, se observa en la curva naranja que el suelo tiende a comprimirse en un inicio y luego se expande, sin embargo, vuelve a comprimirse y expandirse ligeramente a medida que el desplazamiento horizontal aumenta. Este comportamiento se debe a que el nivel de densificación es mayor que cuando se aplica un esfuerzo normal de 49kPa. Para el tercer valor, 196.1kPa, se observa en la curva verde que el suelo tiende a comprimirse muy levemente los primeros 0.75mm de desplazamiento horizontal, luego se expande, a l 1.5mm hasta el 2.0mm se vuelve a comprimir y finalmente se expande hasta el final de la curva. Este comportamiento, expandirse en su mayoría, se debe a que el nivel de confinamiento es mayor en comparación a la muestra aplicada a un esfuerzo normal de 49kPa y 98.1kPa, es decir el suelo llega a su máxima capacidad de contraerse, por ello lo único que le queda por hacer es expandirse.

Figura 53 Deformación Volumétrica - S100, por elaboración propia.

Es la Figura 54 se observa la variación volumétrica de S100/C0.5 sometido a tres esfuerzos normales. Para el primero valor, 49.0kPa, se observa en la curva azul que el suelo tiende a expandirse los primeros 0.5mm del desplazamiento horizontal y aproximadamente en un 1 mm más tiende a comprimirse y luego nuevamente se expande. Para el segundo valor, 98.1kPa, se observa en la curva naranja que la mezcla tiende a expandirse los primeros 0.5mm desplazamiento horizontal y aproximadamente en los 0.25 mm sucesivos tiende a comprimirse y luego nuevamente se expande y se comprime, este comportamiento es muy parecido al suelo natural(S100) cuando se encuentra sometido a un esfuerzo normal de 49kPa. Para el tercer valor, 196.1kPa, se observa en la curva verde que el suelo tiende a comprimirse levemente los primeros 0.5mm de desplazamiento horizontal, luego se expande teniendo algunos intervalos donde se comprime ligeramente. Este comportamiento, expandirse en su mayoría, se debe a que el nivel de confinamiento es mayor en comparación a la muestra aplicada a un esfuerzo normal de 49kPa y 98.1kPa, es decir el suelo llega a su máxima capacidad de contraerse, por ello lo único que le queda por hacer es expandirse.

Figura 54 Deformación Volumétrica - S100/C0.5, por elaboración propia.

Es la Figura 55 se observa la variación volumétrica de S100/C1.5 sometido a tres esfuerzos normales. Para el primero valor, 49.0kPa, se observa en la curva azul que el suelo tiende a expandirse los primeros 0.5mm desplazamiento horizontal y aproximadamente en un 0.25 mm más tiende a comprimirse y luego nuevamente se expande, este comportamiento es muy parecido al suelo natural(S100) cuando se encuentra sometido a un esfuerzo normal de 49kPa. Para el segundo valor, 96.1kPa, tiende a expandirse los primeros 0.5mm del desplazamiento horizontal y aproximadamente en los 0.25 mm sucesivos tiende a comprimirse y luego nuevamente se expande y se comprime, este comportamiento es muy parecido a la mezcla S100/C0.5 cuando se encuentra sometida a un esfuerzo normal de 98.1kPa. La diferencia entre estos dos se da en el valor del desplazamiento vertical, ya que cuando el esfuerzo de corte es máximo el desplazamiento vertical para S100/C0.5 es mayor que el de la mezcla S100/C1.5. Para el tercer valor, 196.1kPa, se observa en la curva verde que el suelo tiende a comprimirse más que la mezcla S100/C0.5 los primeros 0.5mm de desplazamiento horizontal, luego se expande casi en la totalidad del desplazamiento horizontal. Este comportamiento, expandirse en su mayoría, se debe a que el nivel de confinamiento es mayor en comparación a la muestra aplicada a un esfuerzo normal de 49kPa y 98.1kPa, es decir el suelo llega a su máxima capacidad de contraerse, por ello lo único que le queda por hacer es expandirse.

Figura 55 Deformación Volumétrica - S100/C1.5, por elaboración propia.

Es la Figura 56 se observa la variación volumétrica de S100/C2.5 sometido a tres esfuerzos normales. Esta mezcla presenta un comportamiento diferente en comparación a la variación volumétrica de S100, S100/C0.5, S100/C1.5 y S100/C3.5. Primero, para el esfuerzo normal de 49.0kPa, se observa en la curva azul que el suelo tiende a expandirse aproximadamente el primer milímetro de desplazamiento horizontal y los 0.25 mm sucesivos tiende a comprimirse, luego se vuelve a expandir casi en la totalidad del desplazamiento horizontal restante, sin embargo para este nivel de confinamiento el primer tramo de la gráfica debió corresponder a un efecto de compresión, tal como se ve en las gráficas para un esfuerzo de confinamiento de 98.1 kPa y 196.1 kPa, donde se observa que a mayor grado de confinamiento menor compresión y mayor expansión, se explica el comportamiento de este hecho que la fase de confinamiento no haya sido concluida con éxito, sin embargo su expansión del cuerpo de prueba es menor que la expansión de las otras muestras debido a su densificación menor. Segundo, para el esfuerzo normal de 98.1kPa, tiende a comprimirse y expandirse ligeramente en los primeros 0.5 mm del desplazamiento horizontal y aproximadamente en los 0.25 mm sucesivos tiende a comprimirse significativamente, luego se vuelve a expandir casi en la totalidad del desplazamiento horizontal restante. Finalmente, para el esfuerzo normal de 196.1kPa, se observa en la curva verde que el suelo tiende

solamente a expandirse a lo largo de todo el desplazamiento horizontal. Este comportamiento se debe a que la muestra esta comprimida en su límite, por lo que solo le queda expandirse.

Figura 56 Deformación Volumétrica - S100/C2.5, por elaboración propia.

Es la Figura 57 se observa la variación volumétrica de S100/C3.5 sometido a tres esfuerzos normales. Esta mezcla presenta un comportamiento similar cuando es sometida a diferentes esfuerzos normales. Es decir, cuando se aplica un valor de 49.0kPa, 98.1kPa y 196.1kPa la mezcla en un inicio tiene una ligera compresión, pero luego solo tiende a expandirse. Como ya se explicó en las anteriores mezclas el suelo solo se expande cuando la compresión está en su límite. En esta mezcla, S100/C3.5, ese comportamiento se da casi desde el inicio, ya que el porcentaje de caucho es mayor y esto ayuda a que los espacios vacíos que son llenados por los finos del caucho triturado se incrementen, lo que hace que la densificación de la muestra este a mayores niveles desde un inicio.

Figura 57 Deformación Volumétrica - S100/C3.5, por elaboración propia.

En la Figura 58 se analizó como varia la deformación vertical a medida que se adiciona caucho triturado en el suelo arcilloso de baja plasticidad, cuando el desplazamiento horizontal es 2.5mm. Como se observa la deformación vertical disminuye cuando la adición de caucho triturado es hasta 2.5%, pero se incrementa cuando la adición pasa a ser en un 3.5%. La variación más importante o abrupta se da cuando el suelo arcilloso de baja plasticidad adicionado con un 1.5% de caucho pasa a tener una adición de 2.5%, por ello podemos decir que la mejora en su resistencia al esfuerzo de corte de la mezcla S100/2.5 tienen mayor relevancia. A pesar que la muestra de S100/C3.5 su esfuerzo de corte es mayor en comparación a todas las muestras, esta no tiene mucha relevancia, ya que comparado a la mezcla S100/C2.5 su valor de mejora de la resistencia al esfuerzo de corte no es muy alta.

Figura 58 Variación de la Deformación Vertical, por elaboración propia.

3.1.4.3 California Bearing Ratio (CBR).

En esta investigación incluye los resultados del ensayo de California Bearing Ratio (CBR) que se ejecutaron a las muestras de suelo arcilloso (S100) y mezclas con una adición de caucho de 1.5%, 2.5% y 3.5%. Para cada caso se aplicaron energías de compactación de 27.4kg-cm/cm³, 12.2kg-cm/cm³ y 6.1kg-cm/cm³.

Para este ensayo se tomó en cuenta los resultados obtenidos del Proctor Modificado, ya que la humedad añadida a cada mezcla fue la óptima. Se realizará para poder conocer la calidad del suelo aplicado a pavimentos. En los siguientes gráficos se puede observar el CBR a una determinada profundidad de penetración sometido a diferentes cargas.

En la Figura 59 se muestra la curva de penetración del ensayo del CBR para el suelo natural (S100). Se cuenta con tres curvas correspondiente a 12, 26 y 55 golpes. A medida que se incrementa la cantidad de golpes, aumenta la energía de compactación y a su vez la carga para tener la penetración establecida de 2.5mm. Para el suelo natural el CBR obtenido para un 95% de M.D.S y a 2.5mm de penetración es de 3.2%. Este porcentaje se debe a las propias características del suelo arcillo de baja plasticidad. Este suelo S100 tiende a expandirse más fácilmente, ya que sus espacios vacíos cuentan con agua entre sus partículas, teniendo un comportamiento más plástico al momento de ser sometidos a una carga de penetración, esto le quita rigidez a la muestra.

