UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Análisis de la adición de cáscara de arroz y bagazo de
caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la
estabilización de suelos arcillosos en el departamento de
San Martín

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Hidalgo Ramírez, Fernando (0000-0003-3996-538X)

Saavedra Salazar, José Antonio (0000-0001-9108-9511)

ASESOR

Fernández Díaz, Carlos Mario (0000-0001-6774-8839)

Lima, 27 de febrero de 2020

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedicamos al punto de vista ético, humano y científico a todos nuestros compañeros que continúan su formación académica en la especialidad de ingeniería civil, para instaurar en su formación, conciencia y empatía con el medio ambiente. Recuerden que de nuestro nivel de formación dependerá el inicio a las determinantes decisiones que llevarán a grandes cambios de nuestro país, y así formar una mejor y próspera nación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a nuestros padres por el apoyo brindado en todos estos años de carrera, del mismo modo a nuestros docentes y asesor que día a día se empeñan por sacar lo mejor de nuestro talento e ímpetu para revolucionar el mundo.

RESUMEN

Esta investigación estudia la adición de la ceniza de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en suelos arcillosos para su función como subrasantes en obras de pavimentación.

La ceniza de cáscara de arroz y el bagazo de caña de azúcar son residuos orgánicos que se encuentran en mayor cantidad en los departamentos de San Martín y La Libertad respectivamente. De la totalidad de toneladas de cáscara de arroz generadas en el país, alrededor del 20% constituye la ceniza de la cáscara de arroz. Así mismo alrededor del 25% de caña de azúcar producida en el país constituye el bagazo, según el ministerio de agricultura en el 2017.

La investigación radica en la búsqueda de métodos alternativos a la estabilización de suelos, para comprobar que estos agregados son viables en su utilización para la estabilización de subrasantes se realizaron en laboratorio ensayos de características químicas, físicas y mecánicas; En diferentes porcentajes para evaluar su respuesta como estabilizadores primarios.

Finalmente, la investigación deduce el impacto ambiental ocasionado por nuestra propuesta.

Palabras clave: RHA, SCBA, subrasante, suelos arcillosos, pavimento.

Analysis of the addition of RHA and SCBA in the surrounding of pavements for the stabilization of clay soils in the department of San Martín

ABSTRACT

This research studies the addition of rice ash and sugar bagasse in clay soils for their function as subgrade in paving works.

Rice husk ash and sugar from sugarcane are the organic residues most found in the departments of San Martín and La Libertad, of all the tons of rice husk generated in the country, around the 20% is the ash of the rice husk. Likewise, around 25% of the sugar production in the country is bagasse, according to the Ministry of Agriculture in 2017.

The research is based on the search for alternative methods to soil stabilization, to verify that these aggregates are viable in their use for the stabilization of subgrades in chemical, physical and mechanical clinical trials. In different percentages to evaluate their response as primary stabilizers.

Finally, the research deduces the environmental impact caused by our proposal.

Kyewords: RHA, SCBA, Soil stabilizitaion, clay soils, paving.

Contenido

<i>DEDICATORIA</i>	1
AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE DE TABLAS	8
INDICE DE FIGURAS	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Realidad problemática	16
1.3. Formulación del Problema	17
1.4. Hipótesis	17
1.5. Objetivo General	17
1.6. Objetivos Específicos	17
1.7. Descripción del Contenido	18
2. MARCO TEORICO	19
2.1. Pavimento:	19
2.1.1. Subrasante:	19
2.2. Estabilización de los suelos:	21
2.2.1. Métodos de Estabilización de Suelos:	22
2.3. Ceniza de cáscara de arroz:	23
2.3.1. Origen y Proceso de Obtención de la Ceniza de Cáscara de Arroz	23
2.4. Bagazo de caña de azúcar	25
2.4.1. Características	25
2.5. Suelos arcillosos:	28
3. MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1. Material:	28
3.1.1. Población:	28
3.1.2. Muestra:	29
3.2. Método:	29
3.2.1. Nivel de Investigación:	29
3.2.2. Diseño de Investigación:	29
3.2.3. Variables de estudio y operacionalización:	29
3.2.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos:	30
3.2.5. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos:	30

4.	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	30
4.1.	Ensayos Físicos:.....	30
4.1.1.	Determinación del Contenido de Humedad de un Suelo (MTC E 108-ASTM D2216).....	30
4.1.2.	Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado (MTC E 107-ASTM D422)	32
4.1.3.	Límites de Atterberg:.....	33
4.1.4.	Gravedad Específica de suelos (MTC E113-ASTM D854)	36
4.1.5.	Clasificación de suelos:	37
4.2.	Ensayos Mecánicos:	41
4.2.1.	Ensayo Proctor modificado (MTC E 116-ASTM D1557)	41
4.2.2.	Ensayo CBR (MTC 249-ASTM D1883).....	43
4.2.3.	Compresión no confinada (MTC E 121-ASTM D2166):.....	44
4.3.1.	Análisis de materia orgánica:	45
5.	RESULTADOS:	46
5.1.	Materiales Investigados	46
5.1.1.	Suelo Arcilloso:	47
a)	Contenido de humedad ASTM C566:.....	47
b)	Análisis Granulométrico:	48
c)	Limite Liquido:	51
d)	Limite Plástico:	54
e)	Clasificación SUCS ASTM D - 2487:	55
f)	Proctor Modificado ASTM D - 1557:.....	56
g)	Ensayo CBR ASTM – D – 1883	57
5.1.2.	Ceniza de Bagazo de caña de azúcar (SCBA):.....	60
a)	Análisis Granulométrico:	60
b)	Limite Liquido:	61
5.1.3.	Ceniza de cascarilla de arroz (RHA):	62
a)	Análisis Granulométrico ASTM D422:	62
b)	Limite Liquido.....	64
c)	Limite plástico.....	65
5.1.4.	Mezcla de suelo arcilloso con RHA y SCBA.....	66
a)	Análisis Granulométrico:	67
b)	Limite Líquido:	70
c)	Límite Plástico:	71
d)	Clasificación SUCS ASTM D – 2487:.....	72
e)	Proctor Modificado ASTM D – 1557:	73
f)	Ensayo C.B.R. ASTM D – 1883:.....	76

5.1.5. Estudio de Impacto ambiental:	81
DISCUSIÓN DE RESULTADOS:	83
6. CONCLUSIONES:.....	83
7. RECOMENDACIONES:	84
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:	85
9. ANEXOS:.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CONTENIDO DE BAGAZO.....	11
TABLA 2: POTENCIAL DE EXPANSIÓN	11
TABLA 3: CONTENIDO DE CENIZA DE BAGAZO (%).....	12
TABLA 4: CATEGORÍAS DE SUBRASANTE.	20
TABLA 5: CANTIDAD DE PRODUCCIÓN DE ARROZ EN TONELADAS	23
TABLA 6: PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ.....	24
TABLA 7: PRODUCCIÓN ANUAL DE CAÑA DE AZÚCAR EN TONELADAS	27
TABLA 8:TAMAÑO REGLAMENTARIO PARA ENSAYOS (MTC E 108-ASTM D2216).....	31
TABLA 9: ABERTURA DE TAMICES	32
TABLA 10: CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DE ACUERDO CON SU PLASTICIDAD.....	36
TABLA 11: CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN AASHTO	40
TABLA 12: NIVEL DE CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.....	46
TABLA 13: CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELO ARCILLOSO	48
TABLA 14: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELO ARCILLOSO	48
TABLA 15: ENSAYO LÍMITE PLÁSTICO DE SUELO ARCILLOSO	55
TABLA 16: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SCBA	60
TABLA 17: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE RHA.....	63

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: RESULTADO DE LA COMPRESIÓN NO CONFINADA.	13
FIGURA 2: PORCENTAJES DE FINOS POR PESO.....	13
FIGURA 3: COMPARATIVA ENTRE LOS 3 TIPOS DE CENIZA Y EL PROCENTAJE DEL INDICE DE PLASTICIDAD.	14
FIGURA 4: COMPARATIVA ENTRE LA CARGA VS. EL ESPESOR DEL PAVIMENTO EN MM.	15
FIGURA 5: SECCIÓN TÍPICA DE PAVIMENTO.....	20
FIGURA 6: TIPOS Y TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	21
FIGURA 7: PROCESO DE OBTENCIÓN DE CENIZA CAÑA DE AZÚCAR.....	26
FIGURA 8: COMPORTAMIENTO DEL BAGAZO A COCCIÓN.	27
FIGURA 9: GRÁFICA CON LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS SUELOS ARCILLOSOS.	28
FIGURA 10: COPA DE CASAGRANDE.....	34
FIGURA 11: ELABORACIÓN DE MUESTRAS PARA CÁLCULO DE PLASTICIDAD	35
FIGURA 12: CARTA DE PLASTICIDAD.....	38
FIGURA 13: EQUIPO USADO PARA EL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO.....	42
FIGURA 14: EQUIPO USADO PARA EL ENSAYO CBR	44
FIGURA 15: HERRAMIENTAS PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA	45
FIGURA 16: MATERIAL ARCILLOSO A SER TAMIZADO.	49
FIGURA 17: MATERIAL HUMECTADO	50
FIGURA 18: MATERIAL LAVADO POR MALLA N° 200.....	50
FIGURA 19: SECADO DE SUELO ARCILLOSO.....	51
FIGURA 20: FORMACIÓN DE LA MASA PARA LA COPA DE CASA GRANDE	52
FIGURA 21: MASA ENSAYADA EN LA COPA DE CASAGRANDE	53
FIGURA 22: RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA Y CLASIFICACIÓN SUCS	55
FIGURA 23: CURVA DE DENSIDAD PROCTOR MODIFICADO.....	56
FIGURA 24: CURVA CARGA – PENETRACIÓN	58
FIGURA 25: CURVA DE DENSIDAD – CBR.....	58
FIGURA 26: PORCENTAJE DE EXPANSIÓN DEL SUELO ARCILLO.....	59
FIGURA 27: CURVA GRANULOMÉTRICA DE SCBA.....	61
FIGURA 28: SCBA HUMEDECIDO	61
FIGURA 29: CURVA GRANULOMÉTRICA DE RHA	63
FIGURA 30: TAMIZADO DE RHA.....	64
FIGURA 31: RHA HUMECTADO PARA PRUEBAS DE LIMITE LÍQUIDO	65
FIGURA 32: HUMECTACIÓN DEL RHA.....	66
FIGURA 33: SUELOS ARCILLOSO MEZCLADO CON RHA + SCBA.....	67
FIGURA 34: MUESTRA DE SUELO ARCILLOSO LAVADA CON RHA + SCBA	67
FIGURA 35: RESULTADOS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO REEMPLAZO 5%.....	68
FIGURA 36: RESULTADOS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO REEMPLAZO 7.5%.....	68
FIGURA 37: RESULTADOS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO REEMPLAZO 10%.....	68
FIGURA 38: CURVA GRANULOMÉTRICA DE SUELO ARCILLOSO + 5% RHA +5% SCBA	69
FIGURA 39: CURVA GRANULOMÉTRICA DE SUELO ARCILLOSO + 7.5% RHA + 7.5% SCBA.	69
FIGURA 40: CURVA GRANULOMÉTRICA DE SUELO ARCILLOSO + 10% RHA + 10% SCBA.	69
FIGURA 41: HUMECTACIÓN DEL SUELO ARCILLOSO + RHA + SCBA.	70
FIGURA 42: PRUEBA EN COPA CASAGRANDE DE SUELO ARCILLOSO + RHA + SCBA	71
FIGURA 43: RESULTADOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA DE SUELO ARCILLOSO + 5% RHA + 5% SCBA. ...	72
FIGURA 44: RESULTADOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA DE SUELO ARCILLOSO + 7.5% RHA + 7.5% SCBA.	72
FIGURA 45: RESULTADOS DE LIMITES DE CONSISTENCIA DE SUELO ARCILLOSO + 10% RHA + 10% SCBA.72	72
FIGURA 46: RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA Y DE CLASIFICACIÓN SUCS MEZCLA CON 5% DE REEMPLAZO.	73
FIGURA 47: RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA Y DE CLASIFICACIÓN SUCS MEZCLA CON 7.5% DE REEMPLAZO.	73
FIGURA 48: RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA Y DE CLASIFICACIÓN SUCS MEZCLA CON 10% DE REEMPLAZO.	73
FIGURA 49: CURVA DE DENSIDAD SUELO ARCILLOSO + 5% RHA + 5% SCBA	74
FIGURA 50: CURVA DE DENSIDAD SUELO ARCILLOSO + 7.5% RHA + 7.5% SCBA	75

FIGURA 51: CURVA DE DENSIDAD SUELO ARCILLOSO + 10% RHA +10% SCBA	75
FIGURA 52: CURVA CARGA - PENETRACIÓN SUELO ARCILLOSO + 5% RHA + 5% SCBA	76
FIGURA 53: CURVA DE DENSIDAD – CBR SUELO ARCILLOSO + 5% RHA + 5% SCBA	77
FIGURA 54: PORCENTAJE DE EXPANSIÓN DEL SUELO ARCILLO + 5% RHA +5% SCBA.	77
FIGURA 55: CURVA CARGA - PENETRACIÓN SUELO ARCILLOSO + 7.5% RHA + 7.5% SCBA.	78
FIGURA 56: CURVA DE DENSIDAD – CBR SUELO ARCILLOSO + 7.5% RHA + 7.5% SCBA	79
FIGURA 57: PORCENTAJE DE EXPANSIÓN DEL SUELO ARCILLO + 7.5% RHA +7.5% SCBA.	79
FIGURA 58: CURVA CARGA - PENETRACIÓN SUELO ARCILLOSO + 10% RHA + 10% SCBA.	80
FIGURA 59: CURVA DE DENSIDAD – CBR SUELO ARCILLOSO + 10% RHA + 10% SCBA	80
FIGURA 60: PORCENTAJE DE EXPANSIÓN DEL SUELO ARCILLO + 10% RHA +10% SCBA.	81
FIGURA 61: CASCARILLA DE ARROZ EN PROCESO DE QUEMA	82

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En la investigación del doctor John Tri Hatmoko realizó pruebas del efecto de agregar residuo de carburo de calcio y ceniza de bagazo sobre el suelo y obtuvo mejoras en las características expansivas. Se tomó muestras en orden de 2-10% de CCR (Residuo de carburo de calcio) siguiendo el ASTM D 4944. Las muestras fueron curadas a 7 y 14 días para examinar el cambio.

