

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La duración y el funcionamiento de un proyecto de construcción dependen en una mayor parte de la estructura de sus suelos de fundación.

Los suelos que presentan materiales inestables llegan a crear inconvenientes significativos en cualquier tipo de estructura, principalmente en obras viales, donde afecta a su fundación que en este tipo de obras es llamada subrasante.

Para un mejoramiento de dichos materiales que conforman la subrasante se emplean tratamientos físicos o químicos, por intermedio de aditivos, brindando una mejora en sus propiedades mecánicas, permitiendo emplear dichos suelos para la construcción de estructuras de pavimentos.

El mejoramiento de suelos, se considera un método apropiado para el desarrollo de obras viales como lo son los pavimentos tanto rígidos como flexibles. Esto, debido a que proporcionan mejores condiciones del suelo de fundación y mejora la resistencia de los mismos.

Los materiales obtenidos en canteras y ríos utilizables en las construcciones, disminuyen su influencia gracias al uso de aditivos, optimizando los costos del desarrollo de obra, y obteniendo un impacto ambiental menor.

En la actualidad se tiene la metodología del reciclado de residuos, más propiamente las que generan las fábricas e industrias, este método se aplica para que se evite o aminore la contaminación en nuestro medio, de esta forma en esta investigación se pretende comparar el comportamiento de un suelo arcilloso con aditivos reciclados como lo son el vidrio y el ladrillo, determinando los efectos que tienen en un tipo de suelo arcilloso mediante ensayos de laboratorio hasta determinar el CBR de laboratorio, el cual es un parámetro muy importante para evaluar la calidad de una subrasante y así establecer cuál de estos aditivos es el mejor en cuanto a mejoras y costos.

1.2. Referencias de trabajos realizados

Angela Viviana Pérez Rojas, Magister en ingeniería ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia con la investigación “Uso de triturado del ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración de concreto”, tuvo la conclusión siguiente: El uso de agregado triturado de ladrillo reciclado en la elaboración de concreto ofrece una solución prometedora para el problema de los residuos de ladrillo provenientes de defectuosa fabricación, construcciones nuevas o demoliciones. Según los resultados de esta investigación, este concreto reciclado puede ser utilizado como cualquier otro concreto convencional, siempre y cuando el porcentaje de agregado triturado de ladrillo reciclado no exceda el 9-10%. Siempre que se desee emplear concreto elaborado con agregado triturado de ladrillo como sustituto parcial del agregado natural es necesario realizar los análisis respectivos debido a que las propiedades del ladrillo varían según la calidad y origen.¹

Karina Alina Poma Castillo, estudiante de ingeniería civil de la Universidad San Pedro del Perú con la tesis “Estabilización de suelos con polvo de vidrio reciclado”, resume lo siguiente:

Tanto la Costa, Sierra y Selva, encontraron el suelo arcilloso, cuyo físico - química propiedades son mucho más complejas y poco entendidas por la comunidad científica. El desarrollo de obras civiles, como carreteras, diques, presas, presenta grandes dificultades cuando se trata de suelo de arcilla, por lo general optan por pedir la sustitución de materiales. Otra alternativa que no implique el uso de préstamo de materiales, ya que es un recurso agotable es la estabilización natural de los suelos con los procesos físicos y / o químicos. En este proyecto, se evalúa el efecto sobre la densidad en seco máxima y la resistencia al corte de un suelo cuando se añade 0%, 5%, 7%, 10%, de polvo de vidrio reciclado con mejores propiedades mecánicas, que se refleja no sólo en el índice de densidad máxima en seco, resistencia al corte y la plasticidad, sino también en la trabajabilidad, la permeabilidad y la estabilidad de volumen. Los datos obtenidos se registraron en tablas para comparar los tratamientos y gráficas para controlar las tendencias de las propiedades evaluadas, por lo que podemos seleccionar el porcentaje óptimo de polvo de vidrio, proporcionado mejores condiciones de trabajabilidad del suelo estudiadas.²

¹ Pérez Rojas, Angela Viviana, (2012), *Uso de triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración del concreto*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Facultad de Ingeniería - Servicio Nacional de Aprendizaje, Colombia.

² Poma Castillo, Alina Karina, (2016), *Estabilización de suelos con polvo de vidrio reciclado*, Universidad San Pedro Facultad Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil, Perú.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación técnica

En nuestro medio se tiene mucha presencia de industrias cerámicas las cuales producen perdidas, remarcando el ladrillo de 6 huecos que es el que tiene mayor demanda, los cuales en el proceso de apilado o traslado, pueden sufrir caídas y provocar rajaduras o roturas, y de esta manera ya no pueden ser comercializados y entonces son trasladados al basurero u otras veces son depositados en barrancos que son utilizados como depósitos de escombros. Para evitar estos escenarios se optó por el reciclado de estos materiales, que además de un costo bajo de obtención son de fácil traslado como cualquier material en vehículos de acarreo, y además que se las puede preparar en las empresas de chancado de nuestra ciudad, para luego aplicarlas al suelo que necesitara un mejoramiento en sus propiedades.

Otro material reciclable es el vidrio, que se pudo evidenciar personalmente el gran desecho que se produce en las vidrierías de nuestro departamento, esto se ocasiona al momento de cortar el vidrio para obtener medidas exactas de ventanas, ventanales, puertas y demás elementos, los cuales dejan un gran desperdicio y son desechados en cajas para su posterior recolección por la empresa de aseo, de esta manera también se consideró este material para ser utilizado como aditivo ya que se puede reciclar de la misma forma que el ladrillo, solo que con mayor cuidado ya que es un material cortopunzante que puede causar daños a la integridad física, pero con el cuidado necesario se puede utilizar este material de la mejor forma posible para el mejoramiento de un suelo en sus propiedades.

1.3.2. Justificación ambiental

El reciclado de los materiales como el ladrillo y el vidrio que son obtenidos del desperdicio que generan las industrias que producen las mismas, sería de gran ayuda para evitar un impacto ambiental negativo, ya que estos escombros que se generan tanto en su fabricación como en la construcción, mayormente son depositados en lotes baldíos, barrancos o canteras, que se encuentran en los barrios alejados de la ciudad o el campo, donde luego con el tiempo se convierten en basurales y focos de contaminación y afectan negativamente al medio ambiente. Para minimizar esta situación se puede dar un nuevo uso a estos materiales y ser reciclados para emplearse como aditivos en suelos arcillosos y lograr un mejoramiento de sus propiedades.

1.3.3. Justificación económica

Para la obras civiles en general, el aspecto económico es un tema fundamental de discusión para llegar a la ejecución de las mismas, refiriéndonos a la construcción de carreteras, donde se tiene el problema de que la fundación no es la adecuada para realizar dicha obra, entonces se opta por una solución a este problema como el mejoramiento de este suelo con aditivos como el cemento, cal, y otros, que puede ser un poco caro desde la compra del mismo, ya que estos materiales no son siendo considerados ser reciclados, más bien se considera que deben ser materiales nuevos para su aplicación, así que buscando una alternativa que pueda ser más barata y competir con estos, nos encontramos con el campo del reciclado, que es una manera muy económica de darle otro uso a un material que no pudo cumplir con su principal función y además cuidamos del medio ambiente, de esta manera elegimos el vidrio y el ladrillo, los cuales contamos con industrias en nuestro medio y por experiencia propia se puede constatar que tienen pérdidas y desechos generados día a día, que simplemente son depositados en el vertedero de nuestra ciudad o en otros casos en barrancos o depósitos que tienen estas industrias, que pueden generar un daño al medio ambiente. De esta forma se puede obtener estos materiales por un costo bajo y le daremos un nuevo uso que en este caso es el mejoramiento de suelos utilizando estos materiales como aditivos.

1.3.4. Aporte académico

El presente trabajo se basa en la estabilización de suelos que tenemos en el manual de ensayos y materiales de la ABC, que pertenece a nuestro país. En este manual tenemos las estabilizaciones de suelo-cemento y suelo-cal, los cuales nos muestra que en nuestro medio solo tenemos normadas estos 2 tipos de estabilizaciones, las cuales son utilizadas para mejorar las propiedades de un suelo que no llegue a cumplir ciertas condiciones para su utilización, entonces lo que se pretende es que con esta investigación, se pueda encontrar otra alternativa de estabilización o mejoramiento de suelo, y además se pretende dar a conocer la importancia del reciclado de los materiales como lo son el vidrio y el ladrillo y darles un nuevo uso, además aplicarlo en nuestra rama de la ingeniería civil, y dar a conocer los efectos que tienen estos materiales en los suelos arcillosos de nuestro medio y posteriormente compáralos para establecer un material que sea factible de uso para mejorar una subrasante.

1.4. Planteamiento del problema

1.4.1. Situación problemática

En el mundo se tiene un gran problema con la contaminación que producen los desechos de las industrias, y esto ocurre en cualquier parte del mundo. En nuestro medio se tiene las industrias cerámicas y las industrias que producen vidrio para puertas, ventanas y demás elementos que se usan en una construcción, y dichas industrias presentan grandes desechos que si bien ya existe un reciclado en nuestro medio de forma indirecta de estos materiales, no se tiene contemplado una reutilización de los mismos especialmente para la construcción, es por esto que para tener en cuenta un uso específicamente para obras viales, se requiere observar los efectos que puedan tener estos materiales en combinación con el suelo, y así observar si se podría llegar a utilizar estos materiales de forma que aumente las propiedades mecánicas de un suelo que se utilice como subrasante, entonces en esta investigación se realizara una comparación de estos materiales como lo son el vidrio y el ladrillo los cuales serán alterados y se tomara un solo tamaño de partícula, para utilizarlos como aditivos en un tipo de suelo arcilloso para observar si existe un mejoramiento de sus propiedades del suelo estudiado.

Puede que ocurra que la adición de estos materiales, tanto el vidrio molido como el ladrillo triturado, no llegue a causar ningún efecto sobre el suelo o quizás tenga un aumento pequeño que no llegue a mejorar en gran medida nuestro suelo, esto nos quiere decir que estos materiales no son factibles de uso ya que no se tendrá un aumento significativo en sus propiedades para que se pueda aplicar en una subrasante.

Para la aplicación de estos materiales se tendrá en cuenta lo mencionado anteriormente en investigaciones que se recomienda utilizar porcentajes hasta el 9 o 10% de adición porque a partir de este punto, la calidad y el origen de los materiales reciclados van a repercutir en nuestros resultados, entonces tomaremos en cuenta 3 porcentajes en los cuales se pueda evaluar dichos efectos y llegar hasta el ensayo de CBR tanto para vidrio molido y ladrillo triturado, es así que para este trabajo tomaremos los porcentajes de 3%,6% y 9%, para luego realizar las comparaciones correspondientes y se podrá llegar a la conclusión de cuál es el mejor material para mejorar el suelo tanto en resistencia que ofrece cada aditivo, factibilidad y también en costo de ejecución.

1.4.2. Delimitación temporal

Este trabajo de investigación se realiza en tiempo presente ya que se quiere dar a conocer si el ladrillo triturado y el vidrio molido adicionados a un suelo arcilloso, tienen efectos positivos, negativos o nulos y compáralos para establecer cual aditivo es mejor en tanto a mejoras, costos y factibilidad.

1.4.3. Delimitación espacial

Se obtendrán muestras de suelo arcilloso de la ciudad de Tarija más propiamente del barrio Miraflores, que es una ubicación conocida por tener suelos con un gran contenido de arcilla y luego de haber recogido las muestras se trasladara al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho para realizar las pruebas de laboratorio correspondientes.

1.4.4. Formulación del problema

¿Cuáles son los efectos que tiene la adición del vidrio molido y el ladrillo triturado en un tipo de suelo arcilloso?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Comparar los efectos del vidrio molido contra el ladrillo triturado, considerando una combinación como aditivos, de tal manera que pueda establecer las ventajas y desventajas técnicas de su comportamiento.

1.5.2. Objetivos específicos

- Clasificar el suelo arcilloso mediante el sistema de clasificación SUCS.
- Realizar la molienda tanto del vidrio como del ladrillo controlando los diámetros de partículas para tener una igualdad entre los aditivos.
- Determinar los límites líquido y plástico de nuestro suelo en estado natural y combinado con los aditivos.
- Establecer el porcentaje de humedad óptima y la densidad máxima.
- Obtener el valor del CBR en el suelo arcilloso.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Identificación de variables

Tipo causal/explicativo:

“El CBR de suelo arcilloso combinado con vidrio molido, es mayor que el CBR del mismo suelo combinado con ladrillo triturado”

1.6.2. Variable independiente

X_1 = % vidrio molido

X_2 = % ladrillo triturado

1.6.3. Variable dependiente

Y_1 = Valor del CBR

1.6.4. Conceptualización y operacionabilidad de variables.

Tabla 1. Variable independiente

Variable dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Porcentajes de aditivos	Adicionar cantidad de vidrio molido respecto a la masa de suelo	Muestra de suelo	Gramos (gr)	Preparación de muestras y previos ensayos según normas
		Vidrio molido	Porcentaje de adición (%)	Se calculan porcentajes respecto a la cantidad de masa de suelo, 3 valores, estos mismos porcentajes para el ladrillo triturado
	Adicionar cantidad de ladrillo triturado respecto a la masa de suelo	Ladrillo triturado	Porcentaje de adición (%)	Se calculan porcentajes respecto a la cantidad de masa de suelo, 3 valores, estos mismos porcentajes para el vidrio triturado

Fuente. Elaboración propia

Tabla 2. Variable dependiente

Variable dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Valor del CBR	Comparar los valores de CBR obtenidos para mezcla suelo-vidrio molido, y suelo-ladrillo triturado en los mismos porcentajes de adición	Humedad óptima	Porcentaje (%)	Encontrar mediante ensayo Proctor modificado
		Densidad máxima	(gr/cm ³)	Encontrar mediante curva de ensayo de Proctor modificado
		Ensayo CBR	(kg/cm ²)	Realizar el ensayo de CBR en la prensa hidráulica
		Comparación de resultados	Conclusiones	Obtener las comparaciones de los ensayos realizados en cada una de las muestras

Fuente. Elaboración propia

1.7. Alcance de la investigación

La investigación presenta dos variables manipulables, como lo son el ladrillo triturado y vidrio molido, ambos expresados en porcentaje, el mismo que es definido por el investigador.

Presenta una variable dependiente (CBR), que motivada por las variables independientes cambian su valor en tal sentido se trata de una investigación con alcance “causal/explicativo”, con diseño experimental en la categoría cuasiexperimento.

Para cumplir con los objetivos propuestos y que posteriormente este trabajo sirva como un documento de consulta para los interesados en esta temática que trata generalmente sobre el reciclado de aditivos para su uso en un mejoramiento de suelos, se debe obtener primeramente la caracterización de un suelo arcilloso que será de baja plasticidad que tiene mayor presencia en nuestro medio, y además de su valor de CBR en estado natural, posteriormente de la misma manera obtenerlos combinando este suelo con los aditivos de ladrillo triturado y vidrio molido para obtener los resultados con los mismos y realizar una posterior comparación entre estos.

CAPÍTULO II

EL VIDRIO Y EL LADRILLO

UTILIZADOS COMO ADITIVOS

CAPÍTULO II

EL VIDRIO Y EL LADRILLO UTILIZADOS COMO ADITIVOS

2.1. Suelos arcillosos

En mecánica de suelos se define como arcilla a las partículas de cualquier sustancia inorgánica menores a 0,02 mm, tamaño para el cual empiezan a tener influencia las acciones fisicoquímicas. Los terrenos arcillosos son en principio, los más peligrosos para cimentar. En ellos se pueden producir grandes asentamientos en un largo o aun larguísimo plazo de tiempo, y es en los que el conocimiento de su comportamiento bajo cargas ha progresado más en los últimos años.³

2.1.1. Arcillas

Las arcillas son partículas muy finas y forman barro cuando están saturadas de agua. Los suelos arcillosos son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes. Son fértiles, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos.⁴

2.1.2. Suelos expansivos

Los suelos expansivos son un tipo de arcilla que tienen la propiedad de incorporar moléculas de agua y generan cambios volumétricos de su estado natural del suelo de cimentación. Dichos suelos pueden dividirse en dos categorías:

- Depósitos arcillosos, de origen residual, altamente reactivos a los cambios de humedad; presentan expansión bajo saturación, y contracción en ambiente seco.³
- Depósitos arcillosos no saturados, de origen eólico cuyos grumos alcanzan el tamaño de los limos. Son susceptibles de expansión bajo humedecimiento y de asentamientos bajo carga y saturación.³

2.1.3. Comportamiento de suelos expansivos

- Contracción de las arcillas debido al secado.
- Expansión de las arcillas al humedecerse.
- Disminución de su resistencia al corte y de sus capacidades de soporte al expandirse.³

³ Jiménez Salas, José Antonio, (1954), *Mecánica de suelos y sus aplicaciones a la ingeniería*, Dossat, España.

⁴ Lambe, William, (2012), *Mecánica de suelos*, Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores, México.

2.1.4. Causas de la expansión

- Inundación localizada.
- Elevación capilar del agua proveniente de un nivel freático.
- Periodos concentrados de alta precipitación combinados con drenajes deficientes.
- Variación del contenido de humedad de las arcillas por construcción de una estructura sobre ella.³

2.1.5. Problemas de expansión o contracción

- El problema más grave en este tipo de suelos ocurre en las construcciones ligeras, pavimentos, taludes, etc. que no se estudian a fondo.
- Problemas causados por suelos expansivos es por asentamientos y levantamientos.
- Es importante que el ingeniero civil disponga de criterios inmediatos sencillos, simples y económicos para detectar la presencia de este tipo de suelos.³

2.1.6. Daños en suelos expansivos

- Hinchamiento del suelo bajo el edificio por aumento de humedad (no existe evaporación).
- Retracción periférica del terreno (construido en poca humedad).
- Variación de volumen debido a modificaciones del nivel freático (por bombeo, drenajes, etc.)
- Escasa profundidad de fundación (dentro de zona activa).
- Hinchamientos por eliminación de árboles.
- Rotura de tuberías de agua.
- Defectos de drenajes periféricos.³

2.1.7. Soluciones para fundaciones en suelos expansivos

- Alterar el suelo, por ejemplo, agregando limos, cales, u otras mezclas que reducirían o eliminarían la contracción o expansión.
- Control de expansión, permitiendo que el suelo se expanda dentro de las cavidades de la cimentación, los movimientos de una cimentación pueden ser reducidos a un nivel tolerable, para el control de la humedad debe ser excavado a la misma o similar

³ Jiménez Salas, José Antonio, (1954), *Mecánica de suelos y sus aplicaciones a la ingeniería*, Dossat, España.