Figura 59 Curva de Penetración (S100), por elaboración propia.

En la Figura 60 se muestra la curva de penetración del ensayo del CBR para la mezcla (S100/C1.5). Para el suelo natural con adición de 1.5% de caucho el CBR obtenido para un 95% de M.D.S y a 2.5mm de penetración es de 5.0%. Este porcentaje se debe a las propias características de la mezcla, ya que el caucho al tener un promedio de 1.5mm de diámetro llena los vacíos del suelo S100 y no permite que estos se llenen de agua luego de los 4 días de inmersión, esto ayuda a rigidizar la mezcla.

Figura 60 CBR – Curva de Penetración (S100/C1.5), por elaboración propia.

En la Figura 61 se muestra la curva de penetración del ensayo del CBR para la mezcla (S100/C2.5). Para el suelo natural con adición de 2.5% de caucho el CBR obtenido para un 95% de M.D.S y a 2.5mm de penetración es de 8.7%. Este porcentaje respecto al anterior se observó que tiene un aumento considerable, ya que el caucho al estar en mayor porcentaje

llena más vacíos entre las partículas del suelo S100 y no permite que estos se llenen de agua luego de los 4 días de inmersión, esto ayuda a rigidizar y reducir la plasticidad de la mezcla.

Figura 61 CBR – Curva de Penetración (S100/C2.5)

En la Figura 62 se muestra la curva de penetración del ensayo del CBR para la mezcla (S100/C3.5). Para el suelo natural con adición de 3.5% de caucho el CBR obtenido para un 95% de M.D.S y a 3.5mm de penetración es de 9.4%. Este porcentaje se debe a las propias características de la mezcla, ya que el caucho llena los vacíos del suelo S100 y no permite que estos se llenen de agua luego de los 4 días de inmersión, esto ayuda a rigidizar y densificar las partículas del suelo, asimismo, disminuyo la plasticidad.

Figura 62 CBR – Curva de Penetración (S100/C3.5), por elaboración propia.

3.1.4.3.1 Porcentajes de CBR.

El CBR para una penetración de 2.5mm al 95% de MDS se presenta en el siguiente ítem:

- **CBR a 2.5mm de penetración y al 95% de las M.D.S.**

En la Figura 64 se observa el porcentaje de variación del CBR al 95% de la máxima densidad seca de las mezclas y a una profundidad de penetración de 2.5mm. Para la muestra S100 se tiene un CBR de 3.2% y a medida que se adiciona caucho triturado este aumenta. Para una mezcla de S100/C1.5, S100/C2.5 y S100/C3.5 aumenta 5.0%, 8.7% y 9.4% respectivamente el CBR.

Para la investigación se tendrá que tomar en cuenta los resultados más críticos, el cual se da en condiciones del 95% de la máxima densidad seca y 2.5mm de penetración. El CBR que tiene el suelo es de 3.2% debido a que, en un suelo arcilloso de baja plasticidad, el cual con el contacto con el agua tiende a expandirse, pero a medida que aumenta el caucho en los porcentajes propuestos este factor de resistencia a la penetración aumenta. Esto se debe a que la cantidad de vacíos en las mezclas interactúan con el caucho, lo cual impide el ingreso del agua, dando mayor rigidez al suelo. Se ve que las mezclas S100/C2.5 y S100/C3.5 cuyo valor de CBR es de 8.7% y 9.4%, cumplen con las condiciones para una subrasante aceptable. En la Figura 63 se observa que CBR de 6% a 10% son subrasante consideradas regular.

Categorías de Sub rasante	CBR
S ₀ : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

Figura 63 Categorías de Sub rasante según su CBR, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Figura 64 CBR a 2.5mm de penetración y a 95% de las M.D.S. por elaboración propia.

CAPITULO 4: CONCLUSIONES

- Se halló la gravedad específica de los sólidos para el caucho triturado, se obtuvo un G_s de 0.895, cuyo valor es aproximado al real del caucho, que viene a ser 0.95. Además, su granulometría muestra que tiene partículas distribuidas de forma más uniforme en las mallas granulométricas y estos tienen una longitud aproximada de 1.452mm. Este factor es importante para realizar la investigación, ya que existirá mejor interacción con las partículas del suelo. Por ello, será el material que se adicionará a las muestras de suelo arcilloso proveniente del caserío de Callampampa-Cajamarca, para realizar los ensayos de compactación, corte directo y CBR.
- Se tomó en cuenta las investigaciones realizadas en el estado del arte, por ello el porcentaje de caucho triturado que se adicionará al suelo arcilloso de baja plasticidad será de 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5% del peso seco de la muestra.
- El suelo natural (S100) investigado según la clasificación SUCS es un suelo arcilloso de baja plasticidad (CL), ya que su límite líquido es 34%, el límite plástico es 21% y el índice de plasticidad es 13%. Además, según la clasificación AASHTO este suelo pertenece a grupo A-6 con un índice de grupo igual a 8. Asimismo, para la clasificación SUCS las muestras S100, S100/C0.5, S100/C1.5, S100/C2.5 y S100/C3.5 son denominados suelos arcillosos de baja plasticidad (CL). Para la clasificación AASHTO la muestra de suelo natural, la mezcla S100/C0.5 y S100/C1.5 pertenecen al grupo A-6 con un índice de grupo igual a 8, 8 y 6 respectivamente, además las mezclas S100/C2.5 y S100/C3.5 pertenecen al grupo A-4 con un índice de grupo igual a 5 y 4 respectivamente. Este cambio se debe a que el porcentaje que pasa por la malla n°200, el límite líquido y el índice de plasticidad disminuye a medida que se incrementa la adición de caucho triturado. Además, a medida que aumenta la adición de caucho triturado en el S100, la gravedad específica de los sólidos para la mezcla se incrementa, por otro lado, el límite líquido y el índice de plasticidad disminuye. La variación porcentual de este último parámetro respecto al suelo natural muestra que la mezcla S100/C3.5 tiene un mayor porcentaje de variación, lo cual es del 38%. Además, se observa que existe una variabilidad abrupta entre las mezclas S100/C1.5 y S100/C2.5, ya que de un 15% de variación del índice de plasticidad respecto a la muestra S100 pasa hasta un 31%.
- Se obtuvo el contenido de humedad óptimo y la máxima densidad seca de los ensayos de Proctor Modificado para el suelo natural (S100) y para las mezclas con caucho

triturado, S100/C0.5, S100/C1.5, S100/C2.5 y S100/C3.5. Se observó que se incrementa la densidad seca de las mezclas respecto al suelo natural. Por otro lado, para el S100 se tiene un MDS de 1.535 g/cm^3 y para una mezcla S100/C3.5 es de 1.562 g/cm^3 , porcentualmente aumento un 1.76%. Además, se observó que existe una variación abrupta entre las mezclas S100/C1.5 y S100/C2.5, ya que de un 0.52% de variación del MDS respecto a la muestra S100 pasa hasta un 1.62%. Con estos resultados se llegó a la conclusión que la adición de caucho a la muestra hizo que los espacios vacíos del suelo disminuyan y con ello la muestra tenga un comportamiento menos expansivo. De la misma forma, se observó una disminución del contenido óptimo de humedad respecto al suelo natural. Para el S100 se tiene un OCH de 17.4% y para una mezcla S100/C3.5 es de 16.4%, porcentualmente disminuyo un 5.75%. Adicionalmente, se observa que existe una variación alta entre las mezclas S100/C1.5 y S100/C2.5, ya que de un 2.30% de variación del MDS respecto a la muestra S100 pasa hasta un 4.02%. Con estos resultados se llegó a la conclusión que entre mayor adición de caucho a la muestra, esta necesita menor cantidad de agua para tener un contenido de humedad óptimo.

- Cuando al suelo arcilloso se le adicionó caucho triturado la resistencia al corte aumentó para cada esfuerzo normal aplicado respectivamente a un desplazamiento horizontal de 2.5mm. Se observó que un suelo natural adicionado con 0.5% de caucho ya presentó mejoras en dicho parámetro, ya que de 43.2kPa aumento a 45.1kPa. De la misma forma, se observó que la resistencia al corte de la mezcla S100/C3.5, cuando se somete a un esfuerzo normal aplicado de 49kPa aumentó a comparación del suelo natural (S100) de 43.2kPa a 58.4kPa, de un 62kPa a 74.8kPa cuando el esfuerzo normal aplicado es de 98.1kPa y de un 99.4kPa a 108.8kPa cuando el esfuerzo normal es de 196.1kPa.
- El ensayo de corte directo nos brindó información sobre la envolvente de falla, donde los parámetros analizados fueron la cohesión y el ángulo de fricción. Se observó que la cohesión se incrementa a medida que la adición de caucho aumenta. Para la mezcla del suelo más caucho al 3.5% (S100/C3.5) el valor de la cohesión es de 0.41 que a comparación de la cohesión del suelo natural (S100) se incrementó en un 64%. El ángulo de fricción tiene un comportamiento inverso al de la cohesión es decir disminuye a medida que la adición de caucho se incrementa. Se observó que el ángulo de fricción de la mezcla de suelo arcilloso más caucho al 3.5% (S100/C3.5)

presenta un valor igual a 19° que a comparación del ángulo de fricción del suelo natural disminuyo en 9.1%.