Tabla 1: Contenido de bagazo

Curing time (days)	Bagasse Content (%)				
	0	3	6	9	12
0	W0T0	W0T3	W0T6	W0T9	W0T12
7	W7T0	W7T3	W7T6	W7T9	W7T12
14	W14T0	W14T3	W14T6	W14T9	W14T12
21	W21T0	W21T3	W21T6	W21T9	W21T12
28	W28T0	W28T3	W28T6	W28T9	W28T12
36	W36T0	W36T3	W36T6	W36T9	W36T12

Nota. Se compara la adición del bagazo en las diferentes muestras. Adaptado de «Self-Healing Processes in Concrete», por Schlangen, E, 2005.

De esta forma se nombró las muestras. Y se obtuvo el índice de plasticidad y el potencial expansivo.

Tabla 2: Potencial de expansión

CCR(%)	I P(%)	Swelling Potential (%)		Swelling pressure (kPa)	
		[21]	Lab	[21]	Lab
C0W7	47.5	11.2	12.11	298	301
C2W7	41	7.8	10.4	278	286
C4W7	35	4.9	5.3	209	217
C6W7	27.4	3.6	3.9	172	181
C8W7	16.7	1.9	2.3	129	136
C10W7	16.9	0.82	2.4	98	137

Nota. Se compara el potencial de expansión y de presión. Adaptado de «Self-Healing Processes in Concrete», por Schlangen, E, 2005.

La prueba de compactación fue hecha con 8% de CCR en 0, 7, 14, 21, 28 y 36 días de curado en los resultados se obtuvo que la densidad máxima seca era proporcional al tiempo de curado y que a los 28 días se obtuvo el mejor resultado debido a la transferencia de iones que resulto en una mejora de las propiedades físicas y mecánicas.

Tabla 3: Contenido de ceniza de bagazo (%)

Curing time(days)	Content of bagasse ash (%)									
	0		3		6		9		12	
	γ (kN/m ³)	wopt (%)	γ (kN/m ³)	wopt (%)	γ (kN/m ³)	wopt (%)	γ (kN/m ³)	wopt (%)	γ (kN/m ³)	wopt (%)
0	14.3	36	14.8	35	15	34	15.4	33	15.5	36
7	15.2	34.5	15.9	34	15.6	33.5	15.9	32	15.9	34.5
14	16.8	33.5	16.9	33	17.1	33	17.3	31.5	17.3	33.5
21	17.8	33	18.1	32	17.9	32.5	17.8	31	17.9	33
28	18.5	32	18.9	31	18.8	31	18.7	30	18.4	32
36	18.6	31	18.9	30	18.8	30.5	19.2	29	19.3	31

Nota. Se compara el contenido de ceniza de bagazo. Adaptado de «Self-Healing Processes in Concrete», por Schlangen, E, 2005.

Respecto a la compresión no confinada, la mejora significativa se ve en la compresión no confinada con 9% de ceniza de bagazo que inicialmente parte en

41,8kPa y va hasta los 354,7kPa en 36 días de curado, por otra parte, la resistencia en un aumento del 9 al 12% no es significativa respecto al tiempo de curado y los resultados demuestran que después de los 28 días no hay grandes mejoras.

Figura 1: Resultado de la compresión no confinada.

Adaptado de «Self-Healing Processes in Concrete», por Schlangen, E, 2005

En otro estudio realizado por Anjani Kumar Yadav, se demuestra la mejora de suelos aluviales en la India usando la ceniza de cáscara de arroz (RHA), en la India más del 50% del suelo presenta estas características. Del mismo modo el autor pretende evitar gastos en reparación de pavimentos que cada año se cuentan por millones debido a las características de la zona antes mencionada. Adicionalmente buscan disminuir el espesor del pavimento mejorando la subrasante y así minimizar costos y ampliar beneficios. Consecuentemente el autor busca dar utilización máxima a los recursos (deshechos) de la zona y así evitar demoras y sobrecostos en el transporte de estos.

Kumar Yadav clasificó el suelo como arcilla plástica intermedia y utilizó porcentajes de RHA, en relación al suelo que variaban entre 2.5% y 12.5%.

Figura 2: Porcentajes de finos por peso

Adaptado de «Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads» por, Kumar Yadav, 2017.

También se realizaron estudios de límites de plasticidad y los resultados fueron los siguientes: Ceniza de cáscara de arroz (RHA), ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) y ceniza de estiércol de vaca (CDA).

Different mixing proportions Soil: Ash (CDA/RHA/SCBA)	RHA		SCBA		CDA	
	LL	PL	LL	PL	LL	PL
100:0	36.06	23.7	36.06	25.10	36.06	23.70
97.5:2.5	35.20	24.92	36.61	25.86	33.79	23.33
95:5	35.06	25.27	34.50	24.60	38.03	27.76
92.5:7.5	34.87	26.32	33.24	25.76	41.63	31.87
90:10	34.52	27.96	32.37	26.25	39.3	29.62
87.5:12.5	34.49	28.33	31.85	25.97	42.81	33.44

Figura 3: Comparativa entre los 3 tipos de ceniza y el porcentaje del indice de plasticidad.

Adaptado de «Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads» por, Kumar Yadav, 2017.

El autor concluye que al aumentar las diferentes cenizas del suelo el índice de plasticidad disminuye proporcionalmente y que las cantidades optimas de aumento varían entre 2,5 y 12,5% al superar estos porcentajes el índice de plasticidad disminuye proporcionalmente.

Por último, Yadav hace un estudio del espesor del pavimento dependiendo del tipo de suelo y sus adiciones de ceniza respectivamente, los resultados demuestran que las adiciones de ceniza requieren un menor espesor del pavimento.

Figura 4: Comparativa entre la carga vs. El espesor del pavimento en mm.

Adaptado de «Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads» por, Kumar Yadav, 2017.

Delgado López et al. Pretenden buscar una solución a la licuación del suelo por ende estudió a posibilidad de agregar SCBA activada alcalinamente y evaluar los resultados en la zona de estudio. Realizó pruebas con adiciones que variaban de 10 a 20% de adición en respecto del peso del suelo, dando como resultado óptimo la mezcla de 15% en donde el suelo mejoraba un 20% en compresión respecto a la muestra no alterada. Por otro lado, la resistencia disminuyó debido a que no toda la sílice presente en la mezcla reaccionó.

Adicionalmente se realizó otro estudio donde se realizaron ensayos mediante la mezcla de RHA más cal en el suelo arcilloso. Las mezclas propuestas por el autor fueron entre 10 y 40% con adición de 3% de cal. La combinación ideal que se obtiene de los ensayos es 20% de reemplazo de RHA mediante el cual se puede apreciar una mejora de CBR de 6 veces (de 5% hasta 38.5%). Finalmente, Castro concluye que se puede utilizar este suelo para subrasante de pavimentos al ser considerada como excelente.

Estas investigaciones demuestran la respuesta de estos materiales cuando se aplican en la subrasante de pavimentos y los resultados indican que existe una mejora del pavimento

Nuestro árbol de problemas en busca de las causas y sus consecuencias se presenta a continuación:

1.2.Realidad problemática

El problema de la estabilización de los suelos es uno de los más comunes dentro de la rama de la ingeniería geotécnica, por lo tanto, su solución implica que se hagan grandes avances en los estudios realizados en la implementación de agregados ecológicos en el refuerzo del suelo para la subrasante. Este estudio también implica comprender lo alarmante que es el problema de los suelos inestables ya que representan millones de dólares en pérdidas anualmente en reparaciones y refuerzos. Además, mediante esta tesis puede ser percibido el estado actual de las vías y su mejoramiento al momento de iniciar una carretera por lo tanto es el inicio para que las grandes proyectos viales y obras se den cuenta que pueden optar por una alternativa ecológica en la creación o ampliación de carreteras y así poder realizar un desarrollo sustentable que no comprometa los recursos para las siguientes

generaciones y más aún cuando dichos recursos son limitados y fácilmente agotables.

1.3. Formulación del Problema

¿Es posible que se llegue a una estabilización mejorada del suelo mediante la adición de ceniza de cáscara de arroz y ceniza de bagazo como agregados ecológicos a la subrasante de pavimentos?

1.4. Hipótesis

El uso de la ceniza de cáscara de arroz y ceniza de bagazo de caña de azúcar en las subrasantes de pavimentos es muy viable en cuanto a costo y reducción del impacto ambiental que genera en la rama de construcción. La estabilización de suelos es viable para cada material por separado, esperamos que la adición de ambos agregados conjuntamente resulte mejor o igual en condiciones de estabilidad y mejoras de propiedades físicas y mecánicas.

1.5. Objetivo General

- Realizar un estudio que permita determinar si la adición de las cenizas de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar pueden ser utilizadas como material estabilizante en suelos arcillosos

1.6. Objetivos Específicos

- Determinar que ensayos se deben realizar para obtener las características físicas y mecánicas de los agregados.
- Comprobar que el porcentaje de adición efectivo de cada agregado

planteado en estudios pasados sea el óptimo.

- Obtener el porcentaje de adición efectivo de cada agregado usado conjuntamente.
- Realizar un análisis comparativo entre el suelo sin adición versus el suelo mejorado con RHA y SCBA para deducir si mejora en sus características como capa subrasante.
- Estudiar el impacto ambiental producto de estos desechos.

1.7.Descripción del Contenido

Este informe de tesis cuenta con 5 capítulos que van a desarrollarse en 32 semanas que es lo que dura el proyecto de tesis. El primer capítulo, presentará la descripción del proyecto, explicará acerca de las técnicas y métodos usualmente empleados, también el método a ser empleado para que pueda ser probada nuestra hipótesis y puedan cumplirse los alcances de este proyecto. Del mismo modo, se verá la investigación a un nivel primario mostrando la realidad actual, antecedentes y que es lo que esperamos conseguir con este estudio.

El segundo capítulo, hará énfasis al uso de las técnicas y guías que se usarán y seguirán para lograr los objetivos de la investigación. De igual manera, se explicará el fundamento teórico de la investigación para demostrar que el estudio tiene bases sólidas y comprobables que respalden nuestras investigaciones.

El tercer capítulo, se desarrollará la propuesta que se ha decidido plantear para solucionar el problema de la estabilización de suelos, en este capítulo se llevarán a cabo los ensayos y se buscarán los resultados de la investigación mediante los cuales

nos permitirá obtener resultados confiables y empíricos de nuestra hipótesis.

El cuarto capítulo expondrá las conclusiones de los ensayos antes mencionados, mediante los cuales podremos llegar a una discusión de resultados y proponer las diferentes recomendaciones que permitan dar una respuesta y solución satisfactoria a la problemática de este proyecto.

El quinto y último capítulo, presentara las referencias bibliográficas empleadas en el estudio de todo el proyecto de tesis, adicionalmente también se plasmarán los anexos de la investigación.