⁴ Lambe, William, (2012), *Mecánica de suelos*, Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores, México.

profundidad que el peso del suelo contrarreste el levantamiento del mismo, se pondrá un material plástico sobre toda la superficie de la excavación.

- Ignorar el levantamiento, acomodando zapatas a una suficiente profundidad y/o levantamiento del material en la zona de expansión entre la superficie del terreno y la base de la construcción, puede ocurrir hinchamiento sin causar movimientos perjudiciales.³

2.2. Capa de subrasante

Subrasante se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. En la década del 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje.

Desde las postrimerías de la década del 50, se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la subrasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos. Ensayos usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR, que representan mucho mejor lo que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- Propiedades físicas: son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
- Propiedades ingenieriles: dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el módulo resiliente, el módulo de Poisson, el valor soporte del suelo y el módulo de reacción de la subrasante.⁵

2.3. Mejoramiento de suelos

El mejoramiento de suelos es el proceso al que se ven sometidos los suelos naturales arcilloso para mejorar sus cualidades. Las técnicas de mejoramiento de suelos consisten en modificar las características de un suelo por una acción física (vibraciones, por ejemplo) o por la inclusión en el suelo de una la mezcla del suelo con un material más resistente, con el fin de:

⁵ Blog spot, (2022), *Pavimentos*, España, <https://libro-pavimentos.blogspot.com/>

- Aumentar la capacidad y/o la resistencia al corte
- Disminuir los asentamientos, tanto absolutos como diferenciales, y acelerarlos cuando sucedan
- Disminuir o eliminar el riesgo de licuefacción en caso de terremoto o de vibraciones importantes

Los ámbitos de aplicación de las distintas técnicas dependen esencialmente de la naturaleza y la granulometría de los terrenos que se desea mejorar, aumentar su resistencia, reducir su plasticidad, facilitar los trabajos de construcción o aumentar su estabilidad reduciendo problemas en estructuras y pavimentos.⁶

2.3.1. Aplicación a suelos arcillosos utilizando aditivos

Antes de construir una edificación en un terreno, es necesario verificar mediante un estudio de suelos, caracterizando el terreno donde vamos a construir. Muchas veces se adopta generalmente el tipo de fundación de una edificación aledaña próxima. Esa decisión no es del todo segura debido a que el suelo suele cambiar su composición metro a metro. El mejoramiento de un suelo consiste en modificar algunas de sus características indeseables para el propósito de uso que queremos darle a dicho suelo.

El problema se presenta cuando el suelo va a ser empleado para apoyar a una cimentación, ya sea para cimentación de una edificación o bien de un pavimento, las principales características indeseables de una arcilla plástica serán: un índice plástico demasiado alto que significa un alto valor de expansión (o bien su opuesta contracción), así como una capacidad para soportar carga estructural que será demasiado baja. El suelo arcilloso tiene la capacidad de modificar su volumen cuando absorbe o deja de absorber agua produciendo hinchazones sobre el asentamiento de la obra que deriva en ciertas rajaduras que muchas veces pueden visualizarse desde la fachada con grietas horizontales y en un pavimento con grietas verticales.

Existen diferentes formas de tratar de estabilizar un suelo con arcilla plástica. Una de ellas es la de retirar dependiendo la profundidad de captación de las arcillas hasta 2 metros de tierra y reponer el nivel con tierra mejorada.

⁶ Reginatto, A. R. y J. C. Ferrero, (1975), *Potencial de colapso de los suelos y la química del agua*, Revista Internacional de Mecánica de Rocas y Ciencias de la Minería Volumen 12, Rusia.

Este proceso es costoso y muchas veces poco práctico, en especial en obras de pequeña envergadura como es el caso de una vivienda.

La segunda opción que es motivo de explicación es la de desactivar las arcillas expansivas mediante un proceso químico con apagado mediante agua de cal. En primer lugar, se debe aclarar que el emplear la llamada cal viva con dicho propósito, no presenta ventajas y si presenta las concernientes desventajas de su manejo. La cal recomendada para tal fin es la cal hidratada, del tipo más comercial y de calidad más uniforme.⁷

2.4. El vidrio como aditivo

El vidrio es un material de particular interés en las construcciones que requieren de iluminación de día y de aislamiento del exterior sin obstrucción de la vista, típicamente el vidrio se usa en todo tipo de edificios, casas e instalaciones industriales. Es un material muy antiguo, empleado desde épocas remotas para la fabricación de una gran variedad de utensilios, posiblemente se descubrió por accidente o tal vez en un afán por producir artificialmente piedras preciosas.

El vidrio se comporta como un líquido viscoso cuando está fundido y al irse enfriando se endurece tomando la forma que se desee. Una vez endurecido, el vidrio se caracteriza por ser sumamente frágil, sin embargo, puede desarrollar una gran resistencia dependiendo de su composición química.

El vidrio al igual que otros materiales considerados como cerámicas entre los que se encuentra el concreto y la cerámica de barro presentan una resistencia a la tensión considerablemente más baja de lo que pueden lograr a la compresión, por esta razón sus aplicaciones son hasta cierto punto limitadas.⁸

2.4.1. Clasificación del vidrio

Para propósitos generales el vidrio se puede clasificar como vidrio para la fabricación de envase, vidrio para ventanería o vidrio común, vidrio para la fabricación de fibra de vidrio y vidrio para tratamientos vitrificados. De entre estas variedades, el vidrio plano o vidrio común tiene mayor aplicación en la construcción, aunque posiblemente en el futuro pueda ser desplazado por el policarbonato transparente o algún otro plástico semejante.

⁷ Cibao, (2017), *Como estabilizar un suelo arcilloso a la hora de construir*, Cementos Cibao, Republica Dominicana

⁸ Wikipedia, (2022), *Vidrio*, España, <https://es.wikipedia.org/wiki/Vidrio>

El material plástico reforzado con fibra de vidrio empieza a cobrar importancia en la construcción, hasta ahora este material compuesto se ha usado mucho en la fabricación de muebles de baño reemplazando exitosamente a la cerámica de barro, por cierto, no sería nada extraño que con el tiempo los materiales compuestos sustituyan a muchos materiales tradicionales empleados en acabados y fachadas.

Los tratamientos vitrificados se emplean con frecuencia en piezas cerámicas con varios propósitos, ya sea para lograr una superficie impermeable como la que se requiere en los azulejos para baño o en las tejas de barro, o bien para proteger decoraciones y estampados o simplemente por estética.⁹

2.4.2. El vidrio común utilizado como aditivo

El vidrio común (también llamado vidrio de sílice, arena y sosa), es con diferencia el tipo más utilizado para una gran variedad de aplicaciones, como ventanas, envases como botellas de bebidas, alimentos, fármacos y otros muchos artículos. Utensilios de cocina a menudo están hechos con vidrio común templado. Supone aproximadamente el 90% del total del vidrio fabricado. Es relativamente económico, químicamente estable, razonablemente duro, y extremadamente versátil. Debido a que puede ser refundido cuantas veces se desee, es ideal para su reciclado.

Técnicamente se divide en vidrio plano (el usado para ventanas), y en vidrio para envases. Los dos tipos difieren en sus aplicaciones, método de producción (proceso de flotación para ventanas, soplado y moldeado para envases), y composición química. El vidrio plano tiene un contenido más alto de óxido de magnesio y de óxido de sodio que el vidrio de envases, y un contenido menor de sílice, óxido de calcio, y óxido de aluminio. Del contenido más bajo de iones altamente solubles en agua (sodio y magnesio) depende la durabilidad química necesaria para el vidrio de los envases destinados al almacenamiento de bebidas y alimentos y pasta.¹⁰

⁹ Megaglass, (2022), *Tipos de vidrio para la construcción*, México, <https://www.megaglass.com.mx/blog/tipos-de-vidrio-construccion/>

¹⁰ Wikipedia, (2022), *Vidrio*, España, <https://es.wikipedia.org/wiki/Vidrio>

Figura 1. Vidrio común

Fuente. Vitralba.com

2.4.3. Componentes del vidrio

El vidrio común se prepara fundiendo una serie de materias primas muy abundantes, como carbonato de sodio, caliza, dolomita, dióxido de silicio (sílice), óxido de aluminio (alúmina), y cantidades pequeñas de agentes aditivos (por ejemplo, sulfato sódico y cloruro de sodio) en un horno de vidrio con temperaturas localmente de hasta 1675 °C. La temperatura esta solo limitada por la calidad del material del horno y por la composición del vidrio, minerales relativamente económicos como la trona, la arena, y el feldespato son normalmente utilizados en vez de sustancias químicas puras. Las botellas de los colores verde y marrón se obtienen de materias primas que contienen óxido de hierro.¹⁰

2.4.4. Propiedades mecánicas del vidrio

Por lo regular los usos del vidrio plano en la construcción no requieren de él una gran capacidad mecánica, la mayoría de las aplicaciones son estéticas, sin embargo, el vidrio tiene excelentes propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, que puede ser hasta de 12,000 kg/cm², por otro lado, su capacidad a la tensión puede alcanzar los 1,000 kg/cm². La enorme capacidad mecánica del vidrio plano puede verse disminuida considerablemente por las imperfecciones del material o el maltrato en su manejo, por estas razones, frecuentemente se adoptan coeficientes de seguridad conservadores, especialmente en algunas estructuras complejas.

⁹ Megaglass, (2022), *Tipos de vidrio para la construcción*, México, <https://www.megaglass.com.mx/blog/tipos-de-vidrio-construccion/>

¹⁰ Wikipedia, (2022), *Vidrio*, España, <https://es.wikipedia.org/wiki/Vidrio>

El vidrio plano se usa la gran mayoría de las veces montado en marcos de ventanería, por lo que generalmente no recibe cargas directas salvo su propio peso, el efecto del viento y el de sismo en algunas regiones. Sin embargo, se debe evaluar su capacidad a la flexión, así como las deflexiones inducidas según las dimensiones del tablero instalado. La capacidad a la flexión que se puede llegar a tener en el vidrio plano se encuentra alrededor de los 100 kg/cm², su módulo de elasticidad se encuentra alrededor de los 700,000 kg/cm², cifra que es prácticamente el doble de la de un concreto convencional. El vidrio plano una vez instalado en el marco respectivo experimentará cambios volumétricos por temperatura, por lo que es necesario calcular y proveer de holguras adecuadas para absorber las posibles expansiones, esto se hace considerando el coeficiente de expansión térmica cuyo valor puede estar entre 7 y 9 micro deformaciones por grado centígrado. El vidrio es un material frágil pero muy durable y resistente al intemperismo, su dureza según la escala de Mohs, se encuentra entre 4.5 y 7 dependiendo de la composición química. El vidrio tiene un peso específico relativo de 2.5 y se considera un excelente material aislante de la electricidad.¹¹

2.4.5. Vidrio molido utilizado como aditivo

Afortunadamente, hoy en día la sociedad ha tomado conciencia de la importancia del reciclado para el mantenimiento del planeta.

La recuperación, el reciclado, la gestión y el transporte de los residuos son las tareas básicas a las que muchas empresas se están dedicando para aprovechar los recursos y materias primas, cada vez más escasas debido al uso excesivo que se ha hecho de ellas. Una de las materias primas más interesantes a nivel de reciclaje es el vidrio. De hecho, al vidrio molido se le están dando una gran cantidad de nuevos usos y aplicaciones que aún muchas personas desconocen.

Sencillamente, un vidrio molido es un reciclado de una ventana. Pero sus propiedades no provienen principalmente del tamaño de molienda, sino de la identidad del vidrio en sí. Un vidrio es un material sólido, no cristalino, típicamente transparente, amorfo (lo que significa que carece de orden de largo alcance en la fase sólida). El tipo más común de vidrio es el vidrio de soda y el plano. Una fuente a gran escala de vidrio molido proviene de los flujos municipales de residuos reciclaje. El vidrio, típicamente las botellas o trozos de ventana, se recogen y se muelen finamente para su uso procesamiento posterior.

¹¹ Gómez Domínguez, Jorge, (2000), *Materiales de construcción*, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey - Departamento de Ingeniería Civil, México.

La mayoría del vidrio molido se obtiene de vidrio usado y luego se moldea hacia abajo. Esto lo convierte en un recurso más rentable. Sin embargo, hay productos de vidrio molido que proceden de nuevos envases de vidrio o rechazan los envases de vidrio para aplicaciones especializadas. Se estima que más de 200 millones de toneladas de residuos de vidrio se envían anualmente al vertedero. Sin embargo, esto ha cambiado drásticamente en los últimos tiempos debido a muchas aplicaciones únicas que el vidrio puede cumplir.¹²

2.4.6. Usos del vidrio molido

El vidrio molido tiene una gran cantidad de usos y aplicaciones. Para la fabricación de mosaicos y azulejos, para encimeras de cuartos de baño y cocinas, para la fabricación de todo tipo de envases, y para fachadas e interiores.

Con el vidrio reciclado también se pueden crear microesferas para la señalización vial, que actúan como ojos de gatos que proyectan la luz y ofrecen una mayor visibilidad en nuestras carreteras.

Figura 2. Vidrio molido



Fuente. Elaboración propia

El vidrio reciclado también se utiliza en la limpieza de piezas de motores, paredes o para eliminar grafitis a través de microesferas que se proyectan con aire comprimido.

¹² Arcilla y cerámica, (2022), *Uso de polvos de vidrio en entornos industriales: una breve descripción general*, Sudáfrica, <https://mineralmilling.com/es/uso-de-polvo-de-vidrio-en-entornos-industriales/>

Por otro lado, uno de los usos más novedosos que se le da al vidrio reciclado es como filtrador de agua de piscinas. Otras de las aplicaciones que más llama la atención es el vidrio que se recicla en forma de fibra, un excelente aislante térmico y acústico. Por último, hay que hablar del vidrio celular, conocido también como vidrio expandido, un nuevo material de construcción a partir de polvo de vidrio cocido.

Gracias a estas prácticas, no se emiten emisiones a la atmósfera durante su proceso de fabricación y se reduce el consumo energético y de agua hasta en un 25%.

Durante el proceso de reciclado del vidrio, una vez que se ha limpiado y se ha separado por colores teniendo en cuenta las botellas de vidrio, llega la fase del triturado, en la que se obtiene lo que se conoce como calcín. Posteriormente, el vidrio triturado se criba para eliminar las piezas con tamaños superiores al permitido; y, después, se almacena y se limpia para eliminar los restos de plásticos y etiquetas de papel si es el caso de botellas de vidrio.

Y, con ese vidrio machacado, ¿qué podemos hacer? Lo más evidente es mezclarlo con otras materias primas para fabricar más vidrio. Muchas empresas mezclan este vidrio triturado con otros elementos, como la cal, arena y ceniza, para rebajar la temperatura de los hornos de fusión y, de esta manera, ahorrar energía.

Figura 3. Polvo de vidrio



Fuente. Elaboración propia

¹² Arcilla y cerámica, (2022), *Uso de polvos de vidrio en entornos industriales: una breve descripción general*, Sudáfrica, <https://mineralmilling.com/es/uso-de-polvo-de-vidrio-en-entornos-industriales/>

El vidrio molido también es muy utilizado en la fabricación de materiales para la construcción, como los ladrillos, los azulejos, las tejas y el hormigón ligero espumado (en el que el vidrio sustituye al cemento). También se utiliza mucho en la fabricación del material de pavimentación. Este aspecto es muy importante cuando se construyen carreteras, debido a que el vidrio retiene mucho el calor y, por lo tanto, ayuda a disminuir la profundidad de penetración de las heladas en la estación invernal, lo que ayuda también a secar la calzada, tras la lluvia, más rápidamente.

Otros materiales en los que está presente el vidrio molido y reciclado son la pintura reflectante de las señales de tráfico, los parches de suelo (los cuales mejoran el drenaje del firme y distribuyen la humedad) y la arena artificial (la cual se utiliza para regenerar playas que han sufrido el azote de temporales y tormentas).¹³

2.4.7. Utilidades del vidrio

En resumen:

- El vidrio molido es una fuente primaria de sílice, que resulta ser increíblemente barato, ya que a menudo se obtiene como un producto de desecho y se utiliza ampliamente.
- Ha encontrado uso en la producción de hormigón, reemplazando parte del cemento, a su vez haciendo que la fabricación sea menos perjudicial para el medio ambiente y proporcionando las propiedades mejoradas del hormigón.
- Otros usos incluyen en aplicaciones refractarias (donde su tolerancia a alta temperatura es beneficiosa) en esmaltes, en el aislamiento de edificios, la mejora del suelo y en la fabricación de ladrillos.
- Muchas de sus aplicaciones son notablemente beneficiosas, ya que pueden desviar grandes cantidades de vidrio de los vertederos.¹⁴

¹³Recuperaciones de vidrio norte, (2022), *Los usos y aplicaciones del vidrio molido*, España, <https://recuperacionesdevidrionorte.es/vidrio-molido>

¹⁴ Arcilla y cerámica, (2022), *Uso de polvos de vidrio en entornos industriales: una breve descripción general*, Sudáfrica, <https://mineralmilling.com/es/uso-de-polvo-de-vidrio-en-entornos-industriales/>

Figura 4. Reciclaje del vidrio



Fuente. segtecvitrrio.com

2.4.8. Investigaciones previas suelo - vidrio

Los estudios han demostrado que la introducción de vidrio molido de 75 micras en suelos de tipo arcilla puede aumentar las propiedades de ingeniería del suelo. Por ejemplo, la incorporación de 12 vidrios de soda y cal molidas disminuyó cinco veces los valores de hinchazón, aumentó la capacidad de soporte de california y aumentó su fuerza de compresión. Tal adición podría reducir la necesidad de reforzar fuertemente las capas de carretera o ferrocarril en áreas con suelos de tipo arcilla. La adición de vidrio molido se añade debido a su naturaleza como material sin cohesión, y en un estudio disminuyó la compresibilidad del suelo de tipo arcilla en más de 50. La mejora del suelo mediante la adición de vidrio molido puede evitar daños en el edificio durante los períodos de cambio de temperatura estacional.¹⁵

2.4.9. Reciclaje del vidrio

El vidrio es un material totalmente reciclable y no hay límite en la cantidad de veces que puede ser reprocesado. Al reciclarlo no se pierden las propiedades y se ahorra una cantidad de energía de alrededor del 30 % con respecto al vidrio nuevo.