- Se analizó las características mecánicas de cada muestra, esto nos llevó a decir que la muestra de suelo arcilloso adicionada con caucho triturado al 3.5% (S100/C3.5) es la mezcla más óptima, ya que presentó la mayor resistencia al corte respecto a las otras muestras. Su resistencia al corte con un esfuerzo normal de 49kPa es de 58.4kPa, lo cual representa una mejora del más del 30% en comparación del suelo natural.
- Para la determinación del CBR se tuvo en cuenta el caso más crítico (normado), el cual fue a 95% de la M.D.S y a 2.5mm de penetración, donde se observó que las mezclas S100/C1.5, S100/C2.5, S100/C3.5 mejoraron en un 56%, 172% y 194% en comparación al S100. Viendo que los últimos dos porcentajes tienen un aumento considerable de casi el doble, lo cual se debió a que el caucho llena los espacios vacíos que existe en el suelo arcilloso, esto ayuda a tener un material más homogéneo. El CBR para S100/C3.5 es de 9.4%, lo cual demuestra que la mezcla puede ser usado como material para una sub rasante regular, según lo especificado en los manuales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

CAPITULO 5: RECOMENDACIONES

- Realizar un ensayo químico al caucho para ver la interacción química de este residuo solido con la muestra que se vaya a trabajar, en este caso con los minerales de la arcilla.
- Para el ensayo de Proctor Modificado realizar una curva de compactación con más de 4 puntos, ya que eso te da un contenido de humedad y una densidad máxima del suelo más cercano a la realidad.
- En preferencia realizar el Proctor modificado, ya que los resultados se asemejan a la realidad y puede servir como investigación para otras tesis referidas a la línea de transportes y pavimentos.
- Se podría realizar un análisis geotécnico del cambio radical de la resistencia del corte del suelo entre los porcentajes 1.5% y 2.5%.
- Trabajar con un porcentaje mayor al 3.5% de caucho triturado y ver en qué porcentaje de adición de caucho las propiedades de resistencia del corte empiezan a disminuir.
- Realizar el CBR del suelo arcilloso más caucho triturado y algún otro residuo solido con el objetivo de aumentar su porcentaje de CBR y pueda ser aceptado como material mejorante para la subrasante de una obra de infraestructura.

REFERENCIAS

- Akbulut, S., Arasan, S., & Kalkan, E. (2007). Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. *Applied Clay Science*, 38(1-2), 23-32. doi:10.1016/j.clay.2007.02.001
- Badillo, J (2012). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa Editorial
- Bekhiti, M., Trouzine, H., & Rabehi, M. (2019). Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay soil. *Construction and Building Materials*, 208, 304-313. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.011.
- Berry, P., Reid, D., & Reid, Dave. (1997). *Mecánica de suelos*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Braja M. Das (2008). *Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica*. Mexico: CENGAGE Learning.
- Cabalar, A. F., Karabash, Z., & Mustafa, W. S. (2014). Stabilising a clay using tyre buffings and lime. *Road Materials and Pavement Design*, 15(4), 872-891. doi:10.1080/14680629.2014.939697.
- Castro, A. (2017). “Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de Subrasante”. (Tesis de Grado, Universidad de Nacional de Ingeniería, Facultad Ingeniería Civil. Lima: Perú). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/10054> [Consulta el 23 de abril del 2009]
- Castro, G (2008). Departamento de ingeniería Mecánica F.I,U,B,A: Materiales y Compuestos para la industria del neumático. Recuperado de https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf
- Cusquisibán, W (2014). “Mejoramiento de suelos arcillosos utilizando caucho granular de neumáticos con fines constructivos de pavimentos”. (Tesis de Grado, Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca: Perú). Recuperado de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNC_2a95076d61ba1517af78ba178e4d7b0d/Details [Consulta el 23 de abril de 2019].

- Fu, D., Gaudin, C., Tian, Y., Bienen, B., & Cassidy, M. J. (2018). Post-preload undrained uniaxial capacities of skirted circular foundations in clay. *Ocean Engineering*, 147, 355-369. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.10.029.
- Gálvez, V. (04 de noviembre de 2015). ¿De qué se trata eso de la brecha de infraestructura? El Comercio. Recuperado de <https://elcomercio.pe/economia/peru/trata-brecha-infraestructura-203011> [Consulta 25 de abril del 2019]
- García, X. (2019) “Mejoramiento de un suelo arcilloso de la localidad de Pacaisapa – Ayacucho utilizando residuos industriales para evaluarlo en muro hipotético de tierra estabilizado mecánicamente (MSEW),” (Tesis de Grado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.
- Hernández, J & Mejía, D (2016). “Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos en la facultad multidisciplinaria oriental de la universidad de El Salvador”. (tesis de Grado, Universidad de El Salvador. San Miguel: El Salvador). Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14342/> [Consulta el 23 de abril del 2019].
- Kalkan, E. (2013). Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils. *Applied Clay Science*, 80-81, 117-125. doi: 10.1016/j.clay.2013.06.014.
- Kishida, T. (2017). Comparison and correction of modulus reduction models for clays and silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4) doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001627.
- Lambe, W (2004). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa Editorial.
- Letcher, T. M., & Vallero, D. (Eds.). (2011). *Waste : A handbook for management*. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>
- MINAGRI, (15 de Julio, 2005). “La zonificación ecológica económica potencial de los suelos”. Recuperado de <http://www.minagri.gob.pe/portal/43-sector-agrario/suelo> [Consulta: 20 de abril del 2019].

- Özkul, Z. H., & Baykal, G. (2006). Shear strength of clay with rubber fiber inclusions. *Geosynthetics International*, 13(5), 173-180. doi:10.1680/gein.2006.13.5.173.
- Özkul, Z. H., & Baykal, G. (2007). Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 767-781. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:7(767).
- Phairuang, W., Tekasakul, P., Hata, M., Tekasakul, S., Chomanee, J., Otani, Y., & Furuuchi, M. (2019). Estimation of air pollution from ribbed smoked sheet rubber in thailand exports to japan as a pre-product of tires. *Atmospheric Pollution Research*, 10(2), 642-650. doi:10.1016/j.apr.2018.11.010
- Pomaleque, L., Estefani, J., Salas, L., Mayté, S., Zubillaga, P., y Nataly, M. (2016). "Viabilidad de la creación de una empresa reciclada y trituradora de llantas en desuso para su creación en el mercado peruano". (Tesis para Licenciamiento, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10757/621510>
- Sánchez Muñoz, M. (2015). ¿Le apuestan los sistemas de manejo de residuos sólidos en el mundo al Desarrollo Sostenible? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (1), 445-450. Recuperado de <https://www.redalyc.org/html/2631/263139243060/> [Consulta 25 de abril de 2019]
- Schmertmann, J. H. (2016). Discussion of "shear strength of clay at different shear rates" by ivan B. gratchev and kyoji sassa. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(11) doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001593.
- Watabe, Y. (2016). Discussion of "settlement of the kansai international airport islands" by G. mesri and J. R. funk. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(6) doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001224.
- Worrell, E., & Reuter, M. (Eds.). (2014). Handbook of recycling : State-of-the-art for practitioners, analysts and scientists. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>

Yadav, J. S., & Tiwari, S. K. (2019). The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: A review. *Environment, Development and Sustainability*, 21(2), 485-568. doi:10.1007/s10668-017-0054-22.

ANEXOS

Fotos de Ensayos de Laboratorio.

- **Caracterización Física del Caucho.**

Anexo 1: Tipos de Caucho

Caucho Granulado

Caucho Triturado

Caucho Mezcla

Anexo 2: Ensayos de Laboratorio para el caucho

Caucho Granulado

Caucho Triturado

Caucho Mezcla

- Granulometría

Granulometría por Tamizado

- Caracterización Física del Suelo.

Suelo Natural

Suelo Natural desmenuzado.

- Ensayos de Laboratorio

Limites de Atterberg

Granulometría del Suelo Natural

Anexo 3: Caracterización Mecánica del Suelo Natural.

Proctor Modificado

Energía de Compactación (Proctor Modificado)

Corte Directo

Calibración maquina Corte Directo

CBR - Suelo Natural

Anexo 4: Caracterización Mecánica de las mezclas.

Corte Directo - Suelo Natural

CRB - S100/C1.5

CBR (S100/C2.5)

CBR (S100/C3.5)

Anexo 5: Graficas de la Variación Porcentual de los resultados de los ensayos.

Variación de Índice de Plasticidad respecto al suelo natural (S100)

Variación de la Densidad seca de las mezclas respecto al Suelo Natural

Variación del Contenido Óptimo de humedad de las mezclas respecto al Suelo Natural

Variación de la Cohesión respecto al Suelo Natural

Variación del Ángulo de Fricción respecto al Suelo Natural

Porcentaje de Mejora del CBR a 95% de M.D.S a 2.5mm de Penetración

Anexo 6: Resultados de los Ensayos de Laboratorio.