2. MARCO TEORICO

2.1.Pavimento:

2.1.1. Subrasante:

Los pavimentos son estructuras civiles que sirven de comunicación y transporte en todos los países. El pavimento tiene una estructura definida en sí misma y se pueden diferenciar en dos tipos. Rígidos y flexibles, los cuales solo tienen una capa diferente.

Figura 5: Sección típica de pavimento

Adaptado de «Estabilización de suelos arcillosos», por Castro, A, 2017.

La subrasante, la que no es más que el suelo mismo donde se asentará la estructura, es la capa más importante ya que requiere de gran capacidad para sostener a la estructura y las distintas cargas a las que se verá sometido el pavimento a través del tiempo. Usualmente los suelos por si solos no son suficientemente adecuados para ser usados como subrasantes de carreteras. Por lo tanto, reciben diversos tratamientos llamados comúnmente estabilizaciones. Los cuales sirven para lograr las características necesarias para ser parte de la estructura de los pavimentos. Esta investigación presenta un método innovador para la estabilización de esta capa de pavimento que se detalla más adelante.

Se puede identificar diversos tipos de subrasantes dependiendo de los resultados en la prueba de CBR, los resultados ideales que se persigue con esta tesis es que se llegue a obtener el resultado mayor al 30%.

Tabla 4: Categorías de subrasante.

Categoría de Subrasante	CBR
Subrasante inadecuada	$CBR < 3$
Subrasante pobre	$3 \leq CBR < 6$
Subrasante regular	$6 \leq CBR < 10$
Subrasante buena	$10 \leq CBR < 20$
Subrasante muy buena	$20 \leq CBR < 30$
Subrasante excelente	$30 \leq CBR$

Fuente: Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2014.

2.2. Estabilización de los suelos:

Es el mejoramiento de las características o propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante los diversos procedimientos mecánicos ya sea con productos hechos por la naturaleza o el hombre (Castro, 2017). La resistencia al esfuerzo cortante, compresibilidad, estabilidad volumétrica y capacidad de carga son algunas de las propiedades que se mejoran a través de la estabilización del suelo.

Figura 6: Tipos y técnicas de estabilización de suelos.

Adaptado de «Estabilización de suelos arcillosos», por Castro, A, 2017.

2.2.1. Métodos de Estabilización de Suelos:

2.2.1.1. Estabilización Física y Mecánica:

La estabilización física comprende mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo, mientras que la estabilización mecánica busca mejorar el suelo considerablemente sin producir reacciones químicas de importancia. Los métodos dentro de estos son los siguientes:

- Compactación
- Geotextiles
- Vibro flotación
- Consolidación Previa

2.2.1.2. Estabilización Química:

Principalmente este método de estabilización se refiere a la adición de ciertas sustancias químicas patentadas cuyo uso involucra el reemplazo de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en los procesos.

- Cal
- Cemento Portland
- Productos Asfálticos
- Cloruro de Sodio
- Cloruro de Calcio
- Escorias de fundición
- Polímeros, etc.

2.3.Ceniza de cáscara de arroz:

La ceniza de cáscara de arroz es un desecho orgánico el cual usualmente solo es eso un desecho sin uso alguno. Hace algunos años empezó a desarrollarse el uso de la ceniza de cáscara de arroz como agregado en distintas estructuras de la construcción. La adición de este agregado ha resultado positiva en gran parte de las estructuras estudiadas, por tal razón en esta tesis se analiza el porcentaje de mejora que genera la ceniza de cáscara de arroz en la capa subrasante de un pavimento.

2.3.1. Origen y Proceso de Obtención de la Ceniza de Cáscara de Arroz

La cáscara de arroz es un desecho orgánico que tiene su origen en la cosecha de cultivos de arroz, nuestro país muestra en el año 2017 un total de alrededor de 3,000 toneladas (**SIEA**), de los cuales el 20% de este peso, representa la cáscara de arroz y un 20% de esta cáscara, es la ceniza.

Tabla 5: Cantidad de producción de arroz en toneladas

Región	Total	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Nacional	3,038,766	170,517	131,551	231,793	244,042	259,680	629,685	480,900	121,230	153,666	174,725	143,612	297,363
Amazonas	327,568	23,085	18,433	26,164	30,534	31,701	39,324	35,720	28,020	29,939	25,452	19,507	19,690
Ancash	64,425	935	16,200	16,100	27,900	3,290	0	0	0	0	0	0	0
Apurímac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Arequipa	281,393	0	10,517	95,598	99,764	69,973	5,542	0	0	0	0	0	0
Ayacucho	173	15	87	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cajamarca	186,759	3,898	3,382	11,231	10,325	19,610	34,534	14,816	4,830	16,911	22,416	30,367	14,439
Callao	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cusco	1,827	35	180	60	463	623	466	0	0	0	0	0	0
Huancavelica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Huánuco	63,157	6,157	7,207	8,550	5,491	5,255	2,655	2,592	4,012	6,153	3,626	5,799	5,660
Ica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junín	4,255	53	81	186	469	1,392	1,445	350	47	78	107	48	0
La Libertad	206,995	1,625	3,612	3,345	5,944	49,056	133,197	10,079	0	0	0	0	138
Lambayeque	400,575	20,190	680	0	0	1,790	169,653	197,617	2,480	0	0	0	8,165
Lima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lima Metropolitana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Loreto	101,205	8,362	5,178	3,061	1,432	617	734	3,300	6,918	16,963	23,917	12,837	17,886
Madre de Dios	5,598	976	1,724	1,621	370	0	0	122	246	350	189	0	0
Moquegua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pasco	3,169	776	790	541	199	0	220	346	246	0	16	36	0
Piura	378,864	32,075	0	0	0	4,283	121,730	116,066	2,625	0	0	765	101,320
Puno	183	0	0	0	134	49	0	0	0	0	0	0	0
San Martín	822,885	59,296	60,264	62,366	58,530	68,817	77,999	69,551	68,009	67,034	84,529	68,967	77,525
Tacna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumbes	123,537	10,855	0	0	0	448	38,476	24,755	0	0	0	0	49,002
Ucayali	66,198	2,184	3,217	2,898	2,489	2,776	3,713	5,586	3,797	16,239	14,475	5,286	3,538

Nota: Producción anual de arroz por departamento en el Perú.

Fuente: Dirección regional de agricultura - SEIA

La ceniza se obtiene mediante la quema de la cascarilla del arroz y representa, el 20% del peso total de la cáscara. Para los estudios y ensayos de esta tesis es necesario que la cáscara se queme por un promedio de 5-8 horas, de esta manera se podrá eliminar cualquier tipo de presencia orgánica en este agregado. (Wang, J.Y, 2012).

Se debe mantener a condiciones ambientales (17°C y hasta 75% de humedad) para que el grano no se degrade y perjudique los resultados del ensayo y se obtenga datos erróneos. (Dirección Regional de Energía y Minas, 2014)

Tabla 6: Propiedades físicas de la ceniza de cáscara de arroz

Propiedad Física	Ceniza de cascarilla de arroz
Humedad (%)	0,65
Densidad (Kg/m ³)	1684
Masa unitaria suelta (Kg/m ³)	205
Masa unitaria compacta (Kg/m ³)	272
% vacíos en agregado suelto	0,88
% vacíos en agregado compactado	0,84

Nota. Se muestra las principales propiedades de la ceniza de arroz.

Fuente: Novoa Galeano & Becerra León, 2016

2.4. Bagazo de caña de azúcar

Se obtiene mediante el despulpamiento de la caña de azúcar en su estado natural, después de ser recolectada. El bagazo de caña de azúcar puede ser utilizado como materia prima para la quema en altos hornos de carácter natural. Es importante precisar que la fibra de este agregado representa entre el 40-50% de su volumen total de la planta (Hernández, 2011).

2.4.1. Características

Por su composición química, el bagazo de caña de azúcar tiene altos contenidos de materiales puzolánicos como el dióxido de silicio (SiO₂) y otros óxidos que producen la actividad puzolánica, lo que permiten trabajarlo como material cementante para estabilización de suelos o en morteros. Las puzolanas son materiales sin capacidad de actividad hidráulica por sí solos, por esto se deben de mezclar con activadores alcalinos para generar compuestos con propiedades aglomerantes, dando a lugar a cementantes hidráulicos como es la cal (Salazar, 2011).

Figura 7: Proceso de obtención de ceniza caña de azúcar

Adaptado de «Influencia del porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar activada alcalinamente sobre la tensión efectiva en suelos susceptibles a licuación», por Delgado, C, 2017).

La producción anual de caña de azúcar está en aumento progresivo a escala de 3% anualmente según el ministerio de agricultura y uno de los departamentos que más produce es La Libertad, seguido de Lambayeque y Lima.

Tabla 7: Producción anual de caña de azúcar en toneladas

Región	Total	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Nacional	9,399,617	862,793	611,877	288,131	454,322	684,238	732,270	908,919	976,767	#####	#####	#####	860,670
Amazonas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ancash	904,749	81,704	73,901	60,003	97,646	98,781	89,428	4,929	48,501	100,918	90,165	88,321	70,452
Apurímac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Arequipa	52,224	0	3,456	6,706	0	6,206	3,103	7,303	4,487	4,461	5,277	5,628	5,597
Ayacucho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cajamarca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Callao	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cusco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Huancavelica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Huánuco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junín	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
La Libertad	4,473,133	409,193	320,408	101,343	228,944	258,142	259,915	448,726	511,434	461,045	464,559	509,177	500,246
Lambayeque	2,489,374	247,658	115,052	23,551	54,497	198,214	245,508	289,530	268,208	314,759	316,125	247,866	168,405
Lima	1,480,137	124,238	99,060	96,528	73,235	122,895	134,316	158,431	144,137	123,854	135,493	151,981	115,970
Lima Metropolitana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Loreto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Madre de Dios	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moquegua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pasco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Piura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Puno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
San Martín	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tacna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumbes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ucayali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: Producción anual de caña de azúcar por departamento en el Perú.

Fuente: Dirección regional de agricultura - SEIA

A 100°C se presenta una pérdida inicial de masa, resultante de la evaporación de agua absorbida.
A 350°C Inicia una ignición del material más volátil, aquí es donde inicia la quema del bagazo.
Entre 400° a 500°C el carbón residual y los óxidos se forman, se observa una pérdida más importante de masa, después de esta etapa la ceniza se convierte en amorfa, rica en sílice.
El uso de temperaturas por arriba de los 700°C puede llevar a la formación de cuarzos, y niveles aún más elevados de temperatura, pueden crear otras formas cristalinas.
Encima de los 800°C, el sílice presente en la ceniza del bagazo de caña de azúcar es esencialmente cristalino.

Figura 8: Comportamiento del bagazo a cocción.

Los componentes del bagazo de caña de azúcar dependen fundamentalmente de la ubicación de la planta, tiempo, fertilizantes usados para su cuidado entre otros. (Hernández, 2011). Es importante precisar que su almacenamiento no requiere grandes unidades especiales de almacenamiento.

2.5.Suelos arcillosos:

Son los sedimentos minerales con gran presencia de silicatos que poseen gran plasticidad en su composición principalmente en contacto con el agua. (Castro, 2017).

Figura 9: Gráfica con la composición química de los suelos arcillosos.

Adaptado de «Estabilización de suelos arcillosos» por Castro, A, 2017.

Existe una gran variedad de arcillas y entre las principales tenemos: Caolinitas, Illitas y Montmorillonitas. Podemos encontrarlas diferentes en la unión de sus partículas y sus comportamientos bajo presencia de un líquido como el agua. Dependerá de este el nivel de expansión, estabilidad y volumen en su comportamiento como suelo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.Material:

3.1.1. Población:

La subrasante de pavimentos en suelos arcillosos

3.1.2. Muestra:

Se tomarán 12 muestras de subrasante, de las cuales todas contarán con medidas de alrededor de 1 m² y una altura comprendida entre 15 a 20 cm.

3.2.Método:

3.2.1. Nivel de Investigación:

Consideramos el nivel de investigación explicativa la cual se fundamenta a través de formular una mezcla con ceniza de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar para la estabilización de subrasantes en pavimentos.

3.2.2. Diseño de Investigación:

Considerándolo experimental ya que es un diseño no visto el cual se comprobará mediante la respuesta hacia ensayos, cuyos resultados demuestren la funcionalidad esperada.

3.2.3. Variables de estudio y operacionalización:

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de Medida	Instrumento de Investigación
Independiente (VI): X: Porcentaje de adición de agregados	X1: Porcentajes de adición de cada agregado	*Porcentaje óptimo en la mezcla	Porcentaje	Prueba y ensayo
Dependiente (VD): Y: Estabilización de subrasante arcillosa con CBCA y RHA	Y1: Resistencia de la subrasante kg/m ²	*Porcentaje de respuesta del ensayo CBR	Porcentajes de resistencia del suelo	Ensayo de Laboratorio

3.2.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos:

Se obtendrán datos a través de las siguientes herramientas.