Para su adecuado reciclaje el vidrio es separado y clasificado según su tipo que por lo común está asociado a su color, una clasificación general es la que divide a los vidrios en tres grupos: verde, ámbar o café y transparente. El proceso de reciclado después de la clasificación del

¹⁵Mata, Alejandro, (2010), *Conocimiento del proceso de reciclaje de envases de vidrio*, Universidad Autónoma de Guadalajara, México.

vidrio requiere que todo material ajeno sea separado como son tapas metálicas y etiquetas, luego el vidrio es triturado y fundido junto con arena, hidróxido de sodio y caliza para fabricar nuevos productos que tendrán idénticas propiedades con respecto al vidrio fabricado directamente de los recursos naturales.

En algunas ciudades del mundo se han implantado programas de reciclaje de vidrio, en ellas pueden encontrarse contenedores especiales para vidrio en lugares públicos.

En ciertos casos el vidrio es reutilizado, antes que reciclado. No se funde, sino que se vuelve a utilizar únicamente lavándolo (en el caso de los recipientes). En acristalamientos, también se puede aprovechar el vidrio cortándolo nuevamente (siempre que se necesite una unidad más pequeña).¹⁵

2.5. Beneficios medioambientales del reciclaje

Evitamos la extracción de nuevas materias primas: el vidrio es un material que puede ser reciclado al 100% y tiene infinitas vidas. Por ello al depositar los envases de vidrio en el contenedor verde evitamos el uso de nuevas materias primas como la arena de sílice, carbonato de sodio y arena caliza. Al reciclar vidrio estamos evitando la degradación del suelo.

Frenamos el crecimiento de los vertederos: separar en casa todo tipo de residuos es vital para preservar el medioambiente. Los contenedores del vidrio fueron uno de los primeros en aparecer en España junto a los de cartón, en las calles de nuestras ciudades. Desde 1998 hemos reciclado 12 millones de toneladas de envases de vidrio en España. Imagínalas. Si pusiéramos los envases de vidrio de pie y en fila, ¡podríamos ir a la Luna y volver 10 veces! Ahora, imagina qué hubiese ocurrido si todo ese vidrio lo hubiéramos depositado en los vertederos.

Ahorramos energía: el uso de calcín (vidrio reciclado) para fabricar nuevos envases permite ahorrar energía. El motivo es que su temperatura de fusión es inferior a la que necesitarían las materias primas como la arena o la caliza. Como ejemplo cotidiano tenemos que, con tan solo reciclando tres envases de vidrio estamos ahorrando la energía que supone cargar tu smartphone durante todo un año.

¹⁵Mata, Alejandro, (2010), *Conocimiento del proceso de reciclaje de envases de vidrio*, Universidad Autónoma de Guadalajara, México.

Evita emisiones de CO₂: Reciclar el vidrio es luchar contra el cambio climático. El vidrio se recicla al 100% y sirve como materia prima para fabricar nuevos envases. Durante este proceso se evitan emisiones de CO₂ a la atmósfera, uno de los principales causantes del calentamiento global.¹⁵

2.6. Productos cerámicos

Los productos cerámicos son piedras artificiales formadas por medio de la cocción de materiales arcillosos previamente tratados. La cerámica se ha empleado desde tiempo muy remotos, y a pesar de que su capacidad al impacto es muy baja, tiene la resistencia y durabilidad necesarias para vencer a materiales como el acero (tiene el problema de la corrosión) en el tiempo, como bien lo demuestran la gran cantidad de piezas arqueológicas que han sobrevivido al través de los siglos. Las piezas cerámicas que se emplean en la construcción son muy variadas y aún tienen mucha demanda, aunque sus usos se han visto restringidos por la presencia del concreto hidráulico y de los productos derivados del cemento (algunos lo consideran como un producto cerámico).¹⁶

2.6.1. Materias primas de fabricación

La arcilla es el ingrediente más importante en la elaboración de los productos cerámicos, en ella se encuentran una gran cantidad de minerales necesarios para el proceso, de entre ellos se destacan la sílice y la alúmina (SiO₂ y Al₂O₃), otros de los minerales importantes son la sílice microcristalina pura y los feldespatos. Para la elaboración de cerámica de alta calidad se emplea el caolín, arcilla blanca pura resultado de la descomposición de los feldespatos de los granitos. Las fuentes de arcilla pueden provenir de bancos de suelos arcillosos, o de rocas constituidas por suelos arcillosos como la lutita. En el primer caso el material es fácil de obtener por métodos convencionales de excavación, disgregación y cernido, en el segundo la extracción de la arcilla depende de la dureza de la roca sedimentaria, pudiendo requerirse de la desintegración del material por medio de explosivos, después se le daría una trituración, una molienda y un cernido. Además del agua, y especialmente en la fabricación de cerámica rústica (tabique de campo, teja y otros) se hace uso frecuentemente de materiales desgrasantes como: polvo de pedacera de tabique, arena cuarzosa y aserrín para disminuir un poco la plasticidad de las mezclas, realizar un buen moldeado de las piezas y facilitar la cocción del producto.¹⁶

¹⁶ Gómez Domínguez, Jorge, (2000), *Materiales de construcción*, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey - Departamento de Ingeniería Civil, México.

2.6.2. Ladrillo

La arcilla con la que se elabora el ladrillo es un material sedimentario de partículas muy pequeñas de silicatos de alúmina hidratados, además de otros minerales como el caolín, la montmorillonita y la illita. Se considera el adobe como el precursor del ladrillo, puesto que se basa en el concepto de utilización de barro arcilloso para la ejecución de muros, aunque el adobe no experimenta los cambios físico-químicos de la cocción. El ladrillo es la versión irreversible del adobe, producto de la cocción a altas temperaturas (más de 350 °C).

Los ladrillos se utilizan en construcción para cerramientos, fachadas y particiones. Se utiliza principalmente para construir muros o tabiques. Aunque se pueden colocar a hueso, lo habitual es que se reciban con mortero. La disposición de los ladrillos en el muro se conoce como aparejo, existiendo gran variedad de ellos.¹⁶

2.6.3. Propiedades mecánicas del ladrillo

El ladrillo es una pieza sólida de arcilla cocida, su forma permite la construcción de muros y otros elementos estructurales.

La resistencia de los ladrillos depende de los materiales empleados en su fabricación, así como del proceso mismo. Un tabique hecho con pasta aguada y no muy bien cocido puede resistir hasta 70 kg. /cm² a la compresión, mientras que un tabique de alta resistencia pudiera aguantar hasta 1,400 kg. /cm². El esfuerzo se obtiene dividiendo la carga resistida por la pieza entre el área de la misma. Otra medida de la capacidad de los ladrillos se obtiene por medio de la prueba de flexión que se realiza apoyando la pieza libremente y someténdola a una carga en el centro, de esta prueba se calcula el módulo de ruptura.

Otras propiedades importantes en los ladrillos son la absorción de agua, la rapidez de succión de agua (capilaridad), y la densidad. La absorción se relaciona con la porosidad y esta con la durabilidad de las piezas cerámicas. La rapidez de succión afecta directamente el comportamiento del mortero empleado para pegar las piezas. La rapidez de succión se obtiene al detectar la cantidad de agua que absorbe un tabique sumergido en 1 cm de agua. Un tabique que succiona 20 gramos de agua por minuto se considera excelente y generalmente permite obtener una adherencia excelente entre el mortero y el tabique, pero, sin embargo, cuando el tabique tiene rápida succión se debe humedecer antes de colocarlo.¹⁶

¹⁶ Gómez Domínguez, Jorge, (2000), *Materiales de construcción*, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey - Departamento de Ingeniería Civil, México.

2.6.4. Ladrillo triturado utilizado como aditivo

Durante las últimas décadas se han incrementado no solo los residuos de ladrillos provenientes de una fabricación defectuosa, sino también los residuos del sector de la construcción y demolición. En la actualidad estos residuos no reciben ninguna clase de tratamiento por lo cual simplemente son arrojados a predios baldíos, creando un gran impacto visual y paisajístico. Esto motiva a investigar acerca del aprovechamiento y revalorización de estos residuos controlando su producción, convirtiéndolo en materia prima para la fabricación de nuevos materiales, contribuyendo al ahorro de energía y a la creación de sistemas constructivos más eficaces y amigables con el medio ambiente.

Este residuo tiene un potencial importante para ser reciclado en comparación con otros tipos de residuos inertes, debido a que los residuos de ladrillo permiten la obtención de un material fragmentado que es utilizado como agregado reciclado ampliamente manejado en la industria de la construcción. El aprovechamiento de estos residuos constituye un aspecto importante a nivel mundial ya que esto representa un beneficio económico, debido a la incorporación de materiales de desecho al proceso de construcción y a su vez ayuda a la preservación de los recursos naturales.¹⁷

2.6.5. Aplicaciones en el mundo

- **Holanda:** debido a la falta de disponibilidad de agregados gruesos ya se han llevado a cabo varios proyectos piloto donde se ha remplazado el 20% del agregado grueso por una mezcla de concreto y ladrillo triturado. Este agregado reciclado se empleó en la construcción de un viaducto cerca de la ciudad de Helmond. En las obras de la compuerta del puerto de Schijndel, se emplearon alrededor de 300 m³ de concreto con agregado reciclado procedente de una mezcla de hormigón y ladrillo. Desde 1994 el gobierno holandés permite el uso de este tipo de agregado reciclado en hormigón estructural, con un remplazo máximo del 20% del agregado grueso. Sin embargo, entre 1997 y 1998 se construyeron 272 casas unifamiliares empleando un 100% de agregado reciclado. Se utilizó para la construcción de muros de carga de concreto en masa y elementos de concreto para fachada y suelos.¹⁷
- **Alemania:** el uso de agregado reciclado data desde 1950 y se ha usado principalmente para la construcción de viviendas. En 1996 y 1997, se desmanteló una zona militar a

¹⁷ Red Temática Europea, (2000), *Uso de materiales reciclados como agregados en la industria de la construcción*, Artículo Reciclaje en la Construcción Combinado N° 2, Inglaterra.

las afueras de Itzehoe que produjo aproximadamente unas 50000 toneladas de escombros cerámicos, los cuales se utilizaron para la edificación nuevamente de esa misma zona.¹⁷

2.6.6. Usos del ladrillo triturado

Hay muchos usos para el ladrillo triturado, como cobertura del suelo, paisajismo y relleno para la construcción de hormigón y la construcción de carreteras. Algunos de los usos del ladrillo triturado se encuentran en la creación de canchas de tenis de arcilla y materiales para techos. La mayor parte del ladrillo triturado conserva su color rojo o marrón original, pero algunas empresas tiñen el producto terminado para agregar un toque de color a los jardines y pasillos. Ya sea que el ladrillo se use solo o como un componente agregado de otro material, es una opción apropiada cuando se intenta usar técnicas de construcción amigables con el medio ambiente en casi cualquier proyecto de construcción.

Muchas estructuras de ladrillos son demolidas, creando un número incalculable de ladrillos usados, no deseados y, a menudo, dañados. Una opción para deshacerse de los ladrillos es colocarlos en un vertedero.

En proyectos de concreto, el ladrillo triturado se usa como agregado no solo para ahorrar en la cantidad de concreto que se requiere para completar el proyecto, sino también para agregar resistencia y un atractivo visual a un acabado de concreto por lo demás simple. Otro uso del ladrillo astillado es como cobertura del suelo alrededor de árboles, arbustos y parterres. El ladrillo se usa a menudo en lugar de astillas de madera para obtener un material mucho más duradero que proporciona un aspecto visual al área, así como una solución muy duradera para el control de malezas. Muchos constructores y contratistas recomiendan el material triturado para pasarelas e incluso entradas de vehículos en algunas áreas tropicales donde el uso de asfalto crea un calor excesivo y no deseado.¹⁷

2.6.7. Investigaciones previas suelo - ladrillo

Los resultados experimentales sobre especímenes de suelo obtenidos en la zona norte de la ciudad de Cali muestran que los suelos seleccionados son altamente expansivos y pueden afectar de manera adversa la infraestructura cimentada sobre ellos. Por otro lado, los procesos de construcción, demolición y mantenimiento de la infraestructura generan una gran cantidad

¹⁷ Red Temática Europea, (2000), *Uso de materiales reciclados como agregados en la industria de la construcción*, Artículo Reciclaje en la Construcción Combinado N° 2, Inglaterra.

de escombros que son dispuestos de manera inadecuada, generando problemas ambientales y sociales, que cada día toman proporciones mayores. Tratando de dar solución a estos dos problemas, se busca desarrollar y caracterizar un material alternativo, mezclando el suelo expansivo con material reciclado, de tal manera que se reduzca el volumen de escombros desechados al reciclar el ladrillo a la vez que se reduce el potencial de expansión y se mejoran sus características mecánicas. Este trabajo busca determinar la viabilidad del uso del polvo de ladrillo, como aditivo para reducir el potencial de expansión y mejorar las propiedades mecánicas de los suelos. Para esto, se clasificaron y caracterizaron 4 tipos diferentes de suelo, determinando su potencial de expansión y resistencia a la compresión triaxial y compresión incofinada. Usando estos resultados como línea base, se evaluó el efecto de la adición del aditivo al reemplazar, inicialmente el 5% del material natural, por polvo de ladrillo vitrificado resultante del reciclaje de los desperdicios generados por la industria de la construcción. Esta proporción se fue aumentando hasta llegar al 30% del aditivo y evaluando en cada caso su efecto en el potencial de expansión y propiedades mecánicas del material. Los resultados muestran que a medida que aumenta la cantidad de aditivo se reduce el potencial de expansión y se aumenta la resistencia a la compresión cuando el material se encuentra bajo compresión triaxial. De manera opuesta, se observa una reducción en la resistencia, cuando se realiza la compresión incofinada.¹⁷

2.7. Ensayos de laboratorio a realizar

2.7.1. Ensayo de granulometría

La granulometría es el proceso de determinación de la proporción en la que se encuentran distintos tamaños de partículas presentes en un suelo. A esta proporción se le conoce también como gradación del suelo.

Este proceso muchas veces se hace usando el método de tamizado gracias a su facilidad, este método se usa principalmente en partículas gruesas y consiste en hacer pasar partículas individuales del suelo por una serie de mallas con aberturas diferentes. Las mallas se acomodan en orden descendente según el tamaño de la abertura. Para el proceso de tamizado, el material debe ser pesado seco, luego lavado en el tamiz No 200, se deja secar y se pesa nuevamente, la diferencia entre estos pesos define el material que pasa por el tamiz No 200. El material seco que sobra es pasado por la serie de tamices para calcular la cantidad que se

¹⁷ Red Temática Europea, (2000), *Uso de materiales reciclados como agregados en la industria de la construcción*, Artículo Reciclaje en la Construcción Combinado N° 2, Inglaterra.

retiene en cada uno de ellos y así poder dibujar la línea granulométrica, la cual es la finalidad de este ensayo.¹⁸

2.7.2. Límites de consistencia

La capacidad que tiene un suelo de deformarse sin romperse es conocida como plasticidad, Atterberg pudo comprobar que la plasticidad no era una propiedad permanente en las arcillas sino circunstancial y depende directamente de su contenido de agua, según este un suelo susceptible a ser plástico puede dividirse en los siguientes estados de consistencia:

- Estado líquido
- Estado semilíquido
- Estado plástico
- Estado semisólido
- Estado sólido

Entre estas existen unas fronteras que definen su consistencia, la frontera entre el estado semilíquido y plástico es llamado límite líquido, este es hallado poniendo el suelo moldeado en una cápsula y luego se le hace una ranura, luego se golpea la capsula sobre una superficie dura, después de 25 golpes el suelo se toca sin mezclarse y esto significa que está en su límite líquido.

La frontera entre los estados plástico y semisólido fue llamada límite plástico, este se determina haciendo rollos con un fragmento de suelo hasta convertirlo en cilindro de un espesor de 3mm y cuando éste presente desmoronamiento significa que el suelo está en su límite plástico.

La frontera entre los estados semisólido y sólido se denomina límite de contracción este se halla con el porcentaje de agua al cual una muestra de suelo no disminuye su volumen al seguirse secando.¹⁹

2.7.3. Ensayo de compactación “Proctor Modificado T-180”

El ensayo de compactación del suelo es un proceso que se basa en la aplicación de energía a un suelo suelto, tratando de eliminar espacios vacíos para aumentar su densidad, su capacidad

¹⁸ Jiménez Salas, José Antonio, (1954), *Mecánica de suelos y sus aplicaciones a la ingeniería*, Dossat, España.

¹⁹ Juárez Badillo, Eulalio, (2005), *Mecánica de suelos - Tomo I - Fundamentos de la mecánica de suelos*, Limusa Noriega, México.

de soporte y su estabilidad. La finalidad del ensayo de compactación es el aumento de la resistencia y la disminución de la capacidad de deformación de un suelo.

Existen dos factores muy importantes en el proceso de compactación, el contenido de agua presente en el suelo antes de iniciar el proceso y la energía empleada para esto. Todo esto ayuda a que se garantice que el proceso realizado en el laboratorio simule las condiciones que pueden ser obtenidas en campo. Hay varios tipos de compactación, los cuales son usados según el tipo de material con el que se trabaje.²⁰

Con el objetivo de buscar un ensayo de laboratorio que iguale los resultados obtenidos en campo, Proctor propone una prueba de compactación, la prueba de Proctor. Esta busca la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo ya compactado. Esta prueba determina el peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar un material, así como la humedad óptima a la cual debe hacerse la compactación.²¹

2.8. Ensayo California Bearing Ratio (CBR)

El Ensayo CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, sub base y base de pavimentos. Esta se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad.