○ Suelo Natural

Granulometría por sedimentación

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	4	1	2
ENSAYO No.						
CÁPSULA No.	T4	T65	T77	T81	T39	T21
PESO CÁPSULA + SUELO HUMEDO, g	32.66	31.24	29.63	29.06	22.40	23.93
PESO CÁPSULA + SUELO SECO, g	27.96	27.20	25.89	25.76	21.05	22.50
PESO AGUA, g	4.70	4.04	3.74	3.30	1.35	1.43
PESO DE LA CÁPSULA, g	14.77	15.54	14.78	15.75	14.66	15.74
PESO SUELO SECO, g	13.19	11.66	11.11	10.01	6.45	6.76
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	35.63	34.65	33.66	32.97	20.87	21.15
NÚMERO DE GOLPES	17	22	27	31

RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	34
LÍMITE PLÁSTICO (%)	21
IND. PLASTICIDAD (%)	13

OBSERVACIONES:

- Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40.
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.

Referencia:
ASTM D 4318 - 10e1 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (09-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)

Personal:
- Téc.: E.E.A.
- Rev.: M.M.F.

Fecha de emisión: Lima, 22 de agosto del 2019
El uso de la información contenida en este documento es responsabilidad del solicitante.

[Signature]
**MARCO ANTONIO
MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318**

Límites de Atterberg

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (MTC E 115 - 2016)

Nº de Capas	5	Altura de caída del pistón	45.72 cm	Peso del pistón	4.54 Kg	Volumen del Molde	944 g/cm³	
Energía de Compactación	Modificada	27.4 kg-cm/cm³			Número de Golpes / capa		25 Golpes	
Peso Suelo Humedo + Molde	(g)	3181		3272	3293		3213	
Peso del Molde	(g)	1208		1202	1282		1282	
Peso Suelo Humedo	(g)	1559		1680	1701		1621	
Volumen del Molde	(cm³)	944		944	944		944	
Densidad Suelo Humedo	(g/cm³)	1.662		1.780	1.802		1.717	
Tamaño N°		3/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1 1/2	
Peso suelo humedo + tarso	(g)	373.2	447.8	415.6	380.4	311.5	367.2	466.0
Peso suelo seco + tarso	(g)	332.6	400.1	388.6	336.1	274.8	347.4	400.8
Peso del agua	(g)	40.6	47.7	50.0	44.3	36.7	49.8	65.2
Peso del tarso	(g)	66.4	66.1	68.0	69.8	73.4	76.3	78.4
Peso suelo seco	(g)	266.2	315.0	298.6	266.3	201.4	271.1	328.2
Contenido de Humedad	(%)	15.3	15.1	16.7	16.6	18.2	18.4	19.9
Promedio de Humedad	(%)		15.2		16.7		18.3	
Densidad del Suelo Seco	(g/cm³)		1.440		1.583		1.583

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA		
Serie Americana	Rot. Parc. (%)	Pasa (%)
2 1/2"		100
2"	0	100
3/4"	0	100
3/8"	0	100
N°4	0	100
<N°4	100	
METODO		"A"

MDS	1.535 g/cm³
OCH	17.4%

CONDICIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.

[Signature]
MARCO ANTONIO
MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176316

Proctor Modificado

**METODO DE ENSAYO ESTENDAR PARA LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DE SUELO MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA
MTC E 113 - 2016**

DESCRIPCIÓN		RESULTADOS
Peso material saturado y superficie seca (en aire)	(g)	300.0
Peso fola + H ₂ O	(g)	696.5
Peso fola + H ₂ O + material	(g)	956.5
Peso fola + H ₂ O + material saturado y superficie seca	(g)	816.1
Volumen sólidos + volumen de vacíos	(cm ³)	140.4
Peso material seco a 105 °C	(g)	299.1
Volumen de sólidos	(cm ³)	139.5
Peso bulk base seca	(g/cm ³)	2.130

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.

Referencia:

- NTP 339.131 SUELOS. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas de un suelo.

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09061904 /09-06-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 /11-05-19)
- Fola 1500 ml JBO-201-FIO-03: SCM LV-09051907 /09-05-19)

Personal:

Téc.: E.E.A.
Rev.: M.M.F.

VF-002 (01-02-18)

Fecha de emisión: Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

**MARCO ANTONIO
MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318**

Gravedad Especifica de los Solidos

ESFUERZO NORMAL		49.0 kPa				98.1 kPa				196.1 kPa			
Etapas		Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final
Altura	(cm)	2.02	1.77	2.02	1.61	2.02	1.61	2.02	1.46	2.02	1.46	2.02	1.46
Volumen	(cm ³)	63.40	55.42	63.40	50.66	63.40	50.66	63.40	45.96	63.40	45.96	63.40	45.96
Humedad	(%)	17.4	34.3	17.4	33.8	17.4	33.8	17.4	33.6	17.4	33.6	17.4	33.6
Densidad Seca	(g/cm ³)	1.535	1.796	1.535	1.921	1.535	1.921	1.535	2.122	1.535	2.122	1.535	2.122
Esfuerzo Corte	(kPa)	43.2				62.0				99.4			

Desplaz. Horizontal (mm)	ESFUERZO NORMAL 49.0 kPa				ESFUERZO NORMAL 98.1 kPa				ESFUERZO NORMAL 196.1 kPa			
	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)
0.00	2.141	0.0	0.0	0.0	3.518	0.0	0.0	0.0	4.882	0.0	0.0	0.0
0.25	2.261	7.3	29.8	9.5	3.594	14.3	57.8	18.4	4.938	29.9	119.5	38.1
0.50	2.350	13.0	52.6	16.8	3.708	24.6	98.6	31.4	5.029	45.0	179.4	57.1
0.75	2.375	18.2	73.2	23.3	3.762	32.1	128.4	40.9	5.118	53.4	212.6	67.7
1.00	2.413	22.9	92.0	29.3	3.800	37.1	148.1	47.2	5.179	60.8	241.9	77.0
1.25	2.433	26.0	104.2	33.2	3.840	40.9	163.1	51.9	5.246	66.9	266.1	84.7
1.50	2.489	28.6	114.3	36.4	3.899	44.2	176.2	56.1	5.321	70.9	281.9	89.8
1.75	2.494	30.8	123.1	39.2	3.937	46.1	183.7	58.5	5.380	73.8	293.4	93.4
2.00	2.510	32.7	130.5	41.6	4.013	47.2	188.1	59.9	5.461	75.1	302.5	95.3
2.25	2.532	33.4	133.5	42.6	4.041	47.6	190.6	60.8	5.512	76.0	310.2	96.8
2.50	2.535	34.0	135.8	43.2	4.046	48.9	194.8	62.0	5.558	76.5	312.0	98.4
2.75	2.540	32.4	129.5	41.2	4.056	47.6	189.7	60.4	5.585	76.8	306.3	97.2
3.00	2.540	29.9	119.6	38.1	4.066	44.5	177.5	56.6	5.585	71.7	285.1	90.8

Referencias:

ASTM D 3080 : Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remoldeada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 115-2016)

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CDI-01: SCM LC-15051911 (16-05-19)

Fecha de Emisión: Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kg/cm ²)	0.38	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	30.0

Referencias:
ASTM D 3080 : Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remoldeada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 115-2016)

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CDI-01: SCM LC-15051911 (16-05-19)

Fecha de Emisión: Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

Ensayo de Corte Directo

CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO (MTC E 132 - 2016)

REFERENCIAS DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN	Suelo natural	PRESENTACIÓN	03 Sacos de polipropileno
DESCRIPCIÓN	Areña de baja plasticidad con arena	CANTIDAD	180 kg. aprox.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MUESTRA DE ENSAYO

Granulometría de la Muestra (MTC E 187 - MTC E 282)			Límites de Atterberg (MTC E 118 - MTC E 119)	
Serie Americana	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)	Límite Líquido	34.0 %
2"	--	100	Índice Plastico	13.8 %
3/4"	--	100	Clasificación de Suelos GUCS (ASTM D-3887) : CL Vías Transporte (ASTM D-3382) : A-6 (8)	
3/8"	--	100		
Nº4	--	100		
Nº200	29	71		
+ Nº200	71			

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO

Descripción		Especimen N° 1	Especimen N° 2	Especimen N° 3
Energía de Compactación	(kg/cm ²)	27.4	13.2	6.1
Densidad Seca Antes del Remolde	(g/cm ³)	1.534	1.476	1.457
Humedad de Compactación	(%)	17.4	17.3	17.4
Humedad de Penetración	(%)	25.9	27.7	26.9
Abundancia	(%)	8.5	16.4	11.2
Expansión	(%)	4.80	5.88	7.16
Tiempo de Curado	(días)	4	6	6
Sobrecarga	(kg)	4.5	4.5	4.5