- ❖ Ensayo de resistencia CBR
- ❖ Ensayo Proctor
- ❖ Límites de Atterberg
- ❖ Clasificación SUCS.
- ❖ Ensayo de Granulometría

3.2.5. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos:

Para esta propuesta se realizan distintas comparativas, como las siguientes

- ❖ Porcentajes de RHA 5% + SCBA 5% con suelo arcilloso vs suelo arcilloso
- ❖ Porcentajes de RHA 7.5% + SCBA 7.5% con suelo arcilloso vs suelo arcilloso
- ❖ Porcentaje óptimo de RHA 10% + SCBA 10% con suelo arcilloso vs suelo arcilloso

4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Con el propósito de obtener información geotécnica del suelo a investigar, se realizarán ensayos de carácter físico, mecánico y químico de las diferentes mezclas a realizar.

4.1. Ensayos Físicos:

Estos ensayos fueron realizados de acuerdo con el manual de ensayo de materiales para carretera de Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Estos ensayos se realizarán en los laboratorios de la Universidad Nacional de Ingeniería y de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

4.1.1. Determinación del Contenido de Humedad de un Suelo (MTC E 108-ASTM D2216)

La humedad o contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada

como porcentaje, del peso de agua entre el peso del suelo, al peso del suelo seco.

Este ensayo determina el peso de agua eliminada, secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno controlado a 110 ± 5 °C*. El peso del suelo que permanece del secado en horno es usado como el peso de las partículas sólidas. La pérdida de peso debido al secado es considerada como el peso del agua.

Además, la cantidad mínima de espécimen de material húmedo seleccionado como representativo de la muestra total, si no se toma la muestra total, será de acuerdo con lo siguiente:

Tabla 8: Tamaño reglamentario para ensayos (MTC E 108-ASTM D2216)

Máximo tamaño de partícula (pasa el 100%)	Tamaño de malla estándar	Masa mínima recomendada de espécimen de ensayo húmedo para contenidos de humedad reportados	
		a $\pm$ 0,1%	a $\pm$ 1%
2 mm o menos	2,00 mm (Nº 10)	20 g	20 g *
4,75 mm	4,760 mm (Nº 4)	100 g	20 g *
9,5 mm	9,525 mm (3/8")	500 g	50 g
19,0 mm	19,050 mm (3/4")	2,5 kg	250 g
37,5 mm	38,1 mm (1 1/2")	10 kg	1 kg
75,0 mm	76,200 mm (3")	50 kg	5 kg

Nota.- * Se usará no menos de 20 g para que sea representativa.

Se calcula el contenido de humedad de la muestra, mediante la siguiente fórmula.

$$W = \frac{\text{Peso. de. agua}}{\text{Peso. del. suelo. secado. al. horno}} \times 100$$

$$5. \quad W = \frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} \times 100 = \frac{M_W}{M_S} \times 100$$

Donde:

W= es el contenido de humedad, (%)

M_{cws}	= es el peso del contenedor más el suelo húmedo, en gramos
M_{cs}	= es el peso del contenedor más el suelo secado en horno, en gramos
M_c	= es el peso del contenedor, en gramos
M_w	= es el peso del agua, en gramos
M_s	= es el peso de las partículas sólidas, en gramos

El conocimiento de la humedad natural de un suelo no sólo permite definir anticipadamente el tratamiento a darle, durante la construcción, sino que también permite estimar su posible comportamiento, como subrasante, pues, si el contenido natural de agua de un suelo está próximo al límite líquido, es casi seguro que se está tratando con un suelo muy sensitivo y si, por el contrario, el contenido de agua es cercano al límite plástico, puede anticiparse que el suelo presentará un buen comportamiento. (Montejo Fonseca, 2002)

4.1.2. Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado (MTC E 107-ASTM D422)

Mediante este análisis se determina cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas que constituyen el suelo, clasificándolos en función de su tamaño. Se realiza mediante tamices de distintos tamaños que separa mediante porcentaje de retenidos y pasantes, para de esta manera clasificar el suelo muestreado.

Los tamices son los siguientes:

Tabla 9: Abertura de tamices

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 ½"	38,100
1"	25,400
¾"	19,000
⅜"	9,500
Nº 4	4,760
Nº 10	2,000
Nº 20	0,840
Nº 40	0,425
Nº 60	0,260
Nº 140	0,106
Nº 200	0,075

4.1.3. Límites de Atterberg:

Los Límites de Atterberg o límites de consistencia establecen la sensibilidad de un suelo en relación con su contenido de humedad, definiéndose los límites correspondientes a los cuatro estados de consistencia según su humedad y de acuerdo a ello puede presentarse un suelo: líquido, plástico, semisólido o sólido.

- Límite Líquido (MTC E 110–ASTM D4318)

El límite líquido se define como el máximo contenido de humedad que puede tener un suelo sin pasar del estado plástico al líquido. El estado líquido se define como la condición en la que la resistencia al corte del suelo es tan baja que un ligero esfuerzo lo hace fluir. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma MTC E 110 del manual de ensayo de materiales del MTC, donde se designa al contenido de humedad con el cual el surco separador de dos mitades de una pasta de suelo se juntan cuando se deja caer 25 veces la copa del instrumento Copa de Casa grande a un altura de 1cm con un ritmo

de 2 caídas por segundo. En la figura 8 se muestra el equipo llamado Copa de Casagrande, para la ejecución de este ensayo.

Figura 10: Copa de Casagrande

- Límite Plástico (MTC E 111-ASTM D4318)

El límite plástico se define como la mínima cantidad de humedad con la cual el suelo se vuelve a la condición de plasticidad. En este estado, el suelo puede ser deformado rápidamente o moldeado sin recuperación elástica, cambio de volumen, agrietamiento o desmoronamiento. Para contenidos de humedad mayores del límite plástico se presenta una caída muy pronunciada en la estabilidad del suelo. (Montejo Fonseca, 2002) Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma MTC E 111 del manual de ensayo de materiales del MTC, donde se designa al contenido de humedad más bajo cuando al

formar barras de suelo de unos 3,2 mm de diámetro, rodando entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichas barras se desmoronen. En la figura 9 se muestran las barras cilíndricas que se ejecutan para el cálculo del límite plástico.

Figura 11: Elaboración de muestras para cálculo de plasticidad

- Índice de Plasticidad (MTC E 111-ASTM D4318)

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma MTC E 111 del manual de ensayo de materiales del MTC donde se realiza el cálculo del índice de plasticidad como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. El índice de plasticidad se expresa mediante la siguiente formula:

$$IP=LL-LP$$

El índice de plasticidad permite indicar el grado de contenido de humedad en el cual un suelo permanece en estado plástico (antes de cambiar al estado líquido) permitiendo clasificar bastante bien un suelo. De acuerdo al valor del índice de plasticidad podemos tener la siguiente clasificación:

Tabla 10: Clasificación de los suelos de acuerdo con su plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Características
IP>20	Alta	Suelos muy arcillosos
7<IP≤20	Media	Suelos arcillosos
IP<7	Baja	Suelos pocos arcillosos
IP=0	No plástico	Suelos exentos de arcilla

Nota: Criterios de plasticidad en suelos arcillosos

Fuente: Manual de suelos y pavimentos 2014.

4.1.4. Gravedad Específica de suelos (MTC E113-ASTM D854)

Este ensayo tiene como objetivo determinar el peso específico de los suelos que pasen el tamiz de 4,75 mm (N°4) utilizando un picnómetro de agua. Cuando el suelo tenga partículas más grandes que la malla N° 4 deberá seguirse el método de ensayo del MTC E 206 peso específico y la absorción del agregado grueso. La gravedad específica de sólidos se define como la relación entre el peso en el aire de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y el peso en el aire del mismo volumen de agua destilada. Para la ejecución del ensayo se deberá utilizar picnómetros, hornos o estufas, balanzas, pipetas, termómetro, tamices. Se realizará el método B, el cual indica que los especímenes deben ser secados al horno. Para la realización de este ensayo el agua a usar debe estar desairada para asegurar que no

hayan burbujas de aire en el agua. El agua puede ser desairada ya sea mediante ebullición, vacío, combinación de vacío y calentamiento, o un mecanismo de desairado.

4.1.5. Clasificación de suelos:

Se han desarrollado algunos métodos de clasificación de suelos debido a la gran variedad de suelos que existen en la naturaleza. Actualmente los sistemas de clasificación más utilizados en estudios para el diseño de carreteras y aeropuertos son el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Unified Soil Classification System, conocido como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).

- **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos**

Este es uno de los sistemas de clasificación comúnmente usado, fue propuesto por A. Casagrande como una modificación del sistema de clasificación de aeropuertos. La ventaja de este sistema es que aclara mejor las propiedades de los suelos y su descripción. Este sistema clasifica los suelos según la textura y la plasticidad; dividiendo las categorías en granos finos y granos gruesos, tomando en cuenta los límites de Atterberg y la granulometría del suelo. Los suelos de grano fino y grueso se distinguen por el tamiz de malla N°200; las partículas gruesas son mayor a la malla N°200 y las finas son menores a dicha malla. De acuerdo a este sistema se considera al suelo grueso si el

50% de partículas son gruesas y se considera un suelo fino cuando más de la mitad de sus partículas son finas.

La clasificación se divide en grava (G), arena (S), arcilla (C) y limo (M) los cuales a su vez llevan una segunda letra para definirlos más exactamente.

La clasificación de los suelos finos se realiza con la siguiente carta de plasticidad que se aprecia en la figura 10.

Figura 12: Carta de plasticidad

- AASHTO

Este sistema de clasificación fue originalmente desarrollado por Terzaghi y Hogentogler para el Bureau of Public Roads norteamericano. En esta clasificación los suelos se clasifican en siete grupos (A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7), según su granulometría y plasticidad. Más concretamente, en función del porcentaje que pasa por los tamices N°200, 40 y 10, y de los Límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz N°40. Estos siete grupos se corresponden a dos grandes categorías de suelos:

(a) Suelos granulares

Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz No. 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 Y A-3.

(b) suelos limo-arcillosos

Contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz número 200. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

Los ensayos necesarios para encajar un suelo dentro de un grupo son el análisis granulométrico y los límites de Atterberg, sin embargo si queremos determinar la posición relativa del grupo, es necesario introducir el concepto de índice de grupo, expresado como un número entero con un valor comprendido entre 0 y 20 en función del porcentaje de suelo que pasa a través del tamiz N° 200. El índice de grupo se expresa mediante la siguiente formula:

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005x(LL - 40)) + 0.01x(F - 15)x(IP - 10)$$

Donde:

IG = Índice de grupo

F = Porcentaje del suelo que pasa por el tamiz N° 200, expresado como número entero

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

Tabla 11: Clasificación de los suelos según AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^A La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

^B El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

4.2. Ensayos Mecánicos:

4.2.1. Ensayo Proctor modificado (MTC E 116-ASTM D1557)

El ensayo Proctor modificado realizado en laboratorio permite determinar la relación entre el contenido de agua y el peso unitario seco de los suelos compactados en moldes en capas con dimensiones establecidas con un pisón de 10 lbf que cae desde una altura de 457 mm ya establecidas produciendo una energía de compactación de 2700 kN-m/m³. El equipo y procedimiento son los mismos que los propuestos por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos en 1945.

A través de este ensayo es posible determinar la densidad seca máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, a una energía de compactación determinada.

Este ensayo se aplica sólo para suelos que tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de 3/4" (19,0 mm). Para los suelos con mayor al 30% que se retienen en el tamiz de 3/4" se realizará con el método de prueba estándar para corrección de unidad de peso y contenido de agua para suelos que contiene partículas de sobre tamaños (ASTM 4718). Se han proporcionado 3 métodos alternativos, el método A, B y C. Para el caso del método A y B se usaran un molde de diámetro de 4 pulgadas donde se compactará en 5 capas realizando 5 golpes con el martillo o pisón. Para el caso del método C, se tendrá que usar un molde de 6 pulgadas de diámetro compactándolo en 5 capas con 56 golpes. En la figura 3.6 se

muestran las herramientas para la ejecución del ensayo.