Este es uno de los parámetros necesarios obtenidos en los estudios geotécnicos previos a la construcción, como también lo son el Ensayo Proctor y los análisis granulométricos del terreno.²²

2.9. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El sistema de clasificación unificado SUCS (Unified Soil Classification System), designación ASTM D-2487, originalmente fue desarrollado por A. Casagrande (1948) para la construcción de aeródromos durante la segunda guerra mundial. Este sistema de clasificación fue posteriormente modificado en 1952 por el mismo autor y también por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos quienes hicieron que este sistema sea más aplicable a los propósitos ingenieriles, es decir que ya no era solo aplicable al campo de la aviación. Este sistema de clasificación actualmente goza de amplia aceptación y es el

²⁰ Crespo Villalaz, Carlos, (2004), *Mecánica de suelos y cimentaciones*, Limusa Noriega 5° Edición, México.

²¹ Juárez Badillo, Eulalio, (2005), *Mecánica de suelos - Tomo I - Fundamentos de la mecánica de suelos*, Limusa Noriega, México.

²² Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, (2019), *Guías de laboratorio de mecánica de suelos*, Facultad de Ciencias y Tecnología – Ingeniería Civil, Bolivia.

preferido por la mayor parte de los ingenieros en todo el mundo. El sistema de clasificación SUCS está basado en la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad. Este sistema de clasificación también se basa en la gráfica de plasticidad, que fue obtenida por medio de investigaciones realizadas en laboratorio por A. Casagrande (1932). El significado y uso de esta gráfica de plasticidad es explicada en forma más detallada en el capítulo uno. Este sistema de clasificación presenta las siguientes características:

2.9.1. Tipos de suelos

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino
- Suelos altamente orgánicos

2.9.2. Ensayos necesarios

- Ensayo del análisis granulometría
- Límites de Atterberg recomendación
- Debe ejecutarse en muestras representativas.²³

2.10. Marco referencial

En este punto se puede recalcar una tesis doctoral referida al método de elección del estabilizante óptimo, donde se puede citar los siguientes párrafos:

La construcción con tierra actual, sobre todo si hablamos de BTC (bloques de tierra comprimida), necesita de procesos de estabilización, para conseguir un material durable y que responda a las actuales necesidades constructivas. En base a ello y a la falta de método en este sentido se desarrolla a continuación el siguiente capítulo de la Tesis.

Para que el arquitecto o cualquier otro técnico, pueda decidirse por el mejor método de estabilización de la tierra, que vaya a utilizarse, hay que reunir suficiente información sobre los estabilizantes disponibles. Ésta se deberá cribar por los siguientes criterios de elección:

- Disponibilidad regional. Se priorizarán los productos autóctonos.
- Minimización del impacto ambiental. La evaluación de éste englobará todo el ACV del estabilizante (Análisis del Ciclo de vida).

²³ Alvarado, Glory Rafael, (2019), *Clasificación de suelos SUCS y AASHTO*, Universidad Cesar Vallejo – Escuela Profesional de Ingeniería, Perú.

- Consumo mínimo de energía, agua y recursos no renovables, y emisión mínima de sustancias tóxicas al entorno desde su extracción, fabricación, transporte, aplicación y vida útil.
- Procesos tecnológicos apropiables y apropiados a la gente del lugar.
- La evaluación económica.
- Condiciones de mantenimiento y uso.

Otro artículo que refiere a otro tipo de mejoramiento de suelo utilizando suelo – cemento y cascaras de arroz, un trabajo que es interesante y fue publicado por la Revista de Ingeniería de Construcción publicado por Doctor Guillermo Thenoux, Pontificia Universidad Católica de Chile, donde mostraremos una parte de las conclusiones de dicho trabajo de investigación:

Puede afirmarse que, independiente del contenido de cemento y de la cáscara de arroz adicionados, el suelo arenoso fue siempre superior al suelo arcilloso en términos de desempeño físico-mecánico, evaluado por resistencia a la compresión simple, resistencia a la tracción en la compresión diametral y capacidad de absorción de agua.

Se supone que la cáscara de arroz utilizada en la presente pesquisa presenta contenido de SiO₂ con estructura física (forma cristalina) inadecuada para la ocurrencia de reacciones puzolánicas en presencia de Ca (OH)₂. La misma sólo actuó como relleno afectando negativamente el comportamiento mecánico de ambos suelos. Sin embargo, su utilización combinada con el cemento mostró que las reacciones de estabilización química que ocurrieran entre el suelo y el cemento fueran más significativas del que los efectos negativos (ocurrencia de vacíos) provocados por la presencia de la cáscara de arroz.

De modo general, los valores de masa específica aparente seca máxima, de resistencia a la compresión simple y de tracción en la compresión diametral de las mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz, disminuyeron con el aumento del contenido de cáscara de arroz. Los valores de humedad óptima y absorción de agua aumentaron en la medida del crecimiento del contenido de cáscara de arroz. En todos los tratamientos de suelo-cemento-cáscara de arroz, los valores de resistencia mecánica fueron siempre mayores a los 60 días que a los 7 y 28 días de edad.

2.11. Marco normativo

Las normas a utilizar son:

- Ensayo de Análisis Granulométrico por Tamizado ASTM D 422
- Ensayo de Límites de Atteberg ASTM D 4318
- Ensayo de Proctor Modificado ASTM D 1557
- Ensayo CBR (California Bearing Ratio) – ASTM D 1883

2.12. Análisis de la teoría por parte del autor

Es cierto que existen muchos trabajos de investigación sobre materiales que ayudan a mejorar el suelo de manera que sea apta para la construcción, nos enfocamos en una tesis de la Universidad de San Pedro (PERÚ) la cual habla sobre el uso del polvo de vidrio reciclado como material de estabilización de suelo, y sus conclusiones son las siguientes:

Tanto la Costa, Sierra y Selva, encontraron el suelo arcilloso, cuyo físico - química propiedades son mucho más complejas y poco entendidas por la comunidad científica. El desarrollo de obras civiles, como carreteras, diques, presas, diques, etc., presenta grandes dificultades cuando se trata de suelo de arcilla, por lo general optan por pedir la sustitución de materiales. Otra alternativa que no implique el uso de préstamo de materiales, ya que es un recurso agotable es la estabilización natural de los suelos con los procesos físicos y / o químicos. En este proyecto, se evalúa el efecto sobre la densidad en seco máxima y la resistencia al corte de un suelo cuando se añade 0%, 5%, 7%, 10%, de polvo de polvo de vidrio reciclado con mejores propiedades mecánicas, que se refleja no sólo en el índice de densidad máxima en seco, resistencia al corte y la plasticidad, sino también en la trabajabilidad, la permeabilidad y la estabilidad de volumen. Los datos obtenidos se registraron en tablas para comparar los tratamientos y gráficas para controlar las tendencias de las propiedades evaluadas, por lo que podemos seleccionar el porcentaje óptimo de polvo de vidrio, proporcionado mejores condiciones de trabajabilidad del suelo estudiadas. Como resultado, las proporciones de mezcla optimizados progresivamente el rendimiento del suelo original en términos de sus propiedades de plasticidad, resistencia y estabilidad, Suelo de torneado un inadecuado permisible para la construcción de estructuras de pavimento, por lo

tanto, recomendar el uso de este material se obtuvieron en la estabilización del suelo de arcilla.

Entonces en nuestras propias palabras, según este autor, se refleja que los resultados obtenidos con polvo de vidrio reciclado optimizaron las propiedades del suelo para poder ser usados como material estabilizante de fundación o subrasante de una carretera.

2.13. Posición del autor

En esta investigación se pretende abarcar el mejoramiento de suelos en base a materiales comunes en nuestro medio, que se pueda realizar un reciclado de los mismos, como es el vidrio y el ladrillo, ya que mencionados anteriormente, los obtendremos por un costo cero y luego se obtendrá los valores que puedan respaldar el mejoramiento de suelos, obtenidos mediante ensayos de laboratorio, esta investigación tiene el fin de poder tener otras alternativas de mejoramiento, ya que en nuestro departamento y también en nuestro país, existen suelos inestables y son necesarias su mejoramiento para el uso no solo de carreteras, sino también para estructuras, es por esto que se requiere nuevas técnicas de mejoramiento y mejor aún con materiales que se puedan reciclar y en un futuro poder ser usados para ciertos caminos en donde el suelo sea arcilloso y se necesite un aumento de su valor de CBR, debido a las cargas que se requieran para vehículos tipo.

Previamente al ensayo CBR tendremos un análisis de granulometría, límites de Atteberg, también de Proctor modificado con el fin de obtener una humedad optima y densidad máxima, ya que con estos parámetros se realizará una prueba de suelo natural, para luego iniciar adicionando porcentajes de ladrillo triturado y de vidrio molido en un mismo valor e ir aumentando porcentajes para ver el comportamiento del suelo, observando el efecto de los aditivos en nuestro suelo.

CAPÍTULO III
RELEVAMIENTO DE LA
INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Criterios del diseño metodológico

3.1.1. Unidad de muestra

La unidad de muestra se considera los ensayos de laboratorio de caracterización de suelos y el ensayo de resistencia California Bearing Ratio, esto aplicado a suelos finos.

3.1.2. Población

La población tomada en cuenta para el presente trabajo se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3. Población

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Etapa de caracterización del suelo	Granulometría del suelo	1
2		Limite liquido del suelo	1
3		Limite plástico del suelo	1
4		Ensayo de compactación Proctor del suelo	1
5		Ensayo CBR del suelo	1
6	Ensayos con aditivos seleccionados	Granulometría del ladrillo	3
7		Granulometría del vidrio	3
8		Limite liquido del suelo + ladrillo	3
9		Limite plástico del suelo + vidrio	3
10		Ensayo de compactación del suelo + ladrillo	3
11		Ensayo de compactación del suelo + vidrio	3
12		Ensayo de CBR del suelo + ladrillo	15
13		Ensayo de CBR del suelo + vidrio	15
Total			53

Fuente. Elaboración propia

3.1.3. Muestra

Tabla 4. Muestra

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Ensayos con aditivos seleccionados	Granulometría del ladrillo	3
2		Granulometría del vidrio	3
3		Limite liquido del suelo + ladrillo	3
4		Limite plástico del suelo + vidrio	3
5		Ensayo de compactación del suelo + ladrillo	3
6		Ensayo de compactación del suelo + vidrio	3
7		Ensayo de CBR del suelo + ladrillo	10
8		Ensayo de CBR del suelo + vidrio	10
Total			38

Fuente. Elaboración propia

3.1.4. Tamaño de la muestra

Para el cálculo del tamaño de la muestra se tomará en cuenta la ecuación de muestreo aleatorio con población finita.

$$n = \frac{Z^2 * N * \sigma^2}{(N - 1) * e^2 + Z^2 * \sigma^2}$$

Donde se tomará en cuenta un nivel de confianza de 95% y de acuerdo a la variable estandarizada es $Z=1.96$, con un margen de error $e=0.05\%$ que es deducido del nivel de confianza, y por el corto tiempo establecido se asume una varianza de $\sigma^2=0.10$

Reemplazando se tiene:

$$n = \frac{1.96^2 * 38 * 0.10}{(38 - 1) * 0.05^2 + 1.96^2 * 0.10}$$

Tamaño de la muestra (n):

$$n = 30$$

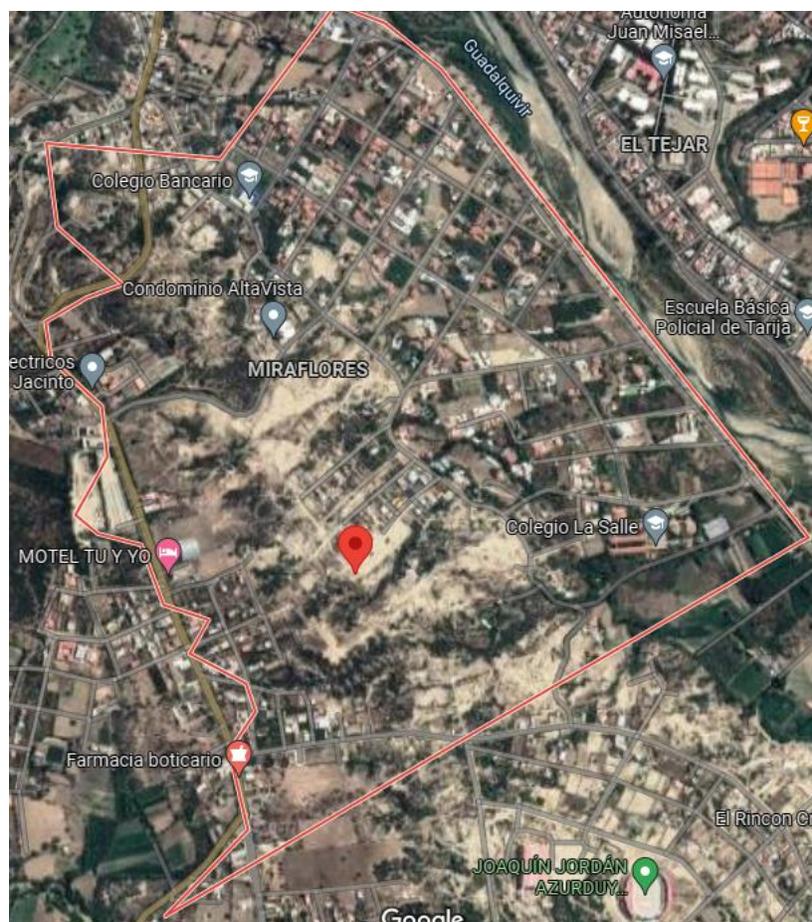
Se tomará en cuenta 30 muestras de suelo para nuestros diferentes ensayos a realizar con nuestros aditivos.

3.2. Ubicación de la zona de aplicación

Se obtendrán muestras de una cantera suelos con arcilla que se encuentra en el barrio Miraflores de la ciudad de Tarija que luego de haber recogido las muestras se las trasladara al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, donde se realizara las pruebas de laboratorio correspondientes y el trabajo de gabinete se la realizara de manera posterior.

3.2.1. Mapa con coordenadas geográficas y UTM

Figura 5. Zona de extracción del suelo



Fuente. Google Earth

La cantera de arcilla está ubicada en la Provincia Cercado del Departamento de Tarija dentro del Municipio de Cercado, el barrio Miraflores es el nombre del lugar de extracción que es

un barrio en desarrollo que se encuentra en esta ciudad, el cual es conocido por tener suelos con gran contenido de arcilla.

La ubicación se encuentra entre las coordenadas 21°33'23.9" de Latitud Sud y 64°43'47.9" de Longitud Oeste. Por su parte, su centro poblado principal es la ciudad de Tarija.

3.2.2. Descripción de las características físicas y naturales de la zona

El municipio de Cercado, se encuentra ubicado en el departamento de Tarija, limita al norte con el municipio de San Lorenzo, al sur con el Municipio de Padcaya del Departamento de Tarija y la República Argentina, al este con el Municipio de O' Connor, y al oeste con el municipio de El Puente.

Su extensión territorial es 2.20 km², es un barrio de la ciudad de Tarija que se encuentra en crecimiento poblacional, los servicios básicos son de existencia intermedia, y es notable la erosión que se tiene en el lugar y en barrios aledaños como San Blas.

3.3. Ubicación de la zona de los materiales empleados

3.3.1. Ubicación y coordenadas del suelo arcilloso

El material denominado suelo arcilloso fue extraído del barrio Miraflores de la ciudad de Tarija, en el lugar se tiene visiblemente arcilla el cual tiene las siguientes coordenadas:

Tabla 5. Coordenadas de ubicación de suelo arcilloso

Coordenadas del suelo arcilloso	
Coordenadas UTM	Coordenadas geográficas
320839.21 E	Latitud: 21°33'24.76"S
7615225.01 S	Longitud: 64°43'48.67"W

Fuente. Elaboración propia

Figura 6. Ubicación de zona de extracción del suelo

Fuente. Google Earth

3.3.2. Ubicación y coordenadas de obtención del ladrillo

El ladrillo se obtuvo de las instalaciones de la cerámica Guadalquivir de la ciudad de Tarija, donde se realizó el reciclado de ladrillos, es decir ladrillos que sufrieron rajaduras, o caídas que provocaron roturas y los cuales ya no son comercializados son apilados por el personal de la cerámica, entonces se tuvo la recolección de los suficientes escombros para realizar nuestros ensayos.

Tabla 6. Coordenadas de ubicación del ladrillo

Coordenadas del ladrillo (Cerámica Guadalquivir)	
Coordenadas UTM	Coordenadas geográficas
319672.49 E	Latitud: 21°32'43.47"S
7616482.05 S	Longitud: 64°44'28.73"W

Fuente. Elaboración propia

Figura 7. Ubicación de obtención del ladrillo



Fuente. Google Earth

Figura 8. Desechos de ladrillo



Fuente. Cerámica Guadalquivir

3.3.3. Ubicación y coordenadas de obtención del vidrio

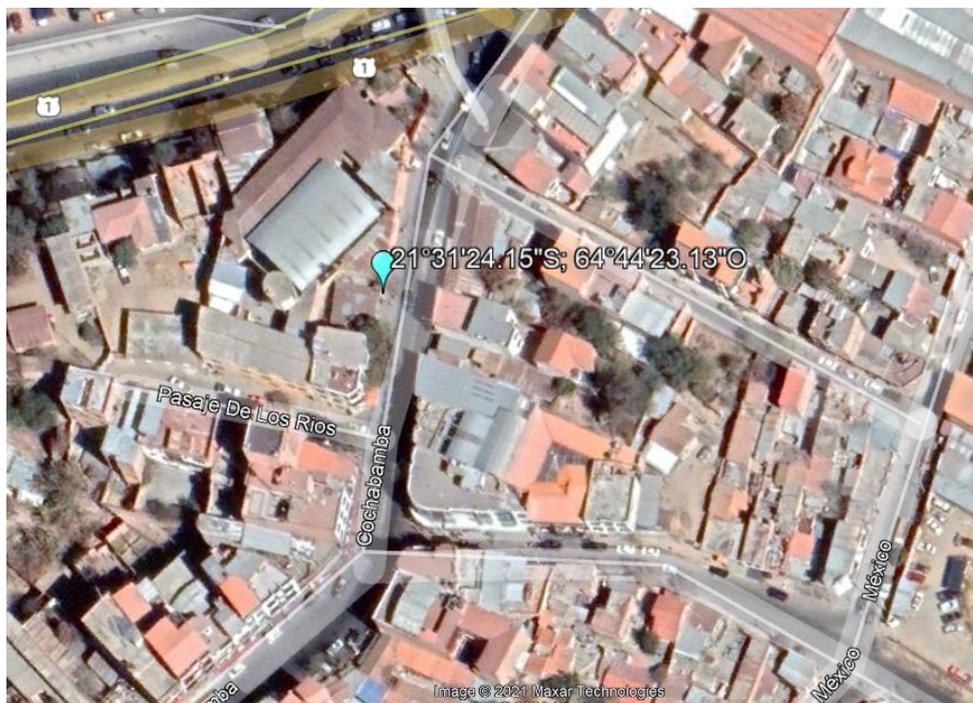
El vidrio se lo obtuvo de las vidrierías que están ubicadas en el barrio La Loma de la ciudad de Tarija, de los cuales se evidencio que tienen grandes pérdidas por día, de 10 a 15 kilogramos por día, entonces para nuestras pruebas de laboratorio se las obtuvo y también se tomó en cuenta que todos sean vidrios comunes o planos.