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS

Proctor Modificado (MTC E 115 - 2016)		C.B.R. a 2.5 mm de Penetración (MTC E 132 - 2016)	
Método de Compactación	A	C.B.R. al 100 % de la M.D.S.	6.3 %
Máxima Densidad Seca	(g/cm ³) : 1.535	C.B.R. al 95 % de la M.D.S.	3.3 %
Óptimo Contenido de Humedad	(%) : 17.4	C.B.R. a 5.0 mm de Penetración (MTC E 132 - 2016)	
		C.B.R. al 100 % de la M.D.S.	7.3 %
		C.B.R. al 95 % de la M.D.S.	3.6 %
		Condiciones de Ensayo	Embebido

OBSERVACIONES

- Muestra tomada directamente por extracción
- La muestra fue compactada, luego se dejó por 4 días y posteriormente se realizó el ensayo de penetración

REFERENCIAS

- ASTM D 1557: Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory compacted soils
- ASTM D 1557: Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort - (ASTM 1997) (2016)
- 44-10002

Equipo usado

- Prensa COR PMAGE SCM LP 3.1001907 01-01-19
- Scales JCO-011 04L-01 SCM LM 1430182 14-05-19
- Prensa JRG 102 HSR-02 SCM L 111891611 11-05-18

Personal
- Tsc. E.T.A.
- Rev. 0001A

Fecha de Cierre : LIMA, 02 de septiembre del 2016

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del usuario

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CP N° 176316

- S100/C0.5

Granulometría S100/C0.5

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
ENSAYO No.	1	2	3	4	1	2
CÁPSULA No.	T4	T85	T77	T61	T52	T7
PESO CÁPSULA + SUELO HUMEDO, g	32.49	31.14	29.49	28.95	23.69	23.30
PESO CÁPSULA + SUELO SECO, g	27.96	27.20	25.89	25.76	22.26	22.12
PESO AGUA, g	4.53	3.94	3.60	3.19	1.43	1.18
PESO DE LA CÁPSULA, g	14.77	15.54	14.78	15.75	15.11	16.24
PESO SUELO SECO, g	13.19	11.66	11.11	10.01	7.15	5.88
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	34.34	33.79	32.40	31.87	19.98	20.07
NÚMERO DE GOLPES	18	21	29	32

RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	33
LÍMITE PLÁSTICO (%)	20
ÍND. PLASTICIDAD (%)	13

OBSERVACIONES:

- Ensayo efectuado al material pasando la malla N° 40.
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.

Referencia:

ASTM D 4318 - 10e1 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (09-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)

Personal:

- Téc.: E.E.A.
- Rev.: M.M.F.

Fecha de emisión: Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 176318

Límites de Atterberg S100/C0.5

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (MTC E 115 - 2016)

Nº de Capas	5	Altura de caída del pistón	45.72 cm	Peso del pistón	4.54 Kg	Volumen del Molde	944 g/cm³
Energía de Compactación	Modificado	27.4 kg-cm/cm²		Número de Golpes / capa : 25 Golpes			
Peso Suelo Humedo + Molde	(g)	3185		3275		3256	3216
Peso del Molde	(g)	1592		1592		1592	1592
Peso Suelo Humedo	(g)	1573		1684		1704	1624
Volumen del Molde	(cm³)	944		944		944	944
Densidad Suelo Humedo	(g/cm³)	1.665		1.784		1.805	1.720
Tarro N°		484	250	440	345	338	325
Peso suelo humedo + tarro	(g)	364.0	375.6	350.8	320.4	391.4	303.8
Peso suelo seco + tarro	(g)	316.3	336.1	312.2	284.3	342.8	299.3
Peso del agua	(g)	37.7	39.5	28.6	26.1	48.6	34.5
Peso del tarro	(g)	65.9	72.0	79.0	65.0	73.5	78.9
Peso suelo seco	(g)	250.4	264.1	233.2	219.3	269.3	190.4
Contenido de Humedad	(%)	15.1	15.0	16.6	16.5	18.0	18.1
Promedio de Humedad	(%)		15.1		16.6		18.1
Densidad del Suelo Seco	(g/cm³)	1.667		1.630		1.528	1.637

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA		
Serie Americana	Ret. Parc. (%)	Pasa (%)
2 1/2"	0	100
2"	0	100
3/4"	0	100
3/8"	0	100
N°4	0	100
<N°4	100	
MÉTODO		"A"

MDS	1.54 g/cm³
OCH	17.2%

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- El caucho molde fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La densificación de caucho molde fue proporcionado por el solicitante.

Referencia:

ASTM D 1557-02: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort -56000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³)

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-06051904 (05-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)

Tec: E.E.A.

Rev: M.M.F.

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019
El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante

[Firma]
MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

Proctor Modificado S100/C0.5

DESCRIPCIÓN		RESULTADOS
Peso material saturado y superficie seca (en aire)	(g)	300.0
Peso fola + H ₂ O	(g)	856.5
Peso fola + H ₂ O + material	(g)	956.5
Peso fola + H ₂ O + material saturado y superficie seca	(g)	816.1
Volumen sólidos + volumen de vacíos	(cm ³)	140.4
Peso material seco a 105 °C	(g)	299.1
Volumen de sólidos	(cm ³)	138.5
Peso bulk base seca	(g/cm ³)	2.131

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Referencia:
- NTP 309.131 BUELOS. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas de un suelo

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LX-09051904 (09-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051957 (11-05-19)
- Fola (500 ml) JBO-201-FOL-03: SCM LV-08051907 (08-05-19)

Personal:
Téc.: E.E.A.
Rev.: N.M.F.

VF-002 (01-02-16)

Fecha de emisión: Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

Gravedad Específica de los Sólidos S100/C0.5

ESFUERZO NORMAL		49.0 kPa		98.1 kPa		196.1 kPa	
Etapa		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura	(cm)	2.02	1.77	2.02	1.62	2.02	1.47
Volumen	(cm ³)	63.40	55.52	63.40	50.97	63.40	46.27
Humedad	(%)	17.2	33.5	17.2	33.2	17.2	32.8
Densidad Seca	(g/cm ³)	1.540	1.755	1.540	1.915	1.540	2.110
Esfuerzo Corte	(kPa)	45.1		63.8		101.0	

Desplaz. Horizontal (mm)	ESFUERZO NORMAL 49.0 kPa				ESFUERZO NORMAL 98.1 kPa				ESFUERZO NORMAL 196.1 kPa			
	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)
0.00	2.090	0.0	0.0	0.0	3.424	0.0	0.0	0.0	4.768	0.0	0.0	0.0
0.25	2.192	5.3	22.3	7.1	3.510	13.7	55.3	17.6	4.801	40.0	159.5	60.8
0.50	2.286	10.7	43.3	13.8	3.614	21.4	81.8	29.9	4.907	64.8	217.3	89.2
0.75	2.311	15.5	62.5	19.9	3.645	33.0	131.8	42.0	4.994	63.1	251.2	80.0
1.00	2.344	19.8	79.6	25.3	3.721	39.8	154.8	49.3	5.052	69.4	276.0	87.9
1.25	2.388	23.7	95.0	30.3	3.752	42.6	168.8	54.1	5.133	72.5	288.3	91.8
1.50	2.408	27.1	108.5	34.5	3.807	46.8	182.5	58.1	5.194	75.0	298.0	94.9
1.75	2.433	30.1	120.3	38.3	3.835	47.8	189.7	63.4	5.245	76.9	305.8	97.4
2.00	2.451	33.3	133.0	42.4	3.896	49.3	196.6	62.6	5.331	78.6	312.4	99.5
2.25	2.471	36.2	140.4	44.7	3.912	50.0	199.1	63.4	5.380	79.5	315.9	100.6
2.50	2.474	36.5	141.7	45.1	3.947	50.3	200.3	63.8	5.436	79.8	317.2	101.0
2.75	2.477	33.9	136.4	43.1	3.957	49.1	195.6	62.3	5.456	78.1	310.4	98.9
3.00	2.477	31.5	126.9	40.1	3.967	46.1	183.7	58.5	5.466	73.2	291.0	92.7

Referencias:
ASTM D 3080 - Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remoldeada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 115-2016)
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La densificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CD-01: SCM LC-15051911 (15-05-19)

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kg/cm ²)	0.27	ANGULO DE FRICCIÓN (°)	20.8

Referencias:
ASTM D 3080 - Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remoldeada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 115-2016)
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La densificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CD-01: SCM LC-15051911 (15-05-19)

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

Corte Directo S100/C0.5

- S100/C1.5

Granulometría S100/C1.5

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
ENSAYO No.	1	2	3	4	1	2
CÁPSULA No.	T4	T85	T77	T61	T43	T52
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO, g	32.48	31.14	29.50	28.96	23.75	23.07
PESO CÁPSULA + SUELO SECO, g	27.06	27.20	25.89	25.75	22.14	21.62
PESO AGUA, g	4.50	3.94	3.61	3.20	1.61	1.45
PESO DE LA CÁPSULA, g	14.77	15.54	14.78	15.75	14.79	15.11
PESO SUELO SECO, g	13.19	11.66	11.11	10.01	7.35	6.51
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	34.12	33.79	32.49	31.97	21.82	22.26
NÚMERO DE GOLPES	19	21	28	31

RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	33
LÍMITE PLÁSTICO (%)	22
IND. PLASTICIDAD (%)	11

OBSERVACIONES:

- Ensayo efectuado al material presente la malla N° 40.
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.