Figura 13: Equipo usado para el ensayo Proctor modificado

El ensayo Proctor modificado se realizó de acuerdo con la norma del ensayo MTC E 115 del manual de ensayo de materiales del Ministerio de Transporte y Comunicaciones

4.2.2. Ensayo CBR (MTC 249-ASTM D1883)

Este ensayo es uno de los más difundidos y relativamente simple que permiten conocer la resistencia del suelo, mayormente usado para el diseño de pavimentos evaluando la resistencia potencial en subrasantes, subbases y bases. Este ensayo se realiza sobre un suelo preparado en condiciones de humedad y densidad aunque también puede realizarse sobre muestras inalteradas obtenidas del terreno. En la figura 12 se muestran las herramientas y equipos necesarios para la ejecución del ensayo. El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0,1” o 0,2” de penetración, expresada en porcentaje en su respectivo valor estándar:

$$CBR = \frac{\text{Resistencia a la penetración (Psi) requerida para penetrar 0,1 pulg}}{1000 \text{ lb/pulg}^2} \times 100$$

Este ensayo se realiza luego de un periodo de inmersión en agua de 96 horas debido a que la condición saturada es la más desfavorable. Para la obtención del valor de CBR en subrasantes se realizará de acuerdo con la norma MTC E 132 del manual de ensayo de materiales del MTC y se

clasificará según la categoría pertenece de acuerdo con la Tabla Categoría de subrasantes del manual de ensayos.

Figura 14: Equipo usado para el ensayo CBR

4.2.3. Compresión no confinada (MTC E 121-ASTM D2166):

Este ensayo puede realizarse en muestras inalteradas o remoldeadas en probetas de suelo de forma cilíndrica aplicando una carga axial. Permite una rápida obtención aproximada de la resistencia a la compresión de suelos que poseen valores de cohesión altos para ser ensayos sin confinamiento. El ensayo consiste en colocar una probeta en un aparato de compresión pudiendo realizarse mediante control de deformación o por resistencia controlada. Las probetas de suelos remoldeadas, se forma en un tubo metálico cilíndrico hueco (como se muestra en la figura 13) donde la relación de sus dimensiones de diámetro con respecto a la altura del espécimen debe ser igual o mayor a 2. Para poder obtener la densidad deseada con un contenido de humedad establecido. El suelo es compactado con las herramientas que son mostradas en la figura 13.

Figura 15: Herramientas para ensayo de resistencia a la compresión no confinada

La resistencia a la compresión no confinada que se toma en el ensayo es la máxima carga que ha resistido el espécimen o la carga para el 20% de deformación, según lo que ocurra primero. El ensayo a la compresión no confinada se realizó de acuerdo con la norma del ensayo MTC E 121 del manual de ensayo de materiales del Ministerio de Transporte y Comunicaciones.

4.3.1. Análisis de materia orgánica:

El objetivo de este ensayo es determinar el contenido de materia orgánica, fácilmente oxidadas en muestras de suelos. La materia orgánica es una mezcla heterogénea de sustancias de origen vegetal, animal y microbiano que, dentro del suelo, influyen sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas. Este ensayo se basa en el método de Walkley y Black, método que utiliza dicromato de potasio el cual se va reduciendo debido a la materia orgánica presente en el suelo (se

produce la oxidación de dicromato de potasio en medio de ácido sulfúrico). Una consideración previa para este ensayo es confirmar que no existan sales de cloro ya que pueden ser la fuente de errores, si existiera se deberá eliminar las sales solubles. En la tabla 13 se muestra los niveles de materia orgánica que está planteado en el manual de suelos y pavimentos para la estabilización de suelos con cal:

Tabla 12: Nivel de Contenido de materia orgánica

Nivel de Contenido	Porcentaje de masa orgánica
Factible	0-3 %
No Factible	Más de 3 %

Nota: Niveles aceptables en un suelo con contenido orgánico

5. RESULTADOS:

El programa experimental considera realizar ensayos en el suelo de prueba tomada como Subrasante en estado natural y luego con la adición de la ceniza de cáscara de arroz y ceniza de bagazo de caña de azúcar.

5.1. Materiales Investigados

Los materiales empleados en la presente investigación son: suelo natural (arcilla), ceniza de cáscara de arroz, ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal. De la misma manera la combinación de estos materiales en distintas proporciones porcentuales.

5.1.1. Suelo Arcilloso:

El suelo arcilloso se trajo desde el departamento de San Martín y se extrajo del terreno natural. Se obtuvieron 40kg para ser llevados a los laboratorios de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicada (UPC). En estos laboratorios se realizaron ensayos para determinar las diversas propiedades físicas y químicas que serán documentadas a continuación:

Figura 16: Recepción de Arcilla

Fuente: Elaboración Propia

a) Contenido de humedad ASTM C566:

Se procedió a pesar el recipiente metálico limpio y seco (y su tapa si será usada), posteriormente se colocó la muestra húmeda entre 1950gr. a 2000gr. aproximadamente en el recipiente y se pesó. Luego se colocó el recipiente con la

muestra en la estufa de secado T °150 C a 16 horas. Posteriormente se esperó el enfriamiento del recipiente para que sea manejable y registró su peso.

Tabla 13: Contenido de Humedad de suelo arcilloso

Contenido de humedad	Estrato		
Datos (gr)	1	2	3
Recipiente + Muestra Hum	1950.3	1500.6	1650.8
Recipiente + Muestra Sec	1140	900.8	980.3
Peso de Recipiente	198.5	198.5	198.5
Peso de muestra seca	941.5	702.3	781.8
Peso de agua	810.3	599.8	670.5
Contenido de humedad	86.06	85.41	85.76
Promedio	85.74		

Fuente: Elaboración Propia

b) Análisis Granulométrico:

Se utilizó 75 gr. de suelo luego pasamos por la malla N°4 y a este material se lavó con el tamiz N°200, con abundante agua teniendo mucho cuidado de que no se pierda ninguna partícula de las retenidas en él, luego lo retenido se secó en la hornilla a una temperatura de 110 °C por un periodo de 30 minutos.

Se procedió a pesar los tamices de la serie N° 4, 10, 20, 40, 60, 140,200 y luego se tamizó.

Tabla 14: Análisis Granulométrico de suelo arcilloso

Análisis granulométrico por tamices, vía húmeda, ASTM-D-422											
Porcentaje acumulativo que pasa en peso											
1 1/2"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°10	N°20	N°40	N°60	N°100	N°200
					100.00	99.83	99.43	98.30	93.85	83.74	66.65

Fuente: Elaboración Propia

Figura 17: Curva Granulométrica de suelo arcilloso

Fuente: Elaboración Propia

Figura 16: Material arcilloso a ser tamizado.

Fuente: Propia

Figura 17: Material humectado

Fuente: Propia

Figura 18: Material lavado por malla N° 200

Fuente: Propia

Figura 19: Secado de suelo arcilloso

Fuente: Propia

c) Limite Liquido:

Se obtuvo 200 gr. de material por cuarteo pasante el tamiz N°40, y se pesó, se colocó una porción de la muestra en la copa de la cuchara Casagrande utilizando una espátula; hasta una profundidad de aproximadamente 10 mm. Utilizando el acanalador, se dividió la muestra haciendo una ranura a través del suelo sobre el borde de la copa. Se levantó y soltó la copa girando el manubrio hasta que las dos mitades de suelo estén en contacto en la base de la ranura una longitud de 13 mm. Se registró el número de golpes, N, necesario para cerrar la ranura. Se tomó una muestra de suelo de aproximadamente de ancho de la espátula, se colocó en un recipiente de peso conocido y llevó a la estufa por 16 horas.

Figura 20: Formación de la masa para la copa de casa grande

Fuente: Propia

Figura 18: Ensayo de Copa de Casagrande

Fuente Elaboración Propia

Figura 21: Masa ensayada en la copa de Casagrande

Fuente: Propia

Tabla 14: Ensayo Límite Líquido de suelo arcilloso

Límite Líquido			
Prueba N°	1	2	3
Tara N°	93	81	87
Número de golpes	33	29	20
Peso de la tara	13.98	13.68	13.7
Peso tara + muestra húmeda	23.45	31.11	29.43
Peso tara + muestra seca	21.58	27.52	25.66
Peso del agua	1.87	3.59	3.77
Peso del suelo seco	7.6	13.84	11.96
Contenido de humedad	24.61	25.94	31.52

Fuente: Elaboración Propia

Figura 19: Curva Granulométrica de suelo arcilloso

Fuente: Elaboración Propia

d) Limite Plástico:

Se tomó 20 g de la muestra de suelo pesada que pase la malla N° 40 y se amasó con agua destilada hasta que pueda formarse con facilidad una esfera. Se tomó una porción de 2 g de dicha esfera como muestra para el ensayo. Se moldeó y se rodó con los dedos de la mano sobre una superficie lisa. La porción obtenida se colocó en un depósito tarado y pesó, luego se procedió a colocarlo en la estufa de secado T 150° por 16 horas y pesó. El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Tabla 15: Ensayo Límite Plástico de suelo arcilloso

Límite Plástico		
Prueba N°	1	2
Tara N°	A 10	A 8
Peso de la tara	13.68	13.76
Peso tara + muestra húmeda	21.73	21.13
Peso tara + muestra seca	20.38	19.92
Peso del agua	1.35	1.21
Peso del suelo seco	6.7	6.16
Contenido de humedad	20.15	19.64

Fuente: Elaboración Propia

e) Clasificación SUCS ASTM D - 2487:

La clasificación de suelos más usada desde el punto de vista de mecánica de suelos es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual se asignó un símbolo para cada uno de los tipos de suelo, ya sean orgánicos o inorgánicos. Sus principales parámetros de clasificación fueron: el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y el tamaño de partículas (granulometría). Los cuales describen el comportamiento mecánico del suelo.

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
Límite Líquido ASTM-D-4318	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	
30.69	18.75	11.94	CL
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.			

Figura 22: Resultados de Límites de consistencia y clasificación SUCS

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación determinada en el laboratorio después de haber enviado la muestra arrojó que se clasificaba como un suelo CL, esto se entiende como una arcilla inorgánica con plasticidad baja a media.

Del mismo modo los límites de consistencia obtenidos de nuestra muestra de

estudio fueron 30.69% de límite líquido, 18.75% de límite plástico y 11.94% como índice de plasticidad

f) Proctor Modificado ASTM D - 1557:

Se utilizó un molde cilíndrico de 2.3 litros de capacidad y se rellenó con 5 capas de material debidamente compactadas mediante una maza estandarizada de 4.535 kg o 10 lb que se deja caer libremente una altura de 457 mm.

Previamente se realizó un tamizado del material en la malla de 20 mm de diámetro según ASTM y posteriormente humedecido con distintos valores de humedad, una por cada muestra necesaria.

Para la compactación de cada capa de material se emplearon 26 golpes del pisón distribuidos homogéneamente sobre la superficie del recipiente. Se buscó, que las 5 capas de la muestra posean la misma altura.

Una vez compactado el material, se enrazó el molde y se midió la densidad y humedad de una muestra tomada del centro del molde.

Figura 23: Curva de densidad Proctor modificado

Fuente: Elaboración propia

Para poder obtener el O.C.H. se utilizó los porcentajes de humedad 12.2%, 13.6%, 16.1% y 17.8%. Con estos valores se pudo obtener las siguientes densidades: 1.685 para el primer porcentaje, 1.782 para el segundo, 1.783 para el tercero y 1.688 para el último. Estos valores expresados en gramos por centímetros cúbicos (gr/cm³).

Los valores arrojados por este ensayo muestran que la máxima densidad seca es 1.802 gr/cm³. De igual forma el porcentaje óptimo de humedad es de 14.92%. Esta prueba se realizó al suelo arcilloso en estado natural sin ningún tipo de adición de agregados

g) Ensayo CBR ASTM – D – 1883

Se procedió a tomar la muestra de suelo arcilloso y se puso en condiciones de inmersión por 4 días (96 horas), con la finalidad de que la muestra esté en su condición de mayor saturación. Esto se hace siguiendo las recomendaciones del Manual de Ensayo de Materiales del MTC con base en el método original del Cuerpo de ingenieros de E.U.A. Adicionalmente, se confina en el molde con la sobrecarga del peso del pavimento correspondiente. Para poder obtener las curvas Cargas – Penetración, se utilizaron 12, 25 y 56 golpes para obtener la energía correspondiente.

Figura 24: Curva Carga – Penetración

Fuente: Elaboración Propia

Esta curva nos permite compara la carga unitaria en libras por pulgada cuadrada (lbs/pulg²) mediante los 3 ensayos y su respectiva corrección.

Figura 25: Curva de densidad – CBR

Fuente: Elaboración propia.

Los datos resultado obtenidos a través de este ensayo se pueden describir como el CBR al 95% de la Máxima Densidad Seca es 13.50% con 0.1” de penetración, de igual manera el CBR al 100% de la Máxima Densidad Seca es 31.50% con 0.1” de penetración. Estos resultados serán comparados posteriormente con la mezcla de suelo arcilloso + RHA + SCBA. De esta forma se podrá obtener una comparativa porcentual de cuanto es que será la variación debido a la adición de los agregados antes mencionados.