Tabla 7. Coordenadas de ubicación del vidrio

Coordenadas del vidrio (barrio La Loma)	
Coordenadas UTM	Coordenadas geográficas
319806.42 E	Latitud: 21°31'24.15"S
7618923.32 S	Longitud: 64°44'23.13"W

Fuente. Elaboración propia

Figura 9. Ubicación de la zona de extracción del vidrio



Fuente. Google Earth

3.4. Caracterización del suelo arcilloso

3.4.1. Ensayo de granulometría

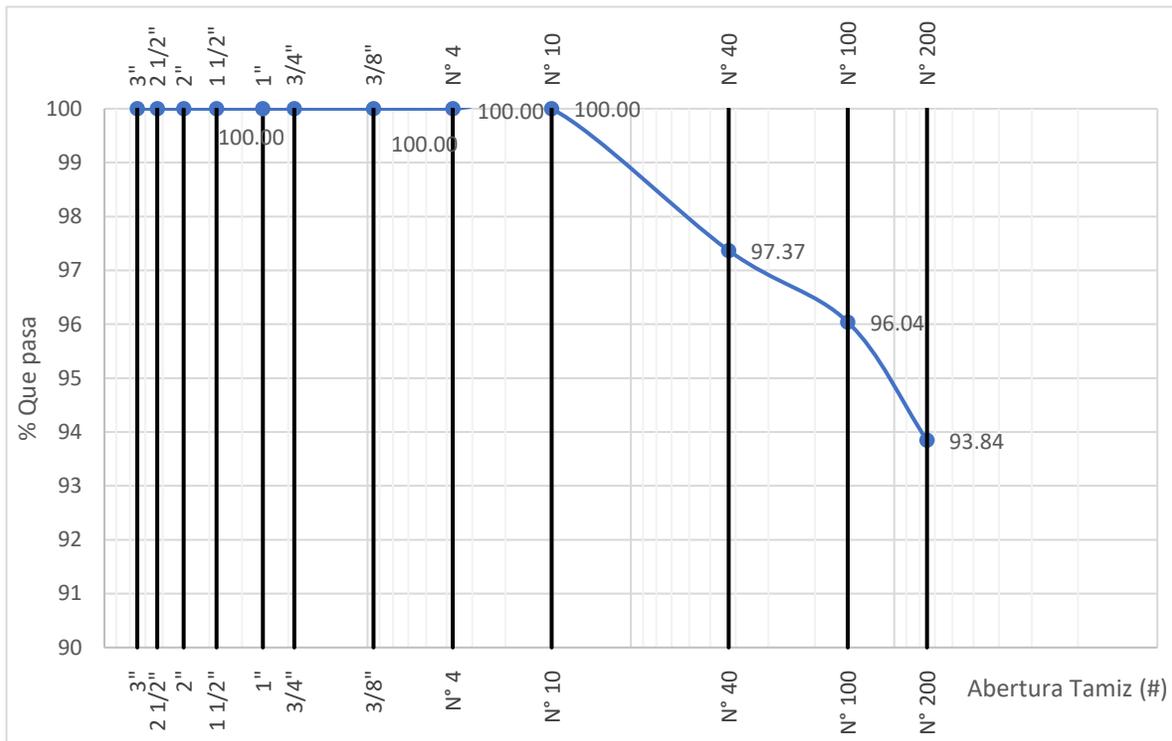
Se realizó el ensayo de granulometría por el método del lavado ya que nuestro suelo es fino, entonces según ASTM D422 AASHTO T88, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 8. Planilla de ensayo de granulometría

Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.75	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 10	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 40	0.425	13.16	13.16	2.63	2.63	97.37
N° 100	0.150	6.64	19.80	1.33	3.96	96.04
N° 200	0.075	10.98	30.78	2.20	6.16	93.84
Base		469.22		93.84	100.00	
Total		500.00		100.00		

Fuente. Elaboración propia

Después de obtener la planilla anterior se procede a obtener la curva granulométrica para este tipo de suelo que es fino y además con un gran contenido de arcilla al pasar en un 93.84% el tamiz N° 200, entonces definimos la curva de la siguiente manera:

Gráfico 1. Curva granulométrica del suelo

Fuente. Elaboración propia

Para complementar en ensayo se adjunta algunas imágenes de lo que fue el método de lavado realizado en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho:

Figura 10. Lavado del suelo fino

Fuente. Elaboración propia

Según la norma ASTM D422 AASHTO T88, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, se lee que se debe tener 500 gramos de la muestra de suelo fino para realizar el lavado, del cual solo quedo 6.16% de suelo:

Figura 11. Muestra de suelo inicial



Fuente. Elaboración propia

Figura 12. Muestra de suelo final



Fuente. Elaboración propia

3.4.2. Ensayo de límite líquido del suelo.

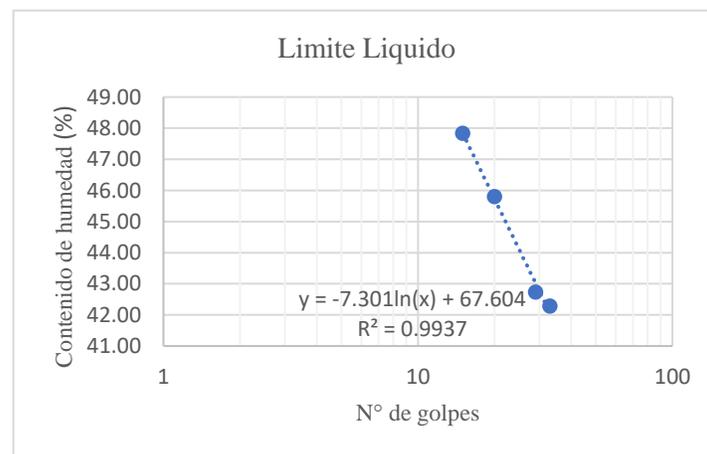
Se realizó el ensayo de límite líquido según ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, teniendo los siguientes resultados:

Tabla 9. Planilla de ensayo de límite líquido

Capsula	1	2	3	4
N° de golpes	15	20	29	33
Suelo húmedo + capsula (gr)	27.56	28.12	29.36	29.19
Suelo seco + capsula (gr)	22.37	23.21	24.39	24.31
Peso del agua (gr)	5.19	4.91	4.97	4.88
Peso de la capsula	11.52	12.49	12.76	12.77
Peso del suelo seco (gr)	10.85	10.72	11.63	11.54
Contenido de humedad (%)	47.83	45.80	42.73	42.29

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 2. Límite líquido suelo



Fuente. Elaboración propia

$$\text{Límite Líquido} = -7.301 * \ln(25 \text{ golpes}) + 67.604$$

Donde:

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$\text{Límite Líquido} = 44.10 \%$$

Para complementar el ensayo se registró imágenes del proceso del ensayo de límite líquido según norma ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras el cual nos dio como resultado un límite líquido de 44.10 %, el cual relacionaremos más adelante con el límite plástico y posteriormente el índice de plasticidad y así clasificar nuestro suelo:

Figura 13. Preparación de muestra para el ensayo



Fuente. Elaboración propia

Con la ayuda del tamiz N° 40 se obtuvo el suelo para realizar el ensayo en el aparato de Casagrande y así poder obtener nuestro líquido con este ensayo en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Luego se procedió a humedecer la muestra hasta tener una masa donde se observe que las partículas se hayan unido entre sí entonces se procede a colocar la muestra en la cuchara del aparato de Casagrande y hacer la ranura de acuerdo a especificaciones de la norma dicha anteriormente el cual queda de la siguiente manera:

Figura 14. Muestra en el aparato de Casagrande



Fuente. Elaboración propia

Luego de operar el aparato de Casagrande y que cierre la ranura, se procedió a obtener el número de golpes con el contador que cuenta dicho aparato también ayudando con la cuenta manual y a su vez las muestras para obtener el contenido de humedad para colocarlas en el horno contenidas en taras y así después de 24 horas tener los datos finales y proceder con el llenado de la planilla de limite líquido.

3.4.3. Ensayo de límite plástico.

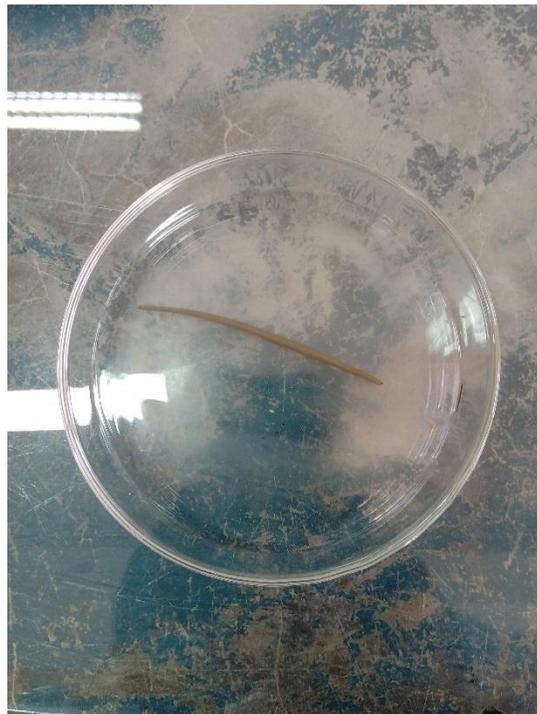
El ensayo de limite plástico se realizó de acuerdo a la norma ASTM D4318 AASHTO T90, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 10. Planilla de ensayo de límite plástico

Cápsula	1	2	3
Suelo húmedo + cápsula (gr)	15.25	13.70	13.94
Suelo seco + cápsula (gr)	15.01	13.51	13.68
Peso del agua (gr)	0.24	0.19	0.26
Peso de la cápsula	13.90	12.61	12.49
Peso del suelo seco (gr)	1.11	0.90	1.19
Contenido de humedad (%)	21.62	21.11	21.85
Límite plástico	21.53		

Fuente. Elaboración propia

Figura 15. Muestra estándar para límite plástico



Fuente. Elaboración propia

$$IP = LL - LP$$

IP = Índice de plasticidad (%)

LL= Límite líquido (%)

LP = Límite Plástico (%)

$$IP = 22.58 \%$$

3.4.4. Clasificación de suelos (SUCS)

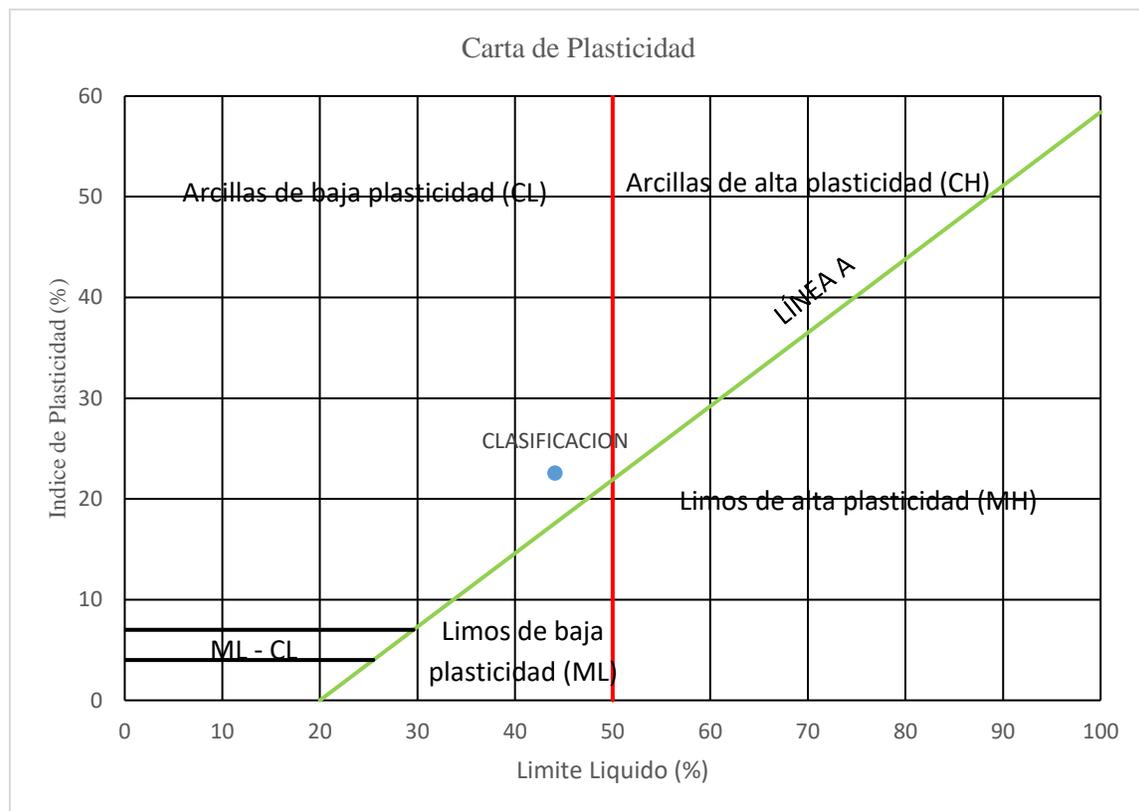
Para la clasificación de suelos se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el cual es necesario los datos siguientes:

Tabla 11. Parámetros de clasificación

Clasificación de suelos (SUCS)	
Pasa tamiz N° 200	93.84%
Límite líquido	44.10%
Índice de plasticidad	22.58%

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 3. Carta de plasticidad SUCS



Fuente. Elaboración propia

Tipo de suelo: **Arcillas de baja plasticidad (CL)**

Según nuestros ensayos se evidencio que es un suelo tipo arcilloso de baja plasticidad según SUCS.

3.4.5. Ensayo de compactación “Proctor Modificado T-180”

El ensayo de compactación se la realizó de acuerdo a la norma ASTM D22 AASHTO T180, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

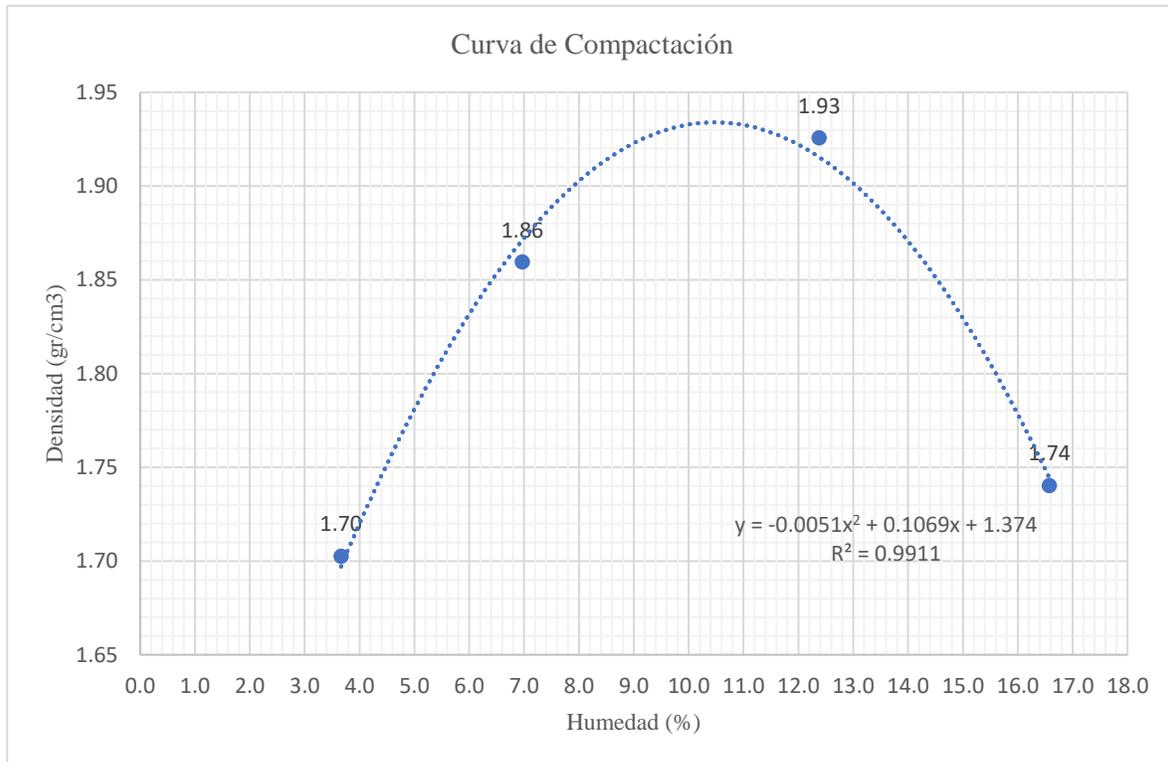
Tabla 12. Planilla de ensayo de compactación T-180