Referencia:
ASTM D 4318 - 10e1 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (09-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)

Personal:

- Tac.: E.E.A
- Rev.: M.M.F.

Fecha de emisión: Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 176318

Límites de Atterberg S100/C1.5

Nº de Capas	5	Altura de caída del pistón	45.72 cm	Peso del pistón	4.54 Kg	Volumen del Molde	944 g/cm³
Energía de Compactación	Modificada	27.4 kg-cm/cm²				Número de Golpes / capa	25 Golpes
Peso Suelo Humedo + Molde	(g)	3154		3277		3238	3217
Peso del Molde	(g)	1550		1592		1592	1592
Peso Suelo Humedo	(g)	1572		1585		1706	1625
Volumen del Molde	(cm³)	944		944		944	944
Densidad Suelo Humedo	(g/cm³)	1.666		1.786		1.807	1.721
Tam. N°		309	16	264	365	99	436
Peso suelo humedo + tam.	(g)	374.0	439.8	348.7	333.5	447.9	447.8
Peso suelo seco + tam.	(g)	334.7	393.3	310.8	298.8	360.1	368.8
Peso del agua	(g)	39.3	46.5	37.9	34.8	57.8	59.0
Peso del tam.	(g)	69.9	78.4	79.1	84.8	86.4	90.5
Peso suelo seco	(g)	264.8	314.9	231.8	214.0	323.7	328.5
Contenido de Humedad	(%)	14.8	14.8	16.4	16.3	17.9	18.0
Promedio de Humedad	(%)		14.8		16.4	18.0	18.5
Densidad del Suelo Seco	(g/cm³)	1.450		1.534		1.531	1.440

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA		
Serie Americana	Ret. Parc. (%)	Pasa (%)
2 1/2"	0	100
2"	0	100
3/4"	0	100
3/8"	0	100
N°4	0	100
<N°4	100	
MÉTODO		"A"
MDS		1.543 g/cm³
OCH		17.5%

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Referencia:

ASTM D 1557-02: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort-56000 ft-lb/m³ (2700 kN-m/m³)

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: 5CM LM-06051904 (06-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)

Tec.: E.E.A.
Rev.: M.M.F.

Fecha de Emisión: Lima, 22 de agosto del 2019
El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176316

Proctor Modificado S100/C1.5

**METODO DE ENSAYO ESTENDAR PARA LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DE SUELO MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA
MTC E 113 - 2016**

DESCRIPCIÓN		RESULTADOS
Peso material saturado y superficie seca (en aire)	(g)	300.0
Peso fiola + H ₂ O	(g)	858.5
Peso fiola + H ₂ O + material	(g)	956.5
Peso fiola + H ₂ O + material saturado y superficie seca	(g)	816.3
Volumen sólidos + volumen de vacíos	(cm ³)	140.2
Peso material seco a 105 °C	(g)	289.1
Volumen de sólidos	(cm ³)	139.3
Peso bulk (base seca)	(g/cm ³)	2.134

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Referencia:

- N° 113.131 SUELOS, MÉTODOS DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL PORESPACIO RELATIVO DE LAS PARTÍCULAS DE UN SUELO.

Equipos usados:

- Balanza JBL-1102-BAL-01: SCM LT-104051914 (04-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)
- Fiola (500 ml) JBO-201-FIO-03: SCM LT-08051907 (09-05-19)

Personal:

Téc.: E.E.A.
Rev.: M.M.F.

VF-002 (01-02-18)

Fecha de emisión: Lima, 22 de agosto del 2019

EL USO DE LA PRESENTACIÓN COPIADA EN ESTOS DOCUMENTOS ES DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL ACQUASAPPEL.

**MARCO ANTONIO
MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318**

Gravedad Específica de los Sólidos S100/C1.5

ESFUERZO NORMAL		49.0 kPa			98.1 kPa			196.1 kPa		
Etapas		Initial		Final	Initial		Final	Initial		Final
Altura	(cm)	2.02		1.78	2.02		1.63	2.02		1.49
Volumen	(cm ³)	63.40		65.78	63.40		51.25	63.40		46.70
Humedad	(%)	17.0		33.2	17.0		33.0	17.0		32.7
Densidad Seca	(g/cm ³)	1.543		1.754	1.543		1.509	1.543		2.065
Esfuerzo Corte	(kPa)	46.2			66.6			103.4		

Desplaz. Horizontal (mm)	ESFUERZO NORMAL 49.0 kPa					ESFUERZO NORMAL 98.1 kPa					ESFUERZO NORMAL 196.1 kPa				
	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)		Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)		Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	
0.00	2.040	0.0	0.0	0.0		3.958	0.0	0.0	0.0		4.646	0.0	0.0	0.0	
0.25	2.134	8.1	33.3	10.6		3.442	13.4	54.3	17.3		4.699	22.2	88.9	28.3	
0.50	2.236	13.2	53.4	17.0		3.526	26.0	104.1	33.2		4.788	38.4	153.2	48.8	
0.75	2.261	18.2	73.2	23.3		3.576	36.4	141.3	45.0		4.677	48.8	194.4	61.9	
1.00	2.291	22.4	88.9	28.6		3.614	41.2	164.3	52.3		4.840	56.4	224.6	71.5	
1.25	2.314	26.2	104.9	33.4		3.900	44.8	178.9	56.9		4.899	62.0	240.0	76.6	
1.50	2.362	29.5	118.0	37.6		3.724	47.9	190.8	60.8		5.062	68.5	272.2	86.7	
1.75	2.370	32.5	129.9	41.4		3.759	49.7	198.0	63.0		5.131	73.0	290.1	92.4	
2.00	2.408	35.6	142.1	45.3		3.792	50.7	201.9	64.3		5.207	77.2	308.8	97.7	
2.25	2.426	37.3	148.8	47.4		3.848	51.4	204.7	66.2		5.271	79.9	317.6	101.1	
2.50	2.416	37.9	151.2	48.2		3.951	52.6	209.1	66.6		5.306	81.7	324.7	103.4	
2.75	2.418	36.2	144.5	46.0		3.966	51.2	203.9	64.9		5.311	79.9	317.6	101.1	
3.00	2.421	33.8	135.0	43.0		3.968	48.3	192.4	61.3		5.319	75.1	298.6	96.1	

Referencias:
ASTM D 3080 : Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remoldeada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 115-2016).
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CDI-01: SCM LC-15051911 (16-05-19)

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kg/cm ²)	0.30	ANGULO DE FRICCIÓN (°)	26.6

Referencias:
ASTM D 3080 : Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remoldeada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 115-2016).
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CDI-01: SCM LC-15051911 (16-05-19)

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

Corte Directo S100/C1.5

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MUESTRA DE ENSAYO

Granulometría de la Muestra (MTC E 107 - MTC E 202)

Serie Americana	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)
2"	~	100
3/4"	~	100
3/8"	~	100
N°4	~	100
N°200	30	70
< N°200	70	

Límites de Atterberg (MTC E 110 - MTC E 111)

Límite Líquido	33.0 %
Índice Plástico	11.0 %

Clasificación de Suelos

SUCS (ASTM D-2487)	CL
Vías Transporte (ASTM D-3282)	A-5 (5)

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECIMENES DE ENSAYO

Descripción		Especimen N° 1	Especimen N° 2	Especimen N° 3
Energía de Compactación	(kg·cm/cm ²)	27.4	12.2	5.1
Densidad Seca Antes del Remojo	(g/cm ³)	1.546	1.488	1.469
Humedad de Compactación	(%)	17.0	16.9	16.9
Humedad de Penetración	(%)	25.2	26.9	27.9
Absorción	(%)	8.2	10.0	11.0
Expansión	(%)	4.10	5.80	6.80
Tiempo de Embebido	(días)	4	4	4
Sobrecarga	(kg)	4.5	4.5	4.5

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS

Proctor Modificado (MTC E 115 - 2016)

Método de Compactación	: A
Máxima Densidad Seca	(g/cm ³) : 1.543
Óptimo Contenido de Humedad	(%) : 17.0

C.B.R. a 2.5 mm de Penetración (MTC E 132 - 2016)

C.B.R. al 100 % de la M.D.S.	: 10.4 %
C.B.R. al 95 % de la M.D.S.	: 5.0 %

C.B.R. a 5.0 mm de Penetración (MTC E 132 - 2016)

C.B.R. al 100 % de la M.D.S.	: 12.9 %
C.B.R. al 95 % de la M.D.S.	: 5.7 %
Condiciones del Ensayo	: Embebido

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue compactada, luego se saturó por 4 días y posteriormente se realizó el ensayo de penetración.

REFERENCIA

- ASTM D 1557: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort - 56000 ft-lbf (2700 kN-m)
- ASTM D 1557: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort - 56000 ft-lbf (2700 kN-m)

Equipos usados:

- Prensa CBR PRM-02: SCM LF-07051901 (07-05-18)
- Balanza JBO-001-BAL-01: SCM LM-14201993 (14-05-16)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-16)

Personal

- Téc.: E.E.A.
- Rev.: M.M.F.