Numero Golpes	C.B.R. 0.1" Penetración	C.B.R. 0.2" Penetración	Expansión %
12	9.30	11.33	1.15
25	20.50	27.00	0.75
56	31.50	40.60	0.48

Figura 26: Porcentaje de expansión del Suelo arcillo

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura anterior podemos observar el porcentaje de expansión y CBR tanto con 0.1” y 0.2”. En esta se tiene la máxima expansión de 1.15% con 12 golpes y la mínima expansión con 56 golpes nos entrega un valor de 0.48%.

5.1.2. Ceniza de Bagazo de caña de azúcar (SCBA):

La ceniza de Bagazo de caña de azúcar se obtuvo de igual manera que el suelo arcilloso del departamento de San Martín. El bagazo de caña de azúcar se quemó a una temperatura aproximada de 700 °C en un horno artesanal en la ciudad de Tarapoto.

Para este agregado se realizaron los siguientes ensayos:

a) Análisis Granulométrico:

Se utilizó 75 gr. de suelo luego pasamos por la malla N°4 y a este material se lavó con el tamiz N°200, con abundante agua teniendo mucho cuidado de que no se pierda ninguna partícula de las retenidas en él, luego lo retenido se secó en la hornilla a una temperatura de 110 °C por un periodo de 30 minutos.

Se procedió a pesar los tamices de la serie N° 4, 8, 10, 16, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 140,200 y luego se tamizó.

Tabla 16: Análisis Granulométrico SCBA

Tamiz	Abertura	Peso Muestra	Retenido	Peso Retenido		
				Parcial %	Acumulado %	Que pasa %
N° 4	4.75	521.5	9.4	1.8	1.8	98.2
N°8	2.36	512.1	36.6	7.0	8.8	91.18
N 10°	2	475.5	10.6	2.0	10.9	89.15
N°16	1.19	464.9	37.8	7.2	18.1	81.90
N°20	0.84	427.1	49.1	9.4	27.5	72.48
N°30	0.595	378	89.2	17.1	44.6	55.38
N°40	0.42	288.8	141.2	27.1	71.7	28.30
N°50	0.297	147.6	64.5	12.4	84.1	15.93
N°60	0.25	83.1	50.8	9.7	93.8	6.19
N°80	0.177	32.3	24.5	4.7	98.5	1.50
N°100	0.149	7.8	4.6	0.9	99.4	0.61
N°140	0.106	3.2	1.9	0.4	99.8	0.25
N°200	0.075	1.3	1.1	0.2	100.0	0.04
<N°200		0.2	0.2	0.0	100.0	0.00
Suma				100.0		

Fuente: Elaboración Propia

Figura 27: Curva Granulométrica de SCBA

Fuente: Elaboración Propia

b) Limite Liquido:

La SCBA no presentó limite líquido ni plástico debido a que su composición imposibilita que se forme una masa que luego sería colocada en la copa de Casagrande y nos permitiría realizar el procedimiento respectivo. Igualmente se pudo observar que la ceniza posee una gran capacidad de absorción superior a la de la arcilla o del agregado llamado RHA.

Figura 28: SCBA humedecido

Fuente: Propia.

5.1.3. Ceniza de cascarilla de arroz (RHA):

La ceniza de cascarilla de arroz se consiguió en la provincia de Nuevo Chimbote, esta fue obtenida luego del proceso de quema de la cascarilla de arroz producto de la cosecha del mismo producto. Este proceso se realizó durante 12 horas en quemaal aire libre para su posterior enfriado y almacenamiento en condiciones ambientales. Del mismo modo se realizaron ensayos para determinar sus diversas propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Figura 19: Recepción de RHA

Fuente: Propia

a) Análisis Granulométrico ASTM D422:

Se utilizó 521.5 gr. de RHA luego pasamos por la malla N°4 hasta la malla N° 200. Del mismo modo se buscó que el material pase de forma natural los tamices sin forzarlo y así lograr una medición más exacta. El procedimiento tardó aproximadamente 15min ya que el material era muy sensible al movimiento. Del mismo modo se encontró que la mayor cantidad de material se acumuló en el

tamiz N° 50. Se procedió a pesar los tamices de la serie N° 4, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 140, 200 y luego se tamizó.

Tabla 17: Análisis Granulométrico de RHA

Tamiz	Abertura	Peso Muestra	Retenido	Peso Retenido		
				Parcial %	Acumulado %	Que pasa %
N° 4	4.75	50.3	0	0.0	0.0	100.0
N°16	1.19	49	1.3	2.6	2.6	97.4
N°20	0.84	43	6	11.9	14.5	85.5
N°30	0.595	36.2	6.8	13.5	28.0	72.0
N°40	0.42	32.9	3.3	6.6	34.6	65.4
N°50	0.297	24.8	8.1	16.1	50.7	49.3
N°60	0.25	19.5	5.3	10.5	61.2	38.8
N°80	0.177	13	6.5	12.9	74.2	25.8
N°100	0.149	9.1	4.1	8.2	82.3	17.7
N°140	0.106	5.3	3.6	7.2	89.5	10.5
N°200	0.075	1.5	3.8	7.6	97.0	3.0
<N°200		0	1.5	3.0	100.0	0.0
Suma				100		

Fuente: Elaboración Propia

Figura 29: Curva Granulométrica de RHA

Fuente: Elaboración Propia

Figura 30: Tamizado de RHA

Fuente: Propia

b) Limite Liquido

Este agregado demostró no tener límite líquido debido a sus propiedades que fueron incapaces de formar una masa o macilla para lograr su colocación en la copa de Casagrande. Del mismo modo se observó la impresionante capacidad del material para absorber agua y no quedar en un estado plástico. Finalmente, el material quedó en un estado arenoso con presencia visual de vacíos.

Figura 31: RHA humectado para pruebas de Limite Líquido

Fuente: Propia

c) Limite plástico

De la misma forma que el ensayo anterior se observó que la RHA no presenta limite plástico debido a su consistencia. A su vez tiende a formar un material arenoso que no permitió que pueda ser elaborado en forma cilíndrica, para luego ser pasado por la estufa y su posterior pesado.

Figura 32: Humectación del RHA.

Fuente: Propia

5.1.4. Mezcla de suelo arcilloso con RHA y SCBA.

Para poder realizar este ensayo se mezcló el suelo arcilloso con una adición de 5% de ceniza de cascarilla de arroz y 5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar. Del mismo modo se realizaron ensayos con porcentajes de 7.5% de reemplazo parcial y de 10% de reemplazo parcial de cada agregado (RHA y SCBA). Estas mezclas se realizaron los laboratorios de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Se mezcló la muestra por alrededor de 20 minutos dentro de un trompo de mezcla de concreto para obtener una correcta distribución de ambos agregados.

Figura 33: Suelos arcilloso mezclado con RHA + SCBA

Fuente: Propia.

Figura 34: Muestra de suelo arcilloso lavada con RHA + SCBA

a) Análisis Granulométrico:

Se utilizó 75 gr. de suelo mezclado con RHA y SCBA luego pasamos por la malla N°4 y a este material se lavó con el tamiz N°200, con abundante agua teniendo mucho cuidado de que no se pierda ninguna partícula de las retenidas en él, luego lo retenido se secó en la hornilla a una temperatura de 110 °C por un periodo de 30 minutos.

Se procedió a pesar los tamices de la serie N° 4, 10, 20, 40, 60, 140,200 y luego se tamizó.

Análisis granulométrico por tamices, vía húmeda, ASTM-D-422											
Porcentaje acumulativo que pasa en peso											
1 1/2"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°10	N°20	N°40	N°60	N°100	N°200
					100.00	99.83	99.31	98.15	93.34	83.49	67.90
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.											

Figura 35: Resultados de análisis granulométrico reemplazo 5%

Fuente: Elaboración propia.

Análisis granulométrico por tamices, vía húmeda, ASTM-D-422											
Porcentaje acumulativo que pasa en peso											
1 1/2"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°10	N°20	N°40	N°60	N°100	N°200
					100.00	99.90	99.17	96.94	91.91	83.10	64.85
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.											

Figura 36: Resultados de análisis granulométrico reemplazo 7.5%

Fuente: Elaboración propia.

Análisis granulométrico por tamices, vía húmeda, ASTM-D-422											
Porcentaje acumulativo que pasa en peso											
1 1/2"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°10	N°20	N°40	N°60	N°100	N°200
					100.00	99.80	98.86	96.32	91.08	82.50	66.52
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.											

Figura 37: Resultados de análisis granulométrico reemplazo 10%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 38: Curva Granulométrica de suelo arcilloso + 5% RHA + 5% SCBA

Fuente: Elaboración propia.

Figura 39: Curva Granulométrica de suelo arcilloso + 7.5% RHA + 7.5% SCBA.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 40: Curva Granulométrica de suelo arcilloso + 10% RHA + 10% SCBA.

Fuente: Elaboración propia.

b) Limite Líquido:

Se obtuvo 200 gr. de material por cuarteo pasante el tamiz N°40, y se pesó, se colocó una porción de la muestra en la copa de la cuchara Casagrande utilizando una espátula; hasta una profundidad de aproximadamente 10 mm. Utilizando el acanalador, se dividió la muestra haciendo una ranura a través del suelo sobre el borde de la copa. Se levantó y soltó la copa girando el manubrio hasta que las dos mitades de suelo estén en contacto en la base de la ranura una longitud de 13 mm. Se registró el número de golpes, N, necesario para cerrar la ranura. Se tomó una muestra de suelo de aproximadamente de ancho de la espátula, se colocó en un recipiente de peso conocido y llevó a la estufa por 16 horas.

Figura 41: Humectación del suelo arcilloso + RHA + SCBA.

Fuente: Propia.

Figura 42: Prueba en copa Casagrande de suelo arcilloso + RHA + SCBA

Fuente: Elaboración propia.

c) Límite Plástico:

Se tomó 20 g de la muestra de suelo pesada que pase la malla N° 40 y se amasó con agua destilada hasta que pueda formarse con facilidad una esfera. Se tomó una porción de 2 g de dicha esfera como muestra para el ensayo. Se moldeó y se rodó con los dedos de la mano sobre una superficie lisa. La porción obtenida se colocó en un depósito tarado y pesó, luego se procedió a colocarlo en la estufa de secado T 150° por 16 horas y pesó. El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
Límite Líquido ASTM-D-4318	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	
35.10	24.48	10.62	
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.			

Figura 43: Resultados de Limites de consistencia de suelo arcilloso + 5% RHA + 5% SCBA.

Fuente: Elaboración Propia

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	
34.59	27.76	6.83	
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.			

Figura 44: Resultados de Limites de consistencia de suelo arcilloso + 7.5% RHA + 7.5% SCBA.

Fuente: Elaboración Propia

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	
34.10	27.87	6.23	ML
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.			

Figura 45: Resultados de Limites de consistencia de suelo arcilloso + 10% RHA + 10% SCBA.

Fuente: Elaboración Propia

d) Clasificación SUCS ASTM D – 2487:

La clasificación de suelos más usada desde el punto de vista de mecánica de suelos es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual se asignó un símbolo para cada uno de los tipos de suelo, ya sean orgánicos o inorgánicos. Sus principales parámetros de clasificación fueron: el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y el tamaño de partículas (granulometría). Los cuales describen el comportamiento mecánico del suelo.

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
Límite Líquido ASTM-D-4318	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	
35.10	24.48	10.62	
			ML

Figura 46: Resultados de límites de consistencia y de clasificación SUCS mezcla con 5% de reemplazo.

Fuente: Propia

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
Límite Líquido ASTM-D-4318	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	
34.59	27.76	6.83	
			ML
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.			

Figura 47: Resultados de límites de consistencia y de clasificación SUCS mezcla con 7.5% de reemplazo.

Fuente: Propia

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
Límite Líquido ASTM-D-4318	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	
34.10	27.87	6.23	
			ML
Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.			

Figura 48: Resultados de límites de consistencia y de clasificación SUCS mezcla con 10% de reemplazo.

Fuente: Propia

e) Proctor Modificado ASTM D – 1557:

Se procedió a tomar la muestra de suelo arcilloso y se puso en condiciones de inmersión por 4 días (96 horas), con la finalidad de que la muestra esté en su condición de mayor saturación. Esto se hace siguiendo las recomendaciones del Manual de Ensayo de Materiales del MTC con base en el método original del

Cuerpo de ingenieros de E.U.A. Adicionalmente, se confina en el molde con la sobrecarga del peso del pavimento correspondiente. Para poder obtener las curvas Cargas – Penetración, se utilizaron 12, 25 y 56 golpes para obtener la energía correspondiente.

Figura 49: Curva de densidad suelo arcilloso + 5% RHA + 5% SCBA

Fuente: Elaboración propia.