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10255.	10735	11110	10820
Capsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	126.25	161.48	131.83	145.60
Peso suelo seco + cápsula (gr)	122.43	152.25	119.3	127.30
Peso de la cápsula (gr)	18.13	19.77	18.10	16.90
Peso del molde (gr)	6475			
V. de la muestra (cm3)	2141.80			
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10255	10735	11110	10820
Peso del molde (gr)	6475	6475	6475	6475
Peso suelo húmedo (gr)	3780	4260	4635	4345
Volumen de la muestra (cm3)	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm3)	1.76	1.99	2.16	2.03
Capsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	126.25	161.48	131.83	145.60
Peso suelo seco + cápsula (gr)	122.43	152.25	119.30	127.30
Peso del agua (gr)	3.82	9.23	12.53	18.30
Peso de la cápsula (gr)	18.13	19.77	18.10	16.90
Peso suelo seco (gr)	104.30	132.48	101.20	110.40
Contenido de humedad (%)	3.66	6.97	12.38	16.58
Densidad suelo seco (gr/cm3)	1.70	1.86	1.93	1.74

Fuente. Elaboración propia

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 4. Curva de compactación suelo



Fuente. Elaboración propia

De esta curva se obtiene una ecuación, el cual nos indicará la humedad óptima y por consiguiente la densidad máxima a la que el suelo es capaz de llegar con dicha humedad:

$$y = -0.0051(x^2) + 0.1069x + 1.374$$

Donde:

y= Densidad (gr/cm3)

x= Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe obtener la derivada de la ecuación anterior, entonces la ecuación derivada es como sigue:

$$0 = -0.0051x + 0.1069$$

$$x = \frac{0.1069}{2 * 0.0051}$$

$$x = 10.48\%$$

Con la humedad óptima, hallamos la densidad correspondiente a esta humedad q seria denominada densidad máxima:

$$y = -0.0051(10.48^2) + 0.1069 * 10.48 + 1.374$$

$$y = 1.93 \frac{gr}{cm^3}$$

Resultados finales del ensayo de compactación T180:

Tabla 13. Resultados compactación T-180

Resultados	
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.93
Humedad óptima (%)	10.48

Fuente. Elaboración propia

3.4.6. Ensayo de California Bearing Ratio (CBR).

Se realizo el ensayo de CBR para nuestro suelo de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (305.59 * x) + 44.513$$

Donde:

y = Carga (kg)

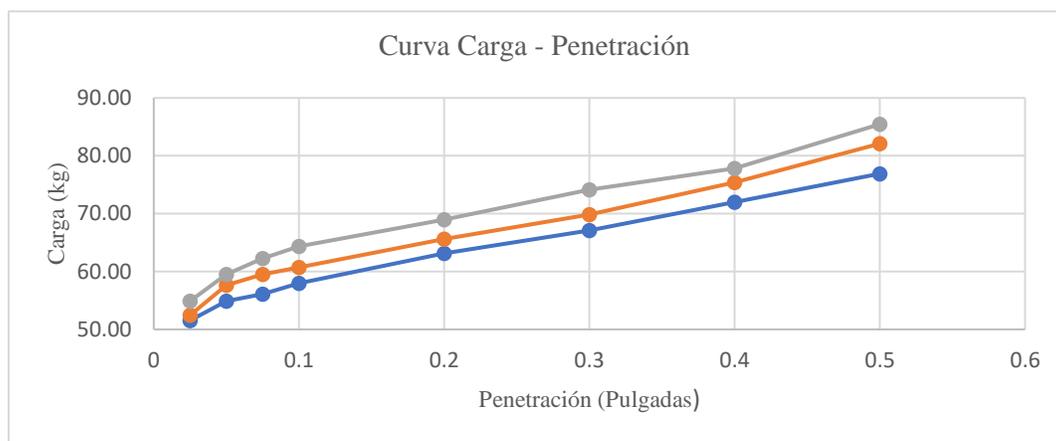
x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga: 19.3548 cm²

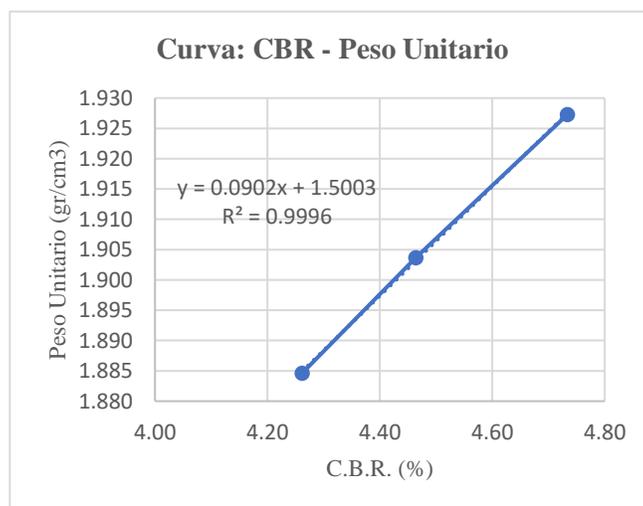
Tabla 14. Resultados de CBR

CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
4.26	1.89
4.46	1.90
4.73	1.93

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 5. Curva “Carga-Penetración” suelo

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 6. Curva “CBR – Peso Unitario” suelo

Fuente. Elaboración propia

Considerando la gráfica 6. se extrae los coeficientes de la fórmula lineal:

Coeficiente A:0.0902

Coeficiente B:1.5003

Aplicando la fórmula:

$$CBR_{100\%} = \frac{\text{Peso unitario} - \text{Coeficiente B}}{\text{Coeficiente A}}$$

Dando como resultado:

$$CBR_{100\%} = 4.81 \%$$

La expansión se midió de la siguiente manera:

Tabla 15. Expansión del suelo

	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Expansión (%) inicial (0 días)	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Expansión (%) final (4 días)	3.37 %	3.26 %	2.95 %

Fuente. Elaboración propia

3.4.7. Resultados de caracterización

Se tiene una tabla donde resumiremos los resultados obtenidos de suelo:

Tabla 16. Resultados de caracterización de suelo

Pasa tamiz N° 200 (%)	93.84
Límite líquido (%)	44.10
Límite plástico (%)	21.53
Índice de plasticidad (%)	22.58
Clasificación del suelo	(CL)
Humedad óptima (%)	10.48
Densidad máxima (gr/cm3)	1.93
CBR (%)	4.81

Fuente. Elaboración propia

3.5. Ensayos con ladrillo triturado

3.5.1. Molienda del ladrillo

Se obtuvo el ladrillo de la cerámica Guadalquivir de la ciudad de Tarija, pudiendo adquirirlo de manera gratuita ya que fueron recolectados de los escombros que como máximo están 2 días apilados y posteriormente son llevados a depósitos o al vertedero de la ciudad, es así que se tiene lo necesario para realizar nuestras pruebas de laboratorio y de esta manera realizar la investigación.

De esta manera se procedió luego a la molienda del mismo adjuntando algunas imágenes para el registro del mismo:

Figura 16. Triturado del ladrillo



Fuente. Elaboración propia

Se realizó el triturado manual del ladrillo con la ayuda de un martillo y procurando que las partículas oscilen alrededor del diámetro del tamiz N° 4 y menores diámetros para los ensayos necesarios.

Figura 17. Proceso de triturado



Fuente. Elaboración propia

Se realizó el triturado de 32000 gramos de ladrillo aproximadamente ayudandonos de una balanza colgante el cual nos fue de mucha ayuda para observar el avance que teniamos en cuanto a la trituracion o molienda.

Figura 18. Pesaje del ladrillo triturado



Fuente. Elaboración propia

Cabe recalcar que toda la molienda del ladrillo fue de manera manual, con solo uso de martillo, bolsas de nylon para guardar el material molido, y un batan que nos sirvió de base para realizar el triturado, como anexo se tenía la balanza pero solo fue orientativo ya que se necesitaba la precisión de las balanzas de laboratorio. Además cuidamos que el ladrillo no salga disparado al momento de golpearlo, ya que estos pueden llegar al cuerpo o a los ojos los cuales se debe tener mucho cuidado.

Figura 19. Tamizado del ladrillo triturado



Fuente. Elaboración propia

3.5.2. Partículas planas y alargadas en el ladrillo

Al haber terminado la molienda, se llevo el material al laboratorio para tamizarlo y a su vez tener en cuenta un detalle importante que también se tomo en cuenta para el vidrio, como es la determinación de partículas planas y alargadas, al tener partículas pequeñas nos apoyamos en la observación de los mismos, entonces se determino que para esta comparación usariamos una relacion máxima de ancho, largo, espesor de partículas de 1:3:1 , aclarar en esta parte que la relación entre ancho y largo sea de 1:3, y de esta manera descartar las particulas que aproximadamente se sobrepasen esta relación establecida, reiterar y recalcar que esta inspeccion fue visual y que se aplicó despues de tamizar el aditivo, luego se procedió a descartar partículas que se encuentren lejos de cumplir esta condición y luego pesamos para obtener nuestros pesos requeridos para nuestros ensayos, de la misma manera se procedió para el vidrio, ya que estamos comparando los resultados de estos aditivos y debemos tener las mismas condiciones para ambos materiales de adición.

3.5.3. Granulometría del ladrillo

El ensayo de granulometría se hizo según la norma ASTM D422 AASHTO T88, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, la cual nos ayudó a obtener nuestra finura de triturado utilizando la planilla estándar de la norma para suelos obteniendo así los siguientes resultados:

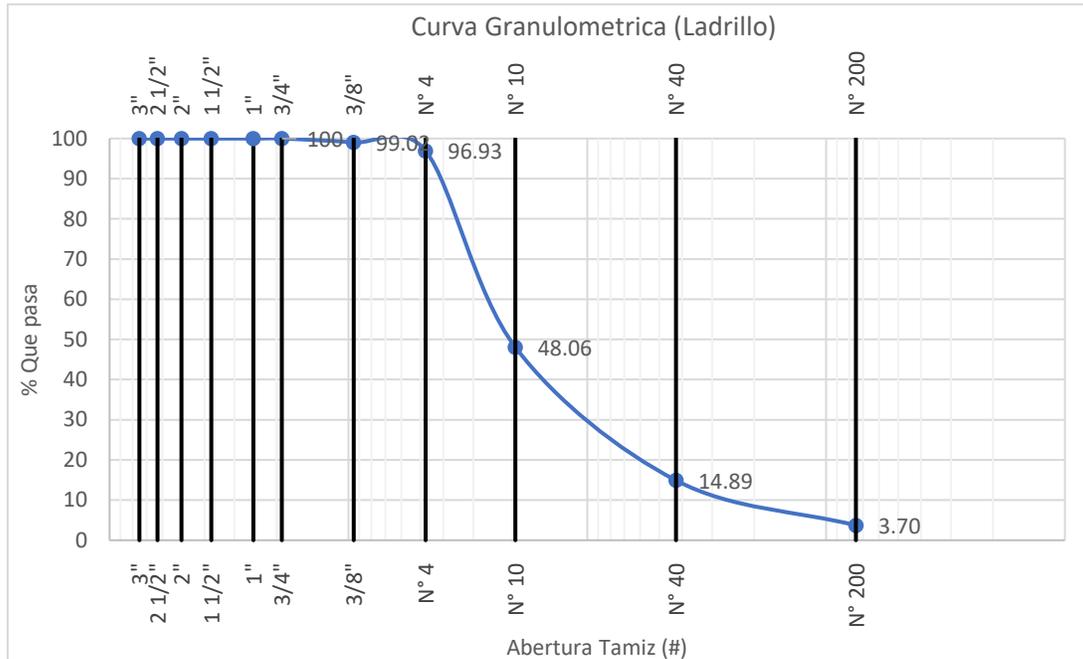
Peso inicial = 32000 gramos

Tabla 17. Planilla de la granulometría del ladrillo

Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	Masa Retenida acumulada (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	312.32	312.32	0.98	0.98	99.02
N° 4	4.75	669.85	982.17	2.09	3.07	96.93
N° 10	2.00	15639.48	16621.65	48.87	51.94	48.06
N° 40	0.425	10611.96	27233.61	33.16	85.11	14.89
N° 200	0.075	3581.71	30815.32	11.19	96.30	3.70
Base		1184.68		3.70	100.00	
Total		32000.00		100.00		

Fuente. Elaboración propia

La tabla anterior nos muestra la finura de molido manual que se tuvo, de donde se seleccionó los diámetros a utilizar para nuestros ensayos, mencionar que principalmente para nuestro ensayo CBR se seleccionó los diámetros que pasan el tamiz N°4 y que se retienen en el tamiz N° 10, como se mencionó anteriormente, luego de esta selección se tuvo la inspección visual de las partículas y el descarte correspondiente referido a partículas planas y alargadas.

Gráfico 7. Curva granulométrica del ladrillo

Fuente. Elaboración propia

Luego de separar las partículas y seleccionar cuales usaremos, se comenzó a preparar el material para los ensayos, y para eso tanto el suelo como el ladrillo triturado lo introducimos en el horno que se encuentra en laboratorio para quitar la humedad dejándolo por 2 días y así tener un suelo y ladrillo triturado seco, entonces se procedió al pesaje final para la realización de los ensayos.

Tabla 18. Pesos aplicados en los ensayos

Ensayo	Peso para el ensayo	Abertura tamiz
Limite liquido y plastico	3000 gramos	Pasa N° 40 – Retiene N° 200
Compactacion “Proctor Modificado”	1500 gramos	Pasa N° 4 – Retiene N° 10
CBR	13500 gramos	Pasa N° 4 – Retiene N° 10

Fuente. Elaboración propia

Debemos tener en cuenta que se descartó las partículas que pasan el tamiz N° 200, ya que está considerado como polvo de ladrillo y no está tomado en cuenta para nuestra investigación.

3.5.4. Límite líquido suelo + ladrillo

Para el primer ensayo se hizo la mezcla de suelo y ladrillo molido de acuerdo a la norma ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, respetando el número de tamiz y demás consideraciones que son las mismas para el suelo fino:

- **Contenido de ladrillo = 3%**

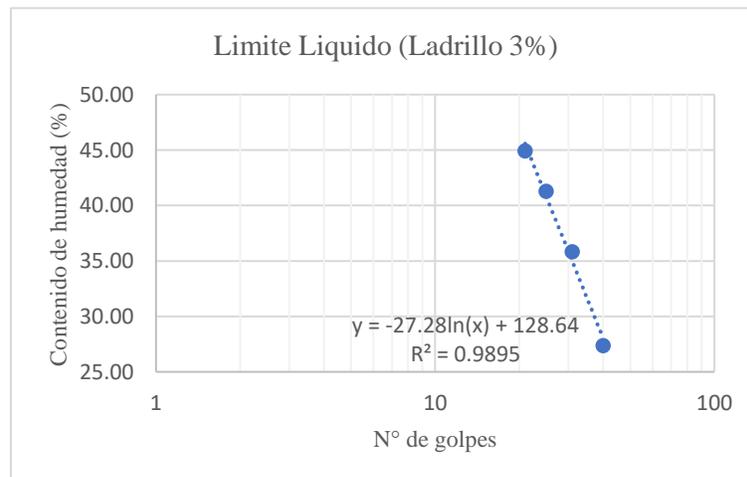
Tabla 19. Planilla limite liquido ladrillo 3%

Capsula	1	2	3	4
N° de golpes	21	25	31	40
Suelo húmedo + cápsula (gr)	27.56	32.54	29.72	29.65
Suelo seco + cápsula (gr)	22.93	27.06	25.18	26.01
Peso del agua (gr)	4.63	5.48	4.54	3.64
Peso de la cápsula	12.62	13.78	12.51	12.70
Peso del suelo seco (gr)	10.31	13.28	12.67	13.31
Contenido de humedad (%)	44.91	41.27	35.83	27.35

Fuente. Elaboración propia

Al obtener esta planilla se procedió a obtener la gráfica de límite líquido y obtener el contenido de humedad a los 25 golpes, así de esta manera se obtuvo el primer resultado de comportamiento del límite líquido frente a un aumento del ladrillo al 3%.