Fecha de Emisión : Lima, 03 de septiembre del 2018

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

[Firma]
MARCO ANTONIO MORENO FLORES
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 170318

CBR - S100/CI.5

- S100/C2.5

Granulometría S100/C2.5

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE SUELOS (MTC E 110 - 2016),
LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS (MTC E 111 - 2016)**

REFERENCIAS DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Muestra de suelo arcilloso + 2.5% de caucho molido PRESENTACIÓN : 01 Bolsa de polietileno
DESCRIPCIÓN : Arcilla de baja plasticidad con arena CANTIDAD : 25 kg aprox.

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
ENSAYO No.	1	2	3	4	1	2
CÁPSULA No.	T4	T85	T77	T61	T39	T21
PESO CÁPSULA + SUELO HUMEDO, g	22.22	20.05	29.27	20.75	22.40	24.00
PESO CÁPSULA + SUELO SECO, g	27.96	27.20	25.89	25.76	21.05	22.50
PESO CÁPSULA, g	1.25	0.05	0.88	0.69	1.41	1.30
PESO DE LA CÁPSULA, g	14.77	15.54	14.78	15.75	14.60	15.74
PESO SUELO SECO, g	13.19	11.65	11.11	10.01	8.45	8.78
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	32.30	31.39	30.42	29.97	21.80	22.19
NÚMERO DE GOLPES	18	25	26	32

RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	31
LÍMITE PLÁSTICO (%)	22
ÍND. PLASTICIDAD (%)	9

OBSERVACIONES:

- Ensayo efectuado al material pasando la malla N° 40.
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.

Referencia:

ASTM D 4318 - 10e1 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (09-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11061917 (11-05-19)

Personal:

- Tec.: E.E.A.
- Aux.: M.M.T.

Fecha de emisión: Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es responsabilidad del solicitante.

[Firma]
**MARCO ANTONIO
MORENO FLORES**
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

Límites de Atterberg S100/C2.5

Proctor Modificado S100/C2.5

**METODO DE ENSAYO ESTENDAR PARA LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DE SUELO MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA
MTC E 113 - 2016**

DESCRIPCION		RESULTADOS
Peso material saturado y superficie seca (an. aire)	(g)	300.0
Peso fola + H ₂ O	(g)	955.5
Peso fola + H ₂ O + material	(g)	955.5
Peso fola + H ₂ O + material saturado y superficie seca	(g)	815.9
Volumen sólidos + volumen de vacíos	(cm ³)	138.6
Peso material seco a 105 °C	(g)	299.1
Volumen de sólidos	(cm ³)	138.7
Peso bulk base seca	(g/cm ³)	2.142

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- El caucho molido fue proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Referencia:

- NTP 339.131 SUELOS. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas de un suelo.

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-08051904 (09-05-19)
- Horno JBO-102-HCR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)
- Fola (500 ml) JBO-201-FJC-03: SCM LV-08051907 (09-05-19)

Personal:

- Tec.: E.E.A.
- Rev.: N.M.F.

UC/005/PA/00-19

Fecha de emisión: 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

[Firma]
**MARCO ANTONIO
 MORENO FLORES
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 176318**

Gravedad Especifica de los Solidos S100/C2.5

ESFUERZO NORMAL		49.0 kPa				98.1 kPa				196.1 kPa			
Etapas		Inicial		Final		Inicial		Final		Inicial		Final	
Altura	(cm)	2.02		1.83		2.02		1.71		2.02		1.80	
Volumen	(cm ³)	83.40		57.36		83.40		53.75		83.40		60.19	
Humedad	(%)	16.7		31.4		16.7		31.1		16.7		30.7	
Densidad Seca	(g/cm ³)	1.580		1.724		1.580		1.840		1.580		1.971	
Esfuerzo Corte	(kPa)	55.5				72.5				105.4			

Desplaz. Horizontal (mm)	ESFUERZO NORMAL 49.0 kPa				ESFUERZO NORMAL 98.1 kPa				ESFUERZO NORMAL 196.1 kPa			
	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)
0.00	1.613	0.0	0.0	0.0	2.677	0.0	0.0	0.0	3.655	0.0	0.0	0.0
0.25	1.707	11.6	47.1	15.0	2.736	21.2	85.3	27.1	3.739	47.1	187.7	59.8
0.50	1.773	22.0	88.3	28.1	2.814	36.1	144.1	45.9	3.807	62.6	249.0	79.3
0.75	1.833	31.7	128.8	40.4	2.830	43.5	173.8	55.4	3.876	83.1	325.8	88.8
1.00	1.816	38.0	151.7	48.3	2.875	48.1	191.6	61.0	3.922	75.2	298.9	96.2
1.25	1.854	40.0	159.5	50.8	2.908	51.0	203.1	64.7	3.978	78.6	312.4	98.5
1.50	1.872	40.7	162.3	51.7	2.951	53.5	213.0	67.8	4.034	81.1	322.5	102.7
1.75	1.887	41.9	167.0	53.2	2.979	54.9	218.6	69.6	4.089	82.2	326.9	104.1
2.00	1.900	42.4	168.9	53.8	3.016	55.7	221.7	70.5	4.130	83.4	331.3	105.5
2.25	1.918	43.2	172.1	54.8	3.048	56.3	224.1	71.4	4.171	83.6	332.2	106.8
2.50	1.920	43.7	174.2	55.5	3.068	57.2	227.7	72.5	4.204	84.1	334.2	106.4
2.75	1.920	42.2	168.3	53.6	3.071	56.1	223.3	71.1	4.206	82.6	328.3	104.5
3.00	1.923	40.3	160.7	51.2	3.071	53.8	214.2	68.2	4.208	78.8	313.2	99.7

Referencias:

ASTM D 3080 : Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remediada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 116-2016)
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CDI-01: SCM LC-15051911 (16-05-19)

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kg/cm ²)	0.39	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	15.1

Referencias:
ASTM D 3080 : Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remediada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 116-2016).
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CDI-01: SCM LC-15051911 (16-05-19)

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

Corte Directo S100/C2.5

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MUESTRA DE ENSAYO

Granulometría de la Muestra (MTC E 107 - MTC E 202)

Serie Americana	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)
2"	--	100
3/4"	--	100
3/8"	--	100
N°4	--	100
N°200	31	69
< N°200	69	

Límites de Atterberg (MTC E 110 - MTC E 111)

Límite Líquido	31.0 %
Índice Plástico	09.0 %

Clasificación de Suelos

SUCS (ASTM D-2487)	CL
Vías Transporte (ASTM D-3282)	A-4 (5)

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECIMENES DE ENSAYO

Descripción		Especimen N° 1	Especimen N° 2	Especimen N° 3
Energía de Compactación	(kg-cm/cm ³)	27.4	12.2	6.1
Densidad Seca Antes del Remojo	(g/cm ³)	1.562	1.503	1.484
Humedad de Compactación	(%)	16.7	16.8	16.6
Humedad de Penetración	(%)	24.5	26.5	27.1
Absorción	(%)	7.8	9.7	10.5
Expansión	(%)	3.70	5.00	6.70
Tiempo de Embudo	(días)	4	4	4
Sobrecarga	(kg)	4.5	4.5	4.5

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS

Proctor Modificado (MTC E 115 - 2016)

Método de Compactación	: A
Máxima Densidad Seca	(g/cm ³) : 1.580
Óptimo Contenido de Humedad	(%) : 16.7

C.B.R. a 2.5 mm de Penetración (MTC E 132 - 2016)

C.B.R. al 100 % de la M.D.S.	: 17.7 %
C.B.R. al 95 % de la M.D.S.	: 8.7 %

C.B.R. a 5.0 mm de Penetración (MTC E 132 - 2016)

C.B.R. al 100 % de la M.D.S.	: 23.1 %
C.B.R. al 95 % de la M.D.S.	: 11.2 %

Condiciones del Ensayo : Embudo

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue compactada, luego se saturó por 4 días y posteriormente se realizó el ensayo de penetración.

REFERENCIA:

ASTM D 1883: Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils.

ASTM D 1557: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort - 56000 ft-lbf (7700 kN-m) (2000).

Equipos usados:

- Prensa CBR PRM-02: SCM LF-07081901 (07-05-19)
- Balanza JBO-001-BAL-01: SCM LM-14061903 (14-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)

Personal

- Tec.: E.E.A.
- Rev.: M.M.F.

Fecha de Emisión : Lima, 03 de septiembre del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO
MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

CBR - S100/C2.5

- S100/C3.5

Granulometría S100/C3.5

LÍMITE LIQUIDO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS (MÉTODO 100)

REFERENCIAS DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Muestra de suelo arcilloso + 3.5% de caucho molido PRESENTACIÓN : 01 Bolsa de polietileno

DESCRIPCIÓN : Arcilla de baja plasticidad con arena CANTIDAD : 05 kg. aprox.