Para poder obtener el O.C.H. se utilizó los porcentajes de humedad 9.8%, 10.6%, 13.8% y 15.7%. Con estos valores se pudo obtener las siguientes densidades: 1.730 para el primer porcentaje, 1.830 para el segundo, 1.832 para el tercero y 1.734 para el último. Estos valores expresados en gramos por centímetros cúbicos (gr/cm³).

Los valores arrojados por este ensayo muestran que la máxima densidad seca es 1.849 gr/cm³. De igual forma el porcentaje óptimo de humedad es de 12.78%. Esta prueba se realizó al suelo arcilloso en estado natural sin ningún tipo de adición de agregados.

Figura 50: Curva de densidad suelo arcilloso + 7.5% RHA + 7.5% SCBA

Fuente: Elaboración propia.

Figura 51: Curva de densidad suelo arcilloso + 10% RHA + 10% SCBA

Fuente: Elaboración propia.

f) Ensayo C.B.R. ASTM D – 1883:

Se procedió a tomar la muestra de suelo arcilloso y se puso en condiciones de inmersión por 4 días (96 horas), con la finalidad de que la muestra esté en su condición de mayor saturación. Esto se hace siguiendo las recomendaciones del Manual de Ensayo de Materiales del MTC con base en el método original del Cuerpo de ingenieros de E.U.A. Adicionalmente, se confina en el molde con la sobrecarga del peso del pavimento correspondiente. Para poder obtener las curvas Cargas – Penetración, se utilizaron 12, 25 y 56 golpes para obtener la energía correspondiente.

Figura 52: Curva Carga - Penetración Suelo arcilloso + 5% RHA + 5% SCBA

Fuente: Elaboración Propia

Esta curva nos permite compara la carga unitaria en libras por pulgada cuadrada (lbs/pulg²) mediante los 3 ensayos y su respectiva corrección.

Figura 53: Curva de densidad – CBR Suelo Arcilloso + 5% RHA + 5% SCBA

Fuente: Elaboración propia.

Los datos resultado obtenidos a través de este ensayo se pueden describir como el CBR al 95% de la Máxima Densidad Seca es 33.75% con 0.1” de penetración, de igual manera el CBR al 100% de la Máxima Densidad Seca es 57.50% con 0.1” de penetración. Estos resultados al ser comparados posteriormente los del suelo arcilloso son ampliamente superiores, la comparativa final será explicada en el capítulo de conclusiones de esta tesis.

Numero Golpes	C.B.R. 0.1" Penetración	C.B.R. 0.2" Penetración	Expansión %
12	26.20	24.00	1.02
25	39.00	37.53	0.65
56	57.50	53.80	0.35

Figura 54: Porcentaje de expansión del Suelo arcillo + 5% RHA +5% SCBA.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura anterior podemos observar el porcentaje de expansión y CBR tanto con 0.1” y 0.2”. En esta se tiene la máxima expansión de 1.02% con 12 golpes y

la mínima expansión con 56 golpes nos entrega un valor de 0.35%. Estos porcentajes de expansión son inferiores a comparación del suelo sin ningún tipo de adición, es decir, el suelo arcilloso debido al aporte ampliamente significativo, tanto del RHA y del SCBA.

Figura 55: Curva Carga - Penetración Suelo arcilloso + 7.5% RHA + 7.5% SCBA.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 56: Curva de densidad – CBR Suelo Arcilloso + 7.5% RHA + 7.5% SCBA

Fuente: Elaboración Propia.

Numero Golpes	C.B.R. 0.1" Penetración	C.B.R. 0.2" Penetración	Expansión %
12	15.00	13.80	0.92
25	22.70	23.87	0.70
56	35.70	38.13	0.51

Figura 57: Porcentaje de expansión del Suelo arcillo + 7.5% RHA + 7.5% SCBA.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 58: Curva Carga - Penetración Suelo arcilloso + 10% RHA + 10% SCBA.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 59: Curva de densidad – CBR Suelo Arcilloso + 10% RHA + 10% SCBA

Elaboración Propia.

Numero Golpes	C.B.R. 0.1" Penetración	C.B.R. 0.2" Penetración	Expansión %
12	15.00	13.80	0.92
25	22.70	23.87	0.70
56	35.70	38.13	0.51

Figura 60: Porcentaje de expansión del Suelo arcillo + 10% RHA +10% SCBA.

5.1.5. Estudio de Impacto ambiental:

Estos desechos representan en gran medida agentes contaminantes ya que se pudo observar que aproximadamente solo el 5% de la ceniza de cáscara de arroz es usada como combustible en los hornos ladrilleros, esto es compatible con la investigación de Villegas en su estudio “Utilización de Puzolanas Naturales en la Elaboración de Prefabricados con Base Cementicia Destinados a la Construcción de Viviendas de Bajo Costo”.

Del mismo modo la quema de biomasa importa al medio ambiente hidrocarburos, CO₂ y N₂O. Estos representan gases de efecto invernadero que influyen directamente en la contaminación del planeta y cambio climático.

Adicionalmente puede producirse lluvia acida y esta a su vez, la muerte de cultivos y plantaciones cercanas a la zona en cuestión de donde se obtienen estos agregados. (Cerón, 2012).

Figura 61: Cascarilla de arroz en proceso de quema

Fuente: Castro 2017

Mediante el uso de estos agregados se plantea la reducción de estos desechos que emanan los gases y compuestos ya anteriormente mencionados en las siguientes cantidades: Aproximadamente 500kg de ceniza de cáscara de arroz (RHA) y 532kg de ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) por kilómetro de carretera considerando una subrasante de 1m de espesor. Por adición, se espera que a gran escala se reduzca el 75% de ocupación en volumen de estos desechos; esto debido a que, al no ser utilizados, son arrojados a los ríos, bosques, mar y lagos ya que su uso no se representa como productivo más que para estudios e investigaciones similares a esta tesis. Finalmente es correcto afirmar puesto a que, la utilización de RHA y SCBA podría convertirse en un potencial estabilizador primario para suelos arcillosos de baja plasticidad (CL), podría establecerse un mercado que permita su amplia comercialización y de una forma u otra se reduzca su presencia en el medio ambiente como agente que ocupa espacios sin fin alguno.

En pocas palabras se puede resumir este breve estudio con los componentes que

desprende durante todo el proceso de obtención de RHA y SCBA para su posible o no utilización. Estos son: Nitrógeno (N), Carbono (C), Hidrógeno (H), y Azufre (S).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS:

6. CONCLUSIONES:

- Las características de compactación mostraron una disminución del contenido de humedad óptimo y un aumento de la densidad seca máxima con el aumento del porcentaje de contenido de cenizas de cascarilla de arroz y bagazo de caña de azúcar debido a la influencia de estos.
- Con base en documentos utilizados en esta investigación (Castro, 2017) se puede asumir que la ceniza de cáscara de arroz presenta aproximadamente 95% de sílice cristalina por lo que se deduce que el material ha sido combustionado a altas temperaturas. El alto contenido de sílice en las cenizas es potencialmente un material puzolánico.
- La adición de las cenizas de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar inhiben el carácter expansivo del suelo ya que el porcentaje de expansión se reduce conforme se añaden las cenizas de RHA y SCBA
- El valor del CBR aumenta para la combinación planteada en 20 unidades de CBR, por el contrario, la expansión se ve reducida hasta en un 30%. Este resultado se logró con un contenido del 5% de ceniza de cascara de arroz y 5% de ceniza de bagazo de azúcar.
- Cada 1000 kg de cada agregado obtenemos 90 kg y 40 kg de ceniza de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar respectivamente. Las subrasantes en suelos similares no disminuyen de 1 metro de espesor del

estrato, lo que significa al menos la utilización de 500 kg y 450 kg de cada agregado aproximadamente. La construcción con nuestra propuesta genera un impacto ambiental positivo que retiraría toneladas de estos desechos del ambiente.

- Los resultados obtenidos durante esta investigación mostraron que el suelo estabilizado con ceniza de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar trae cambios favorables que hacen posible usar el material a nivel subrasante. Debido a su alto porcentaje de sílice presente que los convierte en potenciales agentes estabilizadores primarios o secundarios.
- La propuesta genera una posible solución a un problema ambiental de la disposición de estos desechos orgánicos que generaría disminución de rellenos sanitarios, disminución de contaminación de suelos y ríos, enfermedades respiratorias, entre otros.

7. RECOMENDACIONES:

- Es importante que el material RHA y SCBA se solicite con anticipación ya que no se encuentra en la ciudad y debe ser pedido de provincia.
- Se debe continuar las investigaciones con agregados que son desechos orgánicos ya que son en gran parte rentables y fáciles de conseguir.
- Sería muy pertinente que las cenizas se laven correctamente antes de su respectiva quema, de esta manera se podría evitar que otras impurezas como restos de otros desechos, interfieran en la pureza de la mezcla.
- Es recomendable que se realicen las pruebas de compactación con un periodo superior a las 96 horas de inmersión del material para observar si

la reacción puzolánica a diferentes tiempos influye en los resultados.

- Sería importante que se compruebe si es que el origen de procedencia del material que se va a adicionar influye en el comportamiento estabilizador. Para esto se tendría que utilizar RHA y SCBA de las diferentes regiones del país; sierra, selva y costa.
- Es de vital importancia que se busque convenios con los diferentes laboratorios para solventar los ensayos. Esto principalmente porque los laboratorios de nuestra alma mater no cuenta con diversos equipos que nos permitan realizar los ensayos y estos a su vez, son costosos si se buscan realizar de forma privada.
- De igual manera, se debe profundizar en otros estudios que nos permitan predecir el tiempo de vida de nuestra mezcla respecto a un suelo arcilloso sin las adiciones de RHA y SCBA.
- Se podría aplicar esta mejora de estabilización en suelos que no vayan a ser utilizados netamente en carreteras. Al fin y al cabo, el resultado de estabilizar el suelo, resulto positivo y se obtuvo mejoras significativas en los niveles de compactación.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- Schlangen, E.; Joseph, C. Self-Healing Processes in Concrete. In Self-Healing Materials; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA:Weinheim, Germany, 2009; pp. 141–182.
- Sukontasukkul, P., and Chaikaew, C., (2006) “Properties of Concrete Pedestrian Block Mixed with Crumb Rubber,” Construction and Building Materials, V. 20, No. 7, pp. 450-457.
- Wiktor, V.; Jonkers, H.M. (2011) Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cem. Concr. Compos., 33, 763–770.

- Wang, J.Y.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Verstraete, W. (2012) Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Constr. Build. Mater.*, 26, 532–540.
- Castro, Axel (2017) Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Delgado López, Carol Ashlly; Mendoza Meléndez, Ivette Anamile (2018) Influencia del porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar activada alcalinamente sobre la tensión efectiva en suelos susceptibles a licuación. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Cerón Silva, Silvana Andrea (2012) uso eficiente de la cascarilla del arroz mediante la implantación de un sistema de comercialización orientado al sector público y privado en el cantón de Babahoyo. (Tesis de Grado) Universidad Técnica de Babahoyo, Babahoyo, Ecuador.
- Yang, Z.X.; Hollar, J.; He, X.D.; Shi, X.M. (2011) A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *Cem. Concr. Compos.* 33, 506–512.
- E.A. Basha, R. Hashim, H.B. Mahmud, A.S. Muntohar (2005), Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement, *Constr. Build. Mater.* 19 448–453.
- M. Chittaranjan, M. Vijay, D. Keerthi (2011), Agricultural wastes as soil stabilizers, in: *Int. J. Earth Sci. Eng.* 4 (6) 50–51.
- R.G. Kiran, L. Kiran (2013), Analysis of strength characteristics of Black cotton soil using Bagasse ash and additives as stabilizer, in: *Int. J. Eng. Res. Technol.* 7 2240–2246.

- F. Hernández-Olivares, G. Barluenga, (2004) Fire performance of recycled rubberfilled high-strength concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 109–117.
- D. Flores (2014). Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concrete, *Mater. Struct.* 47 1185–1193
- M.C. Bignozzi, F. Sandrolini, (2006) Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.* 36 735–739.
- Xinxin Li, Xu Qing, Shenghong Chen, (2016) An experimental and numerical study water permeability of concrete, *Constr. Build. Mater.* 105 503–510.
- Osama Youssf, Julie E. Mills, Reza Hassanli, (2016) Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete, *Constr. Build. Mater.* 125 175–183.
- Welling Gary Edward (2012) “Engineering Performance Of Polymer Amended Soils”. Professional Thesis. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California, EE. UU.
- Villegas Martínez, Carlos Alberto (2012) “Utilización de Puzolanas Naturales en la Elaboración de Prefabricados con Base Cementicia Destinados a la Construcción de Viviendas de Bajo Costo”. Tesis profesional. UNI-FIC. Lima, Perú.
- Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A., & Rushing, J. F. (2007) “Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington, EE. UU.