Gráfico 8. Limite liquido ladrillo 3%



Fuente. Elaboración propia

$$y = -27.28 \ln(x) + 128.64$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -27.28 \ln(25) + 128.64$$

$$\text{Limite liquido}_{L-3\%} = 40.83 \%$$

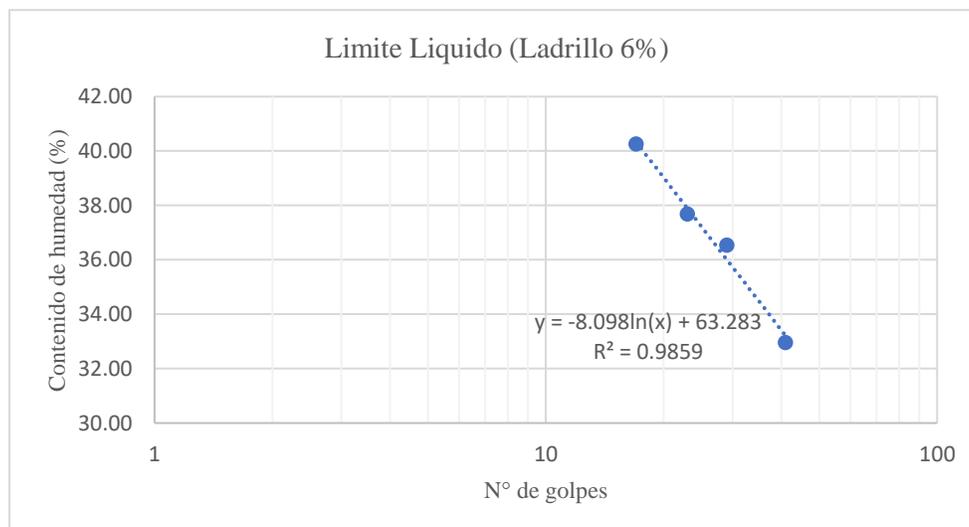
- **Contenido de ladrillo = 6%**

Tabla 20. Planilla límite líquido ladrillo 6%

Capsula	1	2	3	4
N° de golpes	17	23	29	41
Suelo húmedo + cápsula (gr)	29.14	28.65	29.36	28.11
Suelo seco + cápsula (gr)	24.59	23.60	24.69	24.29
Peso del agua (gr)	4.55	5.05	4.67	3.82
Peso de la cápsula	13.29	10.20	11.91	12.70
Peso del suelo seco (gr)	11.30	13.40	12.78	11.59
Contenido de humedad (%)	40.27	37.69	36.54	32.96

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 9. Limite liquido ladrillo 6%



Fuente. Elaboración propia

$$y = -8.098 \ln(x) + 63.283$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -8.098 \ln(25) + 63.283$$

$$\text{Limite liquido}_{L-6\%} = 37.22\%$$

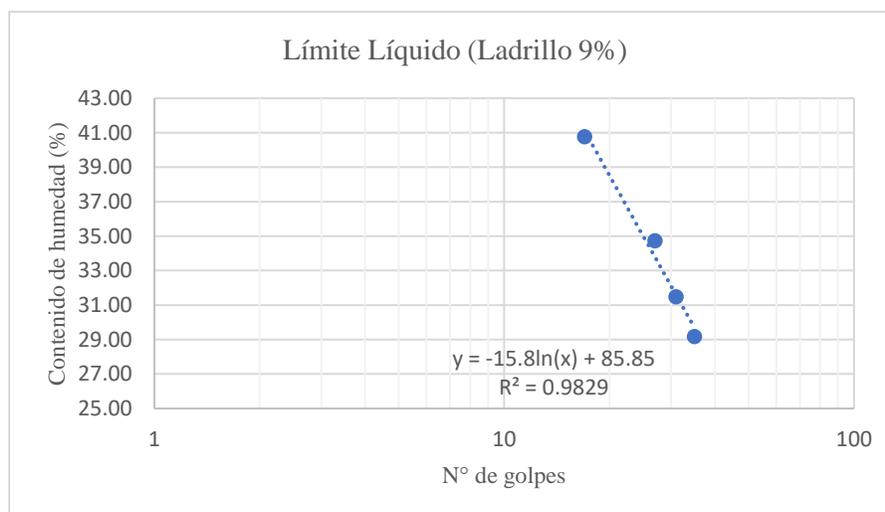
- **Contenido de ladrillo = 9%**

Tabla 21. Planilla límite líquido ladrillo 9%

Cápsula	1	2	3	4
N° de golpes	17	27	31	35
Suelo húmedo + cápsula (gr)	29.38	28.51	27.97	29.65
Suelo seco + cápsula (gr)	24.46	24.79	24.36	25.85
Peso del agua (gr)	4.92	3.72	3.61	3.80
Peso de la cápsula	12.39	14.08	12.89	12.82
Peso del suelo seco (gr)	12.07	10.71	11.47	13.03
Contenido de humedad (%)	40.76	34.73	31.47	29.16

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 10. Límite líquido ladrillo 9%



Fuente. Elaboración propia

$$y = -15.8 \ln(x) + 85.85$$

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$\text{Límite líquido}_{L-9\%} = 34.99 \%$$

De esta manera se completó los ensayos de limite liquido en los 3 porcentajes propuestos.

3.5.5. Límite plástico suelo + ladrillo

El ensayo de límite plástico de suelo adicionado con ladrillo se lo hizo según la norma ASTM D4318 AASHTO T90, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, donde se tiene la siguiente planilla:

- **Contenido de ladrillo = 3%**

Tabla 22. Planilla de límite plástico ladrillo 3%

Cápsula	1	2	3
Suelo húmedo + cápsula (gr)	14.64	13.05	14.52
Suelo seco + cápsula (gr)	14.44	12.93	14.35
Peso del agua (gr)	0.20	0.12	0.17
Peso de la cápsula	13.45	12.31	13.54
Peso del suelo seco (gr)	0.99	0.62	0.81
Contenido de humedad (%)	20.20	19.35	20.99
Límite plástico	20.18		

Fuente. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico}_{L-3\%} = 20.18\%$$

$$IP = LL - LP$$

IP=Índice de plasticidad (%)

LL=Límite líquido (%)

LP=Límite plástico (%)

$$IP = 40.83\% - 20.18\%$$

$$IP = 20.65\%$$

- Contenido de ladrillo = 6%

Tabla 23. Planilla de límite plástico ladrillo 6%

Cápsula	1	2	3
Suelo húmedo + cápsula (gr)	13.64	14.76	13.98
Suelo seco + cápsula (gr)	13.47	14.61	13.86
Peso del agua (gr)	0.17	0.15	0.12
Peso de la cápsula	12.56	13.81	13.28
Peso del suelo seco (gr)	0.91	0.80	0.58
Contenido de humedad (%)	18.68	18.75	20.69
Límite plástico	19.37		

Fuente. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico}_{L-6\%} = 19.37\%$$

$$IP = LL - LP$$

IP=Índice de plasticidad (%)

LL=Límite líquido (%)

LP=Límite plástico (%)

$$IP = 17.84\%$$

- Contenido de ladrillo = 9%

Tabla 24. Planilla de límite plástico ladrillo 9%

Cápsula	1	2	3
Suelo húmedo + cápsula (gr)	13.29	13.62	14.25
Suelo seco + cápsula (gr)	13.17	13.47	14.12
Peso del agua (gr)	0.12	0.15	0.13
Peso de la cápsula	12.51	12.67	13.37
Peso del suelo seco (gr)	0.66	0.80	0.75
Contenido de humedad (%)	18.18	18.75	17.33
Límite plástico	18.09		

Fuente. Elaboración Propia

$$\text{Límite plástico}_{L-9\%} = 18.09\%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP=Índice de plasticidad (%)

LL=Límite líquido (%)

LP=Límite plástico (%)

$$IP = 34.99\% - 18.09\%$$

$$IP = 16.90\%$$

Figura 20. Mezcla de suelo y ladrillo



Fuente. Elaboración propia

3.5.6. Ensayo de compactación “Proctor Modificado T-180” suelo + ladrillo

El ensayo de compactación Proctor modificado de suelo adicionado con ladrillo se hizo según la norma ASTM D22 AASHTO T180, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, donde obtuvimos los siguientes resultados de las muestras ensayadas:

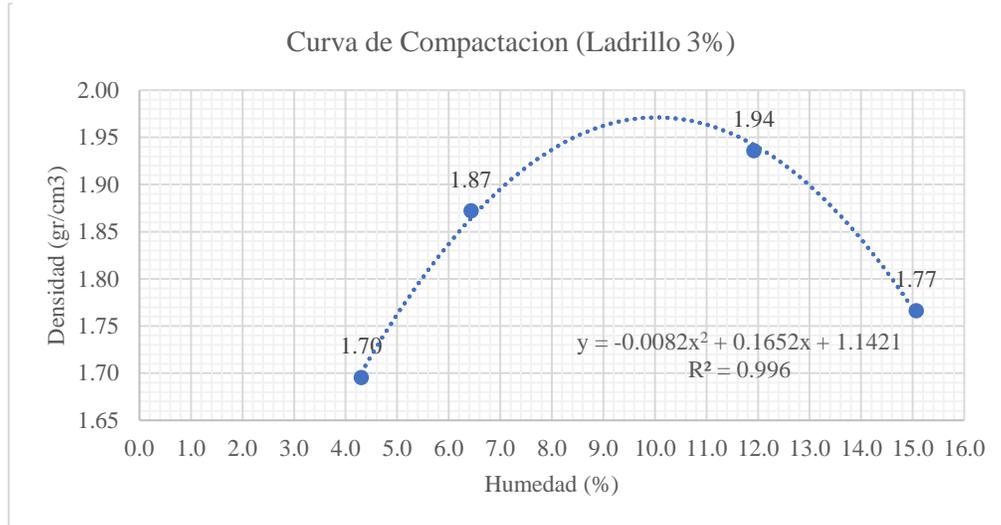
- **Contenido de ladrillo: 3%**

Tabla 25. Planilla compactación ladrillo 3%

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde(gr)	10262	10742	11115	10827
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula(gr)	117.10	152.05	122.35	135.67
Peso suelo seco + cápsula(gr)	113.02	144.06	111.25	120.12
Peso de la cápsula(gr)	18.13	19.77	18.10	16.90
Peso del molde(gr)	6475			
Volumen de la muestra (cm3)	2141.80			
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10262	10742	11115	10827
Peso del molde (gr)	6475	6475	6475	6475
Peso suelo húmedo (gr)	3787	4267	4640	4352
Volumen de la muestra (cm3)	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm3)	1.77	1.99	2.17	2.03
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	117.10	152.05	122.35	135.67
Peso suelo seco + cápsula (gr)	113.02	144.06	111.25	120.12
Peso del agua (gr)	4.08	7.99	11.10	15.55
Peso de la cápsula (gr)	18.13	19.77	18.10	16.90
Peso suelo seco (gr)	94.89	124.29	93.15	103.22
Contenido de humedad (%)	4.30	6.43	11.92	15.06
Densidad suelo seco (gr/cm3)	1.70	1.87	1.94	1.77

Fuente. Elaboración propia

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 11. Curva de compactación ladrillo 3%

Fuente. Elaboración propia

Ecuación obtenida de la curva:

$$y = -0.0082x^2 + 0.1652x + 1.1421$$

Donde:

y = Densidad (gr/cm³)

x = Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe encontrar la primera derivada de la ecuación donde tenemos el resultado siguiente:

$$0 = -2 * 0.0082x + 0.1652$$

$$x = \frac{0.1652}{2 * 0.0082}$$

$$x = \mathbf{10.07 \%}$$

Obteniendo la humedad óptima, volvemos a la ecuación principal y reemplazamos este valor para encontrar nuestra densidad máxima que correspondería a tal humedad:

$$y = -0.0082(10.07)^2 + 0.1652(10.07) + 1.1421$$

$$y = 1.97 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 26. Resultados compactación ladrillo 3%

Resultados	
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.97
Humedad óptima (%)	10.07

Fuente. Elaboración propia

- **Contenido de ladrillo: 6%**

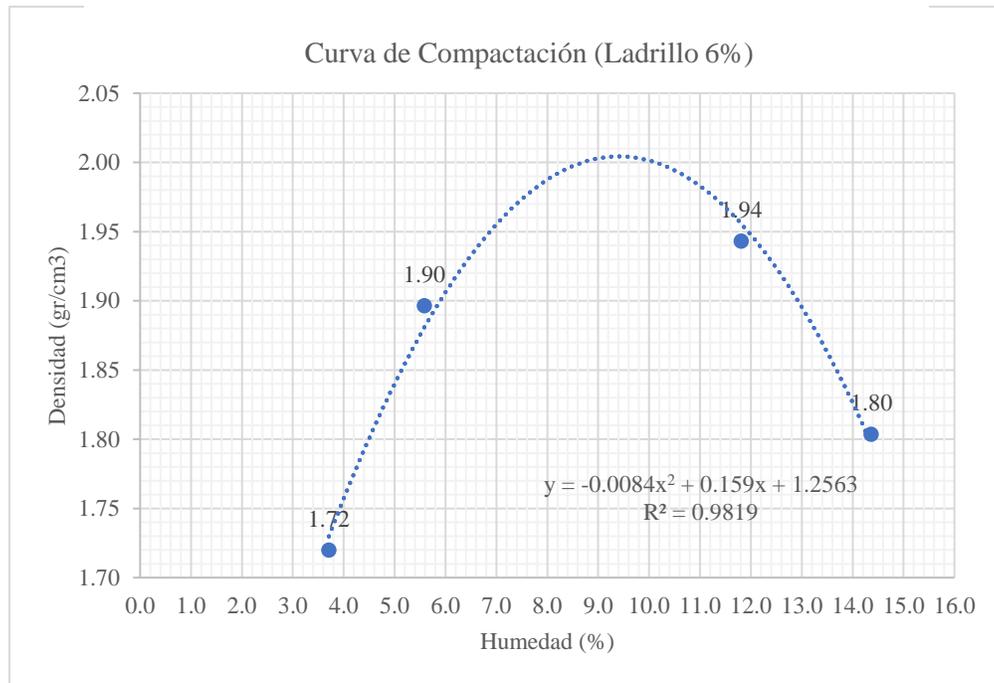
Tabla 27. Planilla compactación ladrillo 6%

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10295	10763	11128	10892
Capsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	102.26	100.26	135.26	119.23
Peso suelo seco + cápsula (gr)	99.23	95.62	123.00	106.25
Peso de la cápsula (gr)	17.52	12.54	19.24	15.90
Peso del molde (gr)	6475			
Volumen de la muestra (cm ³)	2141.80			
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10295	10763	11128	10892
Peso del molde (gr)	6475	6475	6475	6475
Peso suelo húmedo (gr)	3820	4288	4653	4417
Volumen de la muestra (cm ³)	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.78	2.00	2.17	2.06
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	102.26	100.26	135.26	119.23
Peso suelo seco + cápsula (gr)	99.23	95.62	123.00	106.25
Peso del agua (gr)	3.03	4.64	12.26	12.98
Peso de la cápsula (gr)	17.52	12.54	19.24	15.90
Peso suelo seco (gr)	81.71	83.08	103.76	90.35
Contenido de humedad (%)	3.71	5.58	11.82	14.37
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.72	1.90	1.94	1.80

Fuente. Elaboración propia

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 12. Curva de compactación ladrillo 6%



Fuente. Elaboración Propia

$$y = -0.0084x^2 + 0.159x + 1.2563$$

y = Densidad (gr/cm³)

x = Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe encontrar la primera derivada de la ecuación donde tenemos el resultado siguiente:

$$0 = -2 * 0.0084x + 0.159$$

$$x = \frac{0.159}{2 * 0.0084}$$

$$x = 9.46 \%$$

$$y = -0.0084(9.46)^2 + 0.159 * 9.46 + 1.2563$$

$$y = 2.01 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 28. Resultados compactación ladrillo 6%

Resultados	
Densidad máxima (gr/cm ³)	2.01
Humedad óptima (%)	9.46

Fuente. Elaboración propia

- **Contenido de ladrillo: 9%**

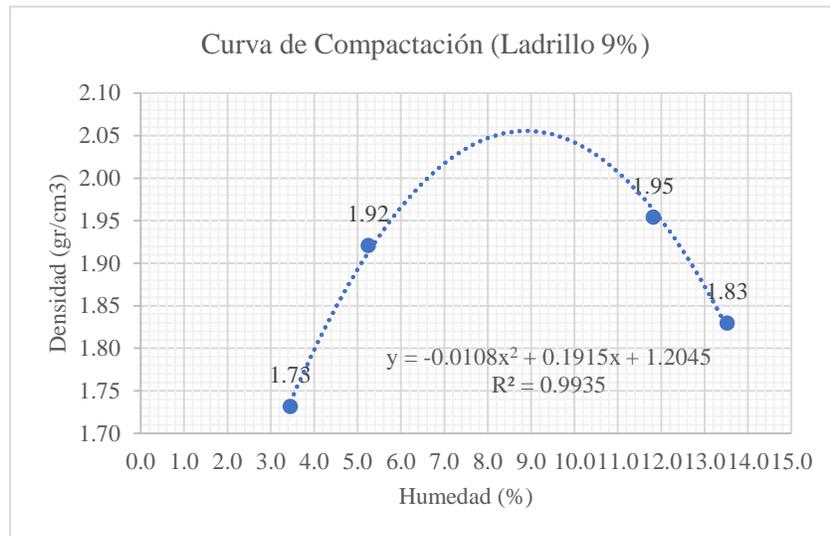
Tabla 29. Planilla compactación ladrillo 9%

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	10312	10805	11155	10923
Capsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula	124.26	112.23	115.36	108.69
Peso suelo seco + cápsula	120.72	107.26	105.19	98.10
Peso de la cápsula	18.11	12.54	19.14	19.77
Peso del molde (gr)	6475			
Volumen de la muestra (cm ³)	2141.80			
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10312	10805	11155	10923
Peso del molde (gr)	6475	6475	6475	6475
Peso suelo húmedo (gr)	3837	4330	4680	4448
Volumen de la muestra (cm ³)	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.79	2.02	2.19	2.08
Capsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	124.26	112.23	115.36	108.69
Peso suelo seco + cápsula (gr)	120.72	107.26	105.19	98.10
Peso del agua (gr)	3.54	4.97	10.17	10.59
Peso de la cápsula (gr)	18.11	12.54	19.14	19.77
Peso suelo seco (gr)	102.61	94.72	86.05	78.33
Contenido de humedad (%)	3.45	5.25	11.82	13.52
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.73	1.92	1.95	1.83

Fuente. Elaboración propia

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 13. Curva de compactación ladrillo 9%



Fuente. Elaboración propia

Ecuación obtenida de la curva:

$$y = -0.0108x^2 + 0.1915x + 1.2045$$

Donde:

y = Densidad (gr/cm³)

x = Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe encontrar la primera derivada de la ecuación donde tenemos el resultado siguiente:

$$0 = -2 * 0.0108x + 0.1915$$

$$x = \frac{0.1915}{2 * 0.0108}$$

$$x = \mathbf{8.87\%}$$

Obteniendo la humedad óptima, volvemos a la ecuación principal y reemplazamos este valor para encontrar nuestra densidad máxima que correspondería a tal humedad:

$$y = -0.0108(8.87)^2 + 0.1915 * 8.87 + 1.2045$$

$$y = 2.05 \text{ gr/cm}^3$$

Resultados finales de compactación T 180:

Tabla 30. Resultados compactación ladrillo 9%

Resultados	
Densidad máxima (gr/cm ³)	2.05
Humedad óptima (%)	8.87

Fuente. Elaboración Propia

Figura 21. Suelo y ladrillo para compactación



Fuente. Elaboración propia

3.5.7. Ensayo de CBR de suelo + ladrillo

Se realizó el ensayo de CBR para nuestro suelo con la adición de ladrillo de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima también con los porcentajes de ladrillo propuestos y así incluyendo los resultados obtenidos y las planillas de ensayo CBR se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (13.569 * x) + 0.9293$$

y = Carga (kg)

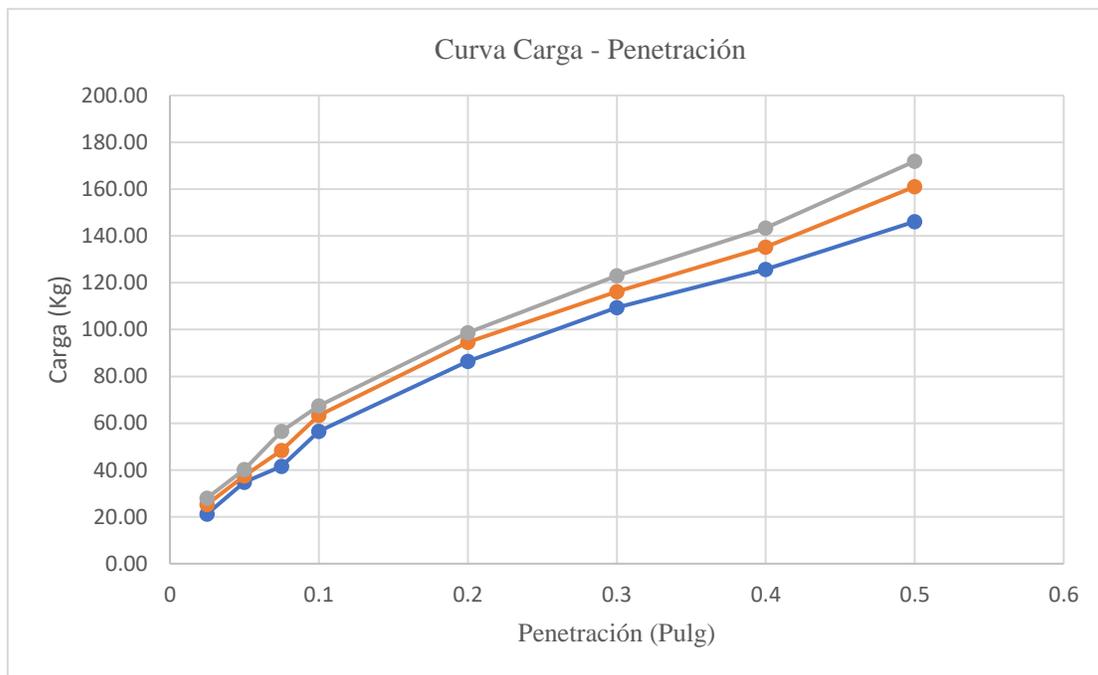
x = Penetración (mm)

Tabla 31. Resultados CBR suelo y ladrillo 3%.