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LIQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
ENSAYO No.	1	2	3	4	1	2
CÁPSULA No.	T4	T55	T77	T81	T43	T52
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO, g	31.97	30.63	29.08	28.59	23.67	23.01
PESO CÁPSULA + SUELO SECO, g	27.96	27.20	25.89	25.76	22.14	21.62
PESO AGUA, g	4.01	3.43	3.19	2.83	1.53	1.39
PESO DE LA CÁPSULA, g	14.77	15.54	14.78	15.75	14.75	15.11
PESO SUELO SECO, g	12.19	11.66	11.11	10.01	7.38	6.51
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	30.40	29.42	28.71	28.27	20.73	21.33
NÚMERO DE GOLPES	17	23	27	30

RESULTADOS DE ENSAYOS	
LÍMITE LÍQUIDO (%)	29
LÍMITE PLÁSTICO (%)	21
IND. PLASTICIDAD (%)	8

OBSERVACIONES:

- Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40.
- Muestra tratada a 110°C hasta peso constante.

Referencia:

ASTM D 4318 - 10e1 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (09-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)

Personal:

- Tec.: E.E.A.
- Rev.: M.M.F.

Fecha de emisión: Lima, 22 de agosto del 2019.

El uso de la información contenida en este documento es responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 178318

Límites de Atterberg S100/C3.5

Proctor Modificado S100/C3.5

**METODO DE ENSAYO ESTNDAR PARA LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DE SUELO MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA
MTC E 113 - 2016**

DESCRIPCION		RESULTADOS
Peso material saturado y superficie seca (en aire)	(g)	300.0
Peso sola + H ₂ O	(g)	696.5
Peso sola + H ₂ O + material	(g)	856.5
Peso solo + H ₂ O + material saturado y superficie seca	(g)	816.4
Volumen sólido + volumen de vacíos	(cm ³)	140.1
Peso material seco a 105 °C	(g)	299.1
Volumen de sustia	(cm ³)	100.2
Peso bulk base seca	(g/cm ³)	2.136

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Referencia:

- NTP 339.131 SUELOS, Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas de un suelo

Equipos usados:

- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (09-05-19)
- Homo JBO-102-HOR-02: SCM LT-11051917 (11-05-19)
- Fidei (500 mg) JBO-201-FID-03: SCM LV-08051907 (08-05-19)

Personal:

- Tec.: E.E.A.
- Rev.: M.M.F.

VP-0002 (01/02/18)

Fecha de emisión : Lima, 22 de agosto del 2018

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

**MARCO ANTONIO
MORENO FLORES**
INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 176318

Gravedad Específica de los Solidos S100/C3.5

ESFUERZO NORMAL					49,0 kPa				98,1 kPa				196,1 kPa			
Etapa					Inicial		Final		Inicial		Final		Inicial		Final	
Altura (cm)					2,02		1,82		2,02		1,69		2,02		1,57	
Volumen (cm ³)					63,40		56,99		63,40		53,16		63,40		49,34	
Humedad (%)					16,4		29,4		16,4		29,0		16,4		28,8	
Densidad Seca (g/cm ³)					1,354		1,551		1,394		1,653		1,354		1,792	
Esfuerzo Corte (kPa)					58,4				74,8				108,8			

Desplaz. Horizontal (mm)	ESFUERZO NORMAL 49,0 kPa				ESFUERZO NORMAL 98,1 kPa				ESFUERZO NORMAL 196,1 kPa			
	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)	Desplaz. Vertical (mm)	Lectura Dial Fuerza	Fuerza (N)	Esfuerzo Corte (kPa)
0,00	1,720	0,0	0,0	0,0	2,817	0,0	0,0	0,0	3,919	0,0	0,0	0,0
0,25	1,803	15,3	61,9	19,7	2,886	24,6	98,6	31,4	3,960	50,7	201,8	64,3
0,50	1,890	25,4	101,7	32,4	2,972	38,9	156,2	49,4	4,034	61,5	246,1	78,1
0,75	1,897	31,1	124,3	39,6	3,000	46,1	183,7	58,5	4,102	67,7	269,3	86,8
1,00	1,925	34,3	136,9	43,6	3,045	60,5	201,0	64,0	4,155	73,1	290,6	92,6
1,25	1,953	37,2	148,5	47,3	3,086	53,2	212,0	67,5	4,211	77,5	308,2	98,2
1,50	1,984	39,8	158,6	50,5	3,129	55,6	221,4	70,5	4,265	80,5	319,9	101,9
1,75	2,002	42,0	167,5	53,3	3,160	57,0	226,7	72,7	4,315	82,6	328,3	104,6
2,00	2,014	44,4	175,8	55,3	3,195	57,8	229,8	73,2	4,379	84,3	334,9	106,7
2,25	2,032	45,1	179,9	57,3	3,231	58,3	232,0	73,9	4,422	84,6	336,8	107,3
2,50	2,035	46,0	183,3	58,4	3,249	58,0	234,8	74,8	4,458	86,0	341,7	108,8
2,75	2,037	44,8	178,6	56,9	3,296	59,1	231,2	73,6	4,475	84,6	336,5	107,3
3,00	2,040	43,0	171,4	54,6	3,259	55,9	222,5	70,9	4,478	81,1	322,3	102,7

Referencias:
ASTM D 3080 : Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remodelada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 115-2016)
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CDI-01: SCM LC-15061911 (16-05-19)

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

RESULTADOS DE ENSAYO			
COHESIÓN (kg/cm ²)	0,41	ANGULO DE FRICCIÓN (°)	19,0

Referencias:
ASTM D 3080 : Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions

OBSERVACIONES:
- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue remodelada a condiciones de humedad y densidad del ensayo de Proctor Modificado (MTC E 115-2016)
- El caucho molido fue procesado y proporcionado por el solicitante.
- La dosificación de caucho molido fue proporcionado por el solicitante.

Equipos usados:
- Balanza JBO-102-BAL-01: SCM LM-09051904 (10-05-19)
- Balanza JBO-102-BAL-02: SCM LM-10051909 (11-05-19)
- Horno JBO-102-HOR-01: SCM LT-11051916 (13-05-19)
- Corte Directo JBO-301-CDI-01: SCM LC-15061911 (16-05-19)

Fecha de Emisión : Lima, 22 de agosto del 2019

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante.

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 176318

Corte Directo S100/C3.5

IDENTIFICACIÓN	Muestra de suelo arcilloso + 3.5% de caucho molido	PRESENTACIÓN	03 Sacos de polipropileno
DESCRIPCIÓN	Arilla de hoja plasticidad muy alta	CANTIDAD	100 Kg aprox

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MUESTRA DE ENSAYO

Granulometría de la Muestra (MTC E 107 - MTC E 202)			Límites de Atterberg (MTC E 110 - MTC E 111)	
Serie Americana	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)	Límite Líquido	29.0 %
2"	100	100	Índice Plástico	08.0 %
3/4"	100	100		
3/8"	100	100		
Nº4	100	100	Clasificación de Suelos	
Nº200	31	88	SUCS (ASTM D-2487)	CL
< Nº200	69		Vías Transporte (ASTM D-3282)	A-4 (4)

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECIMENES DE ENSAYO

Descripción		Especimen N° 1	Especimen N° 2	Especimen N° 3
Energía de Compactación	(kg-cm/cm ³)	27.4	12.2	6.1
Densidad Seca Antes del Remojó	(g/cm ³)	1.559	1.500	1.481
Humedad de Compactación	(%)	16.4	16.3	16.3
Humedad de Penetración	(%)	22.7	24.4	25.2
Absorción	(%)	6.3	6.1	6.9
Expansión	(%)	3.50	4.80	6.40
Tiempo de Embebido	(días)	4	4	4
Sobrecarga	(kg)	4.5	4.5	4.5

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS

Proctor Modificado (MTC E 115 - 2016)		C.B.R. a 2.5 mm de Penetración (MTC E 132 - 2016)	
Método de Compactación	A	C.B.R. al 100 % de la M.D.S.	18.2 %
Máxima Densidad Seca	(g/cm ³) : 1.562	C.B.R. al 95 % de la M.D.S.	9.4 %
Óptimo Contenido de Humedad	(%) : 16.4		

C.B.R. a 5.0 mm de Penetración (MTC E 132 - 2016)	
C.B.R. al 100 % de la M.D.S.	20.9 %
C.B.R. al 95 % de la M.D.S.	11.0 %
Condiciones del Ensayo	Embebido

OBSERVACIONES

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- La muestra fue compactada, luego se saturó por 4 días y posteriormente se realizó el ensayo de penetración.

REFERENCIA

ASTM D 1883: Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils

ASTM D 1557: Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort - 56000 ft-lb/ft³ (2700 kN-m/m³)

Equipos usados:

- Preso CBR PRM-02: SCM LF-0701501 (07-05-16)
- Balanza JBO-001-SAL-01: SCM LM-1401903 (14-05-16)
- Horno JBO-102-HCR-00: SCMLT-11052017 (11-05-16)

Personal:

- Tec.: E.E.A.
- Rev.: M.M.F.

Fecha de Emisión: Lima, 03 de septiembre del 2018

El uso de la información contenida en este documento es de exclusiva responsabilidad del solicitante

MARCO ANTONIO MORENO FLORES
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 176316

CBR - S100/C3.5