9. ANEXOS:

RESULTADOS DE LABORATORIO

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACION : Dpto. San Martín
CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA : Arcilla
FECHA : ABR. 2019

Análisis granulométrico por tamices, vía húmeda, ASTM-D-422

1 1/2"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	Porcentaje acumulativo que pasa en peso					N°20	N°40	N°60	N°100	N°200
					N°4	N°10	N°20	N°40	N°60					
					100.00	99.83	99.43	98.30	93.85	83.74	66.65			

Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.

EyP de Ingeniería S.R.L.

 César A. Vilca Ghazal
 Ingeniero Civil
 C.I.P. 6314

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PUENTES
MANUEL ZONGALEZ DE LA ROSA 05 LIMA 17 - PERU ☎ 441 8978 TE FAX 461 5553
E-mail: eyp@ingenieriayp.com y eyp@ingenieriayp.com.pe

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ASTM-D-422

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos

UBICACIÓN : Dpto. San Martín

CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ

FECHA : ABR.2019

Límites de Consistencia %

LL	LP	LC	IP
30.69	18.75		18.94

Clasificación de suelos

9UCS
CL

RESULTADOS DE LABORATORIO

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos

UBICACION : Dpto. San Martín

CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ

MUESTRA : Arcilla

FECHA : ABR.2019

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS
Límite Líquido ASTM-D-4318	Límite Plástico de Plasticidad	Índice de Plasticidad	
30.69	18.75	11.94	CL

Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.

EyP de Ingeniería S.R.L.

César A. Aca Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314

DE INGENIERIA S.R.L.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS

MANUEL GONZALES DE LA ROSA 435 □ LIMA 17 - PERU □ 461-5253

E mail: eypldeingenieria@yahoo.com / eypldeingenieria@kennedy.com.pe

PROYECTO	: Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACION	: Dpto. San Martín
CLIENTE	: JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA	: Arcilla + RHA + SCBA
FECHA	: ABR.2019

	1	1 1/2"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°10	N°20	N°40	N°60	N°100	N°200
Análisis granulométrico por tamices, vía húmeda, ASTM-D-422													
Porcentaje acumulativo que pasa en peso													
								100.00	99.83	99.31	98.15	83.34	67.90

Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.

EYP de Ingeniería S.R.L.

César A. Vilca Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314

DE INGENIERIA S.R.L.
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS
MANUEL GONZALES DE LA ROSA 405 D LIMA 17 - PERU ☎ 441 8979 TELEFAX: 461 1233
E-mail: eyp@ingenieriaey.com / eyp@ingenieriaey.com

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ASTM-D-422

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos

UBICACIÓN : Dpto. San Martín

CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ

FECHA : ABR.2019

Límites de Consistencia %

LL	LP	LC	IP
35.10	24.48		10.62

Clasificación de suelos

SUCS : ML

RESULTADOS DE LABORATORIO

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos

UBICACION : Dpto. San Martín

CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ

MUESTRA : Arcilla + RHA + SCBA

FECHA : ABR.2019

Límites de Consistencia %			Clasificación de suelos SUCS
Límite Líquido ASTM-D-4318	Límite Plástico de Plasticidad	Índice de Plasticidad	
35.10	24.48	10.62	ML

Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.

EyP de Ingeniería S.R.L.

César A. Vilca Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314

DE INGENIERIA S.R.L.

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS

MANUEL GONZALES DE LA ROSA 435 □ LIMA 17 - PERU □ 461-5253

E-mail: eydeingenieria@yahoo.com / eypdoingenieria@speedy.com.pe

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACIÓN : Dpto. San Martín
CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA : Arcilla
FECHA : ABR.2019

ENSAYO C.B.R. ASTM-D-1883

CURVAS CARGAS-PENETRACION CURVAS CORREGIDAS

Numero Golpes	C.B.R. 0.1" Penetración	C.B.R. 0.2" Penetración	Expansión %
12	9.30	11.33	1.15
25	20.50	27.00	0.75
56	31.50	40.60	0.48

EyP de Ingeniería S.R.L.

César A. Ycaza Ghezzi
 Ingeniero Civil
 C.I.P. 6314

DE INGENIERIA S.R.L.
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS
MANUEL GONZALES DE LA ROSA 415 LIMA 17 - PERU ☎ 461 8918 TELEFAX 461 5253
E-mail: eyppdeingenieria@yahoo.com / eyppdeingenieria@eyppde.com.pe

ENSAYO C.B.R. ASTM-D-1883

PROYECTO
UBICACIÓN
CLIENTE
MUESTRA
FECHA

: Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
: Dpto. San Martín
: JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
: Arcilla
: ABR.2019

PROCTOR MODIFICADO CURVA DENSIDAD - HUMEDAD

M.D.S. = 1.802 gr/cm³

O.C.H. = 14.92%

C.B.R. CURVA DENSIDAD - C.B.R.

C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 13.50%
C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 31.50%

EyP de Ingeniería S.R.L.

César A. Vilca Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos

UBICACIÓN : Dpto. San Martín

CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ

MUESTRA : Arcilla + RHA + SCBA

FECHA : ABR.2019

ENSAYO C.B.R.
ASTM-D-1883

CURVAS CARGAS-PENETRACION
CURVAS CORREGIDAS

Numero Golpes	C.B.R. 0.1" Penetración	C.B.R. 0.2" Penetración	Expansión %
12	26.20	24.00	1.02
25	39.00	37.53	0.65
56	57.50	53.80	0.35

EyP de Ingeniería S.R.L.

César A. Vilga Ghezzi
 Ingeniero Civil
 CIP 2314

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS
MANUEL GONZALES DE LA ROSA 425 □ LIMA 17 - PERU □ 461 8919 TELEFAX: 461 5253
E-mail: eydingeneria@yahoo.com / eydingeneria@speedy.com.pe

ENSAYO C.B.R. ASTM-D-1883

PROYECTO
UBICACIÓN
CLIENTE
MUESTRA
FECHA

: Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
: Dpto. San Martín
: JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
: Arcilla + RHA + SCBA
: ABR. 2019

PROCTOR MODIFICADO CURVA DENSIDAD - HUMEDAD

C.B.R. CURVA DENSIDAD - C.B.R.

Eyp de Ingeniería S.R.L.

M.D.S. = 1.849 gr/cm³

O.C.H. = 12.78%

César A. Vica Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314

C.B.R. al 98% de la M.D.S. = 33.75%
C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 57.50%

0.1" de penetración
0.1" de penetración

PROYECTO	:	Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACION	:	Dpto. San Martín
CLIENTE	:	JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA	:	A
FECHA	:	JUN.2019

Análisis granulométrico por tamices, vía húmeda, ASTM-D-422

Porcentaje acumulativo que pasa en peso											
1 1/2"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	Nº4	Nº10	Nº20	Nº40	Nº60	Nº100	Nº200
					100.00	99.80	98.86	96.32	91.08	82.50	66.52

Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.

EyP de Ingeniería S.R.L.

César A. Vilca Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314

DE INGENIERIA S.R.L.
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS
MANUEL GONZALES DE LA ROSA 435 □ LIMA 17 □ PERU □ ☎ 461 8283
E-mail: eypdeingenieria@yahoo.com / eypdeingenieria@speedy.com.pe

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ASTM-D-422

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos

UBICACIÓN : Dpto. San Martín

CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ

FECHA : JUN/2019

Límites de Consistencia %

LL	LP	LC	IP
34.10	27.87		6.23

Clasificación de suelos
SUCS
ML

Muestra
A

Gráfico
—●—
—●—
—●—
—●—

PROYECTO	:	Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACION	:	Dpto. San Martín
CLIENTE	:	JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA	:	A
FECHA	:	JUN 2019

Límites de Consistencia %		Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
Límite Líquido	Límite Plástico de Plasticidad ASTM-D-4318	
34.10	27.87	ML

Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.

Exp de Ingeniería S.R.L.

César A. Vilca Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 5314

DE INGENIERIA S.R.L.
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS
MANUEL GONZALES DE LA ROSA 435 □ LIMA 17 - PERU □ 461 5253
E-mail: eypdeingenieria@yahoo.com / eypdeingenieria@apsodo.com.pe

PROYECTO : Adición de cascara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACIÓN : Dpto. San Martín
CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA : A
FECHA : JUN.2019

ENSAYO C.B.R.
ASTM-D-1883

CURVAS CARGAS-PENETRACION
CURVAS CORREGIDAS

Numero Golpes	C.B.R. 0.1" Penetración	C.B.R. 0.2" Penetración	Expansión %
12	11.40	9.33	0.95
25	22.80	23.93	0.70
56	39.50	44.13	0.59

EyP de Ingeniería S.R.L.

César A. Vilca Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314

EYP DE INGENIERIA S.R.L.
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS
MANUEL GONZALES DE LA ROSA 431 □ LIMA 17 - PERU □ 461 5253
E-mail: eypingenieria@yahoo.com / eyp-ingenieria@speedy.com.pe

ENSAYO C.B.R. ASTM-D-1883

PROYECTO
UBICACIÓN
CLIENTE
MUESTRA
FECHA

: Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
: Dpto. San Martín
: JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
: A
: JUN. 2019

PROCTOR MODIFICADO CURVA DENSIDAD - HUMEDAD

M.D.S. = 1.695 g/cm³

O.C.H. = 18.20%

C.B.R. CURVA DENSIDAD - C.B.R.

C.B.R. al 99% de la M.D.S. = 18.90%
C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 39.50%

0.1" de penetración
0.1" de penetración

EYP de Ingeniería S.R.L.

César A. Vilca Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314

PROYECTO	:	Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACION	:	Dpto. San Martín
CLIENTE	:	JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA	:	B
FECHA	:	JUN.2019

Análisis granulométrico por tamices, vía húmeda, ASTM-D-422

Porcentaje acumulativo que pasa en peso													
	1 1/2"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°10	N°20	N°40	N°60	N°100	N°200	
							100.00	99.90	99.17	96.94	91.91	83.10	64.85

Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.

EYP de Ingeniería S.R.L.

César A. Viza Ghezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 5314

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ASTM-D-422

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos

UBICACIÓN : Dpto. San Martín

CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RUIREZ

FECHA : JUN. 2019

Muestra : B

Gráfico : A

Límites de Consistencia %

LL	LP	LC	IP
34.59	27.76		6.83

Clasificación de suelos SUCS : ML

RESULTADOS DE LABORATORIO

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACION : Dpto. San Martín
CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA : B
FECHA : JUN.2019

Límite Líquido ASTM-D-4318	Límites de Consistencia %		Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
	Límite Plástico ASTM-D-4318	Índice de Plasticidad	
34.59	27.76	6.83	ML

Muestra enviada a nuestro laboratorio para su procesamiento.

EyP de Ingeniería S.R.L.

 César Viquez Ghezzi
 Ingeniero Civil
 C.I.P. 6314

DE INGENIERIA S.R.L.

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS

MANUEL GONZÁLEZ DE LA ROSA 425 □ LIMA 17 - PERÚ □ T 461-5253

✉ manueldelarosadela@speedy.com.pe / sundelingenieria@speedy.com.pe

PROYECTO : Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
UBICACIÓN : Dpto. San Martín
CLIENTE : JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
MUESTRA : B
FECHA : JUN.2019

ENSAYO C.B.R.
ASTM-D-1883

CURVAS CARGAS-PENETRACION
CURVAS CORREGIDAS

Numero Golpes	C.B.R. 0.1" Penetración	C.B.R. 0.2" Penetración	Expansión %
12	15.00	13.80	0.92
25	22.70	23.87	0.70
56	35.70	38.13	0.51

EyP de Ingenieria S.R.L.

[Signature]
 César A. Vilca Ghezzi
 Ingeniero Civil
 C.I.P. 6314

DE INGENIERIA S.R.L.
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS
MANUEL COLLALES DE LA ROSA 435 D LIMA 17 - PERU ☎ 461 5253
E-mail: eypingenieria@yahoo.com / eypingenieria@speedy.com.pe

ENSAYO C.B.R. ASTM-D-1883

PROYECTO
UBICACIÓN
CLIENTE
MUESTRA
FECHA

: Adición de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar en la subrasante de pavimentos para la estabilización de suelos arcillosos
: Dpto. San Martín
: JOSE SAAVEDRA SALAZAR Y FERNANDO HIDALGO RAMIREZ
: B
: JUN.2019

PROCTOR MODIFICADO CURVA DENSIDAD - HUMEDAD

M.D.S. = 1.700 g/cm³

O.C.H. = 16.39%

C.B.R. CURVA DENSIDAD - C.B.R.

C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 19.73%
C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 35.70%

EyP de Ingeniería S.R.L.

César A. Yfca Chvezzi
Ingeniero Civil
C.I.P. 6314