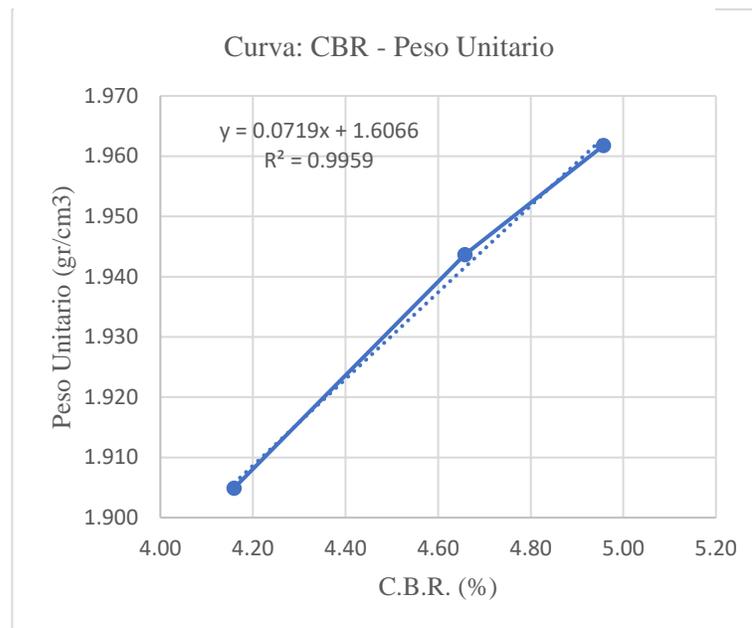
CBR (%)	Peso Unitario (gr/cm³)
4.16	1.91
4.66	1.94
4.96	1.96

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 14. Curva “Carga-Penetración” suelo + ladrillo 3%



Fuente. Elaboración propia

Gráfico 15. Curva “CBR-Peso unitario” suelo + ladrillo 3%

Fuente. Elaboración propia

Considerando la gráfica 15. se extrae los coeficientes de la formula lineal:

Aplicando la fórmula:

$$CBR_{100\%} = \frac{\text{Peso unitario} - \text{Coeficiente B}}{\text{Coeficiente A}}$$

Dando como resultado:

$$CBR_{100\%} = 5.11 \%$$

Tabla 32. Resultados de expansión

	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Expansión (%) Inicial (0 días)	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Expansión (%) Final (4 días)	3.19 %	2.99 %	2.81 %

Fuente. Elaboración propia

Este es el resultado de una planilla de CBR con la adición del ladrillo al 3%, respetando la norma ASTM D1883 AASHTO T193 para obtener resultados más fiables, las demás planillas de suelo y ladrillo en dicho porcentaje se encuentran en el apartado anexos. Además, se analizará los resultados estadísticamente en el capítulo 4.

3.6. Ensayos con vidrio molido

3.6.1. Molienda del vidrio

Se obtuvo el material de las vidrierías del Barrio La Loma de la ciudad de Tarija, pudiendo adquirir aproximadamente 60000 gramos a manera de reciclado ya que no tuvo ningún costo, es así que se tiene lo necesario para realizar nuestras pruebas de laboratorio y de esta forma realizar la investigación.

De esta manera se procedió luego a la molienda del mismo adjuntando algunas imágenes para el registro del mismo:

Figura 22. Molienda del vidrio



Fuente. Elaboración propia

Se realizó el triturado manual del vidrio con la ayuda de un martillo y procurando que las partículas oscilen alrededor del diámetro del tamiz N° 4 y menores diámetros para los ensayos necesarios, para eso se tuvo que utilizar una energía considerable ya que el vidrio tiene más resistencia o dureza que el ladrillo y tiene un mayor uso de energía, lo cual se recomienda que se tenga mucho cuidado al momento de realizarlo ya que tiende a saltar al golpe y es peligroso que pueda incrustarse en la piel, ojos o algún daño peor, es por eso que se hizo la molienda de forma manual cuidadosamente para luego llevarlo al laboratorio y tamizarlo para poder tener los diámetro de partícula obtenidos y así clasificarlos para nuestros ensayos correspondientes.

Figura 23. Proceso de molienda del vidrio



Fuente. Elaboración propia

Se realizó la molienda de 42000 gramos de vidrio aproximadamente ayudandonos de una balanza colgante el cual nos fue de mucha ayuda para observar el avance que teniamos en cuanto a la molienda, se recalca tambien que se tuvo una cantidad de perdidas ya que al ser golpeado con el martillo salian disparados algunas partículas de vidrio, para esto se utilizó una base de piedra y consiguiente un pedazo de nylon para tratar de amortiguar un poco el golpe del martillo contra el vidrio.

Figura 24. Pesaje del vidrio molido



Fuente. Elaboración propia

Cabe recalcar que toda la molienda del vidrio fue de manera manual, con solo uso de martillo, bolsas de nylon para guardar el material molido, y un batan que nos sirvio de base para

realizar el molido, como anexo teniamos la balanza pero no era necesario ya que se puede hacer el pesaje en el laboratorio con mas precision. Además remarcar el cuidado de que el vidrio no salga disparado al momento de golpearlo, ya que estos pueden llegar al cuerpo o a los ojos los cuales se debe tener mucho cuidado.

Figura 25. Tamaños de partículas del vidrio



Fuente. Elaboración propia

Al haber terminado la molienda, se llevo el material al laboratorio para tamizarlo y hacer una granulometría igual que el suelo arcilloso para poder obtener una curva granulométrica, cabe recalcar que antes de esto se peso 42000 gramos de vidrio molido para que a partir de aquí tengamos la curva granulométrica y respectivos pesos para el llenado de planilla.

3.6.2. Partículas planas y alargadas en el vidrio

Como se mencionó de igual manera en el apartado de partículas planas y alargadas para el ladrillo, al haber terminado la molienda, se llevo el material al laboratorio para tamizarlo y a su vez tener en cuenta el detalle de la relacion maxima de ancho, largo, espesor de particulas

de 1:3:1 , tambien aclarando en esta parte que la relacion entre ancho y largo sea de 1:3, y de esta manera descartar las partículas que apróximadamente se sobrepasen esta relación establecida, reiterar y recalcar que esta inspección fue visual y que se aplicó despues de tamizar el aditivo, luego se procedio a descartar partículas que se encuentren lejos de cumplir esta condición para que obtengamos nuestros pesos requeridos para nuestros ensayos, de la misma manera se procedió anteriormente para el ladrillo, ya que estamos comparando los resultados de estos aditivos y debemos tener las mismas condiciones para ambos materiales de adición.

3.6.3. Granulometría del vidrio

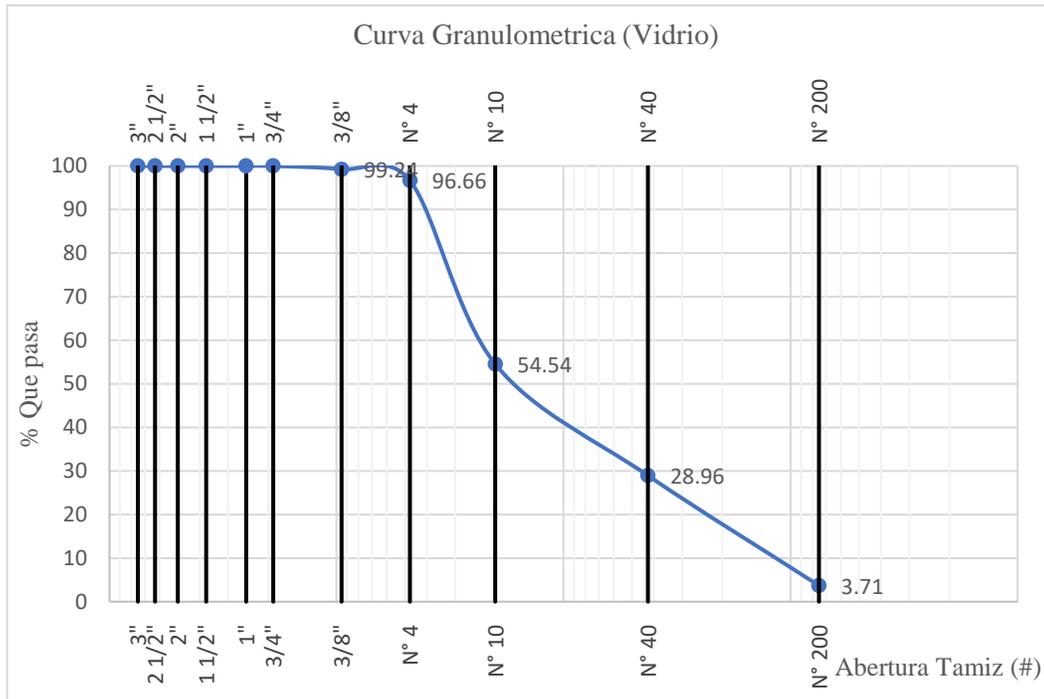
El ensayo de granulometría se hizo según la norma ASTM D422 AASHTO T88, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, la cual nos ayudó a obtener nuestra finura de molido utilizando la planilla de la granulometría del suelo dando así los siguientes resultados:

Peso inicial = 42000 gramos

Tabla 33. Planilla de granulometría del vidrio

Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	320.37	320.37	0.76	0.76	99.24
N° 4	4.75	1081.26	1401.63	2.57	3.34	96.66
N° 10	2.00	17690.96	19092.59	42.12	45.46	54.54
N° 40	0.425	10745.59	29838.19	25.58	71.04	28.96
N° 200	0.075	10605.71	40443.89	25.25	96.29	3.71
Base		1556.11		3.71	100.00	
TOTAL		42000.00		100.00		

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 16. Curva granulométrica del vidrio

Fuente. Elaboración propia

Luego de separar las partículas y seleccionar cuales usaremos, se comenzó a preparar el material para los ensayos, y para eso tanto el suelo como el vidrio molido lo introducimos en el horno que se encuentra en laboratorio para quitar la humedad solo por 24 horas ya que el vidrio es prácticamente impermeable, y tendría poco o nulo contenido de agua pero para asegurarnos realizamos el procedimiento anterior.

Tabla 34. Pesos aplicados para los ensayos

Ensayo	Peso para el ensayo	Abertura tamiz
Límite líquido y plástico	3000 gramos	Pasa N° 40 – Retiene N° 200
Compactación Proctor Modificado	1500 gramos	Pasa N° 4 – Retiene N° 10
CBR	13500 gramos	Pasa N° 4 – Retiene N° 10

Fuente. Elaboración propia

Debemos tener en cuenta que se descartó las partículas que pasan el tamiz N° 200, ya que está considerado como polvo de vidrio y no está tomado en cuenta para nuestra investigación.

3.6.4. Límite líquido suelo + vidrio

Para el primer ensayo se hizo la mezcla de suelo y vidrio molido y de acuerdo a la norma ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, respetando el número de tamiz y demás consideraciones para el suelo fino, se procedió al ensayo de límite líquido:

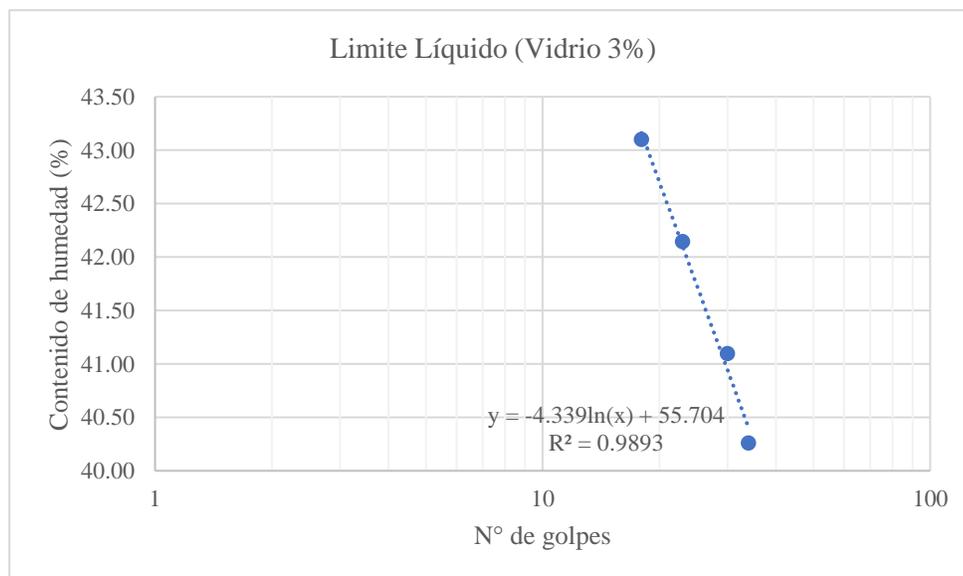
- **Contenido de vidrio = 3%**

Tabla 35. Planilla de limite liquido vidrio 3%

Capsula	1	2	3	4
N° de golpes	18	23	30	34
Suelo húmedo + cápsula (gr)	27.48	28.88	29.65	28.74
Suelo seco + cápsula (gr)	22.95	24.05	24.78	24.11
Peso del agua (gr)	4.53	4.83	4.87	4.63
Peso de la cápsula	12.44	12.59	12.93	12.61
Peso del suelo seco (gr)	10.51	11.46	11.85	11.50
Contenido de humedad (%)	43.10	42.15	41.10	40.26

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 17. Límite líquido vidrio 3%



Fuente. Elaboración propia

$$y = -4.339 \ln(x) + 55.704$$

$y =$ Contenido de humedad (%)

$x =$ N° de golpes (adimensional)

$$y = -4.339 \ln(25) + 55.704$$

$$\text{Límite líquido}_{V-3\%} = 41.74 \%$$

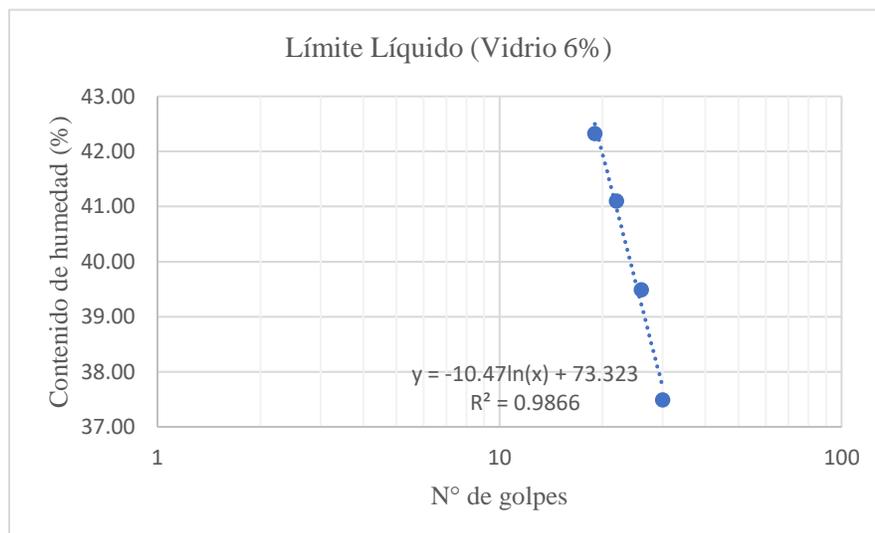
- **Contenido de vidrio = 6%**

Tabla 36. Planilla límite líquido vidrio 6%

Cápsula	1	2	3	4
N° de golpes	19	22	26	30
Suelo húmedo + cápsula (gr)	29.80	30.20	27.47	28.07
Suelo seco + cápsula (gr)	24.59	25.12	23.15	23.89
Peso del agua (gr)	5.21	5.08	4.32	4.18
Peso de la cápsula	12.28	12.76	12.21	12.74
Peso del suelo seco (gr)	12.31	12.36	10.94	11.15
Contenido de humedad (%)	42.32	41.10	39.49	37.49

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 18. Límite líquido vidrio 6%



Fuente. Elaboración propia

$$y = -10.47 \ln(x) + 73.323$$

$y =$ Contenido de humedad (%)

$x =$ N° de golpes (adimensional)

$$y = -10.47 \ln(25) + 73.323$$

$$\text{Límite líquido}_{V-6\%} = 39.62\%$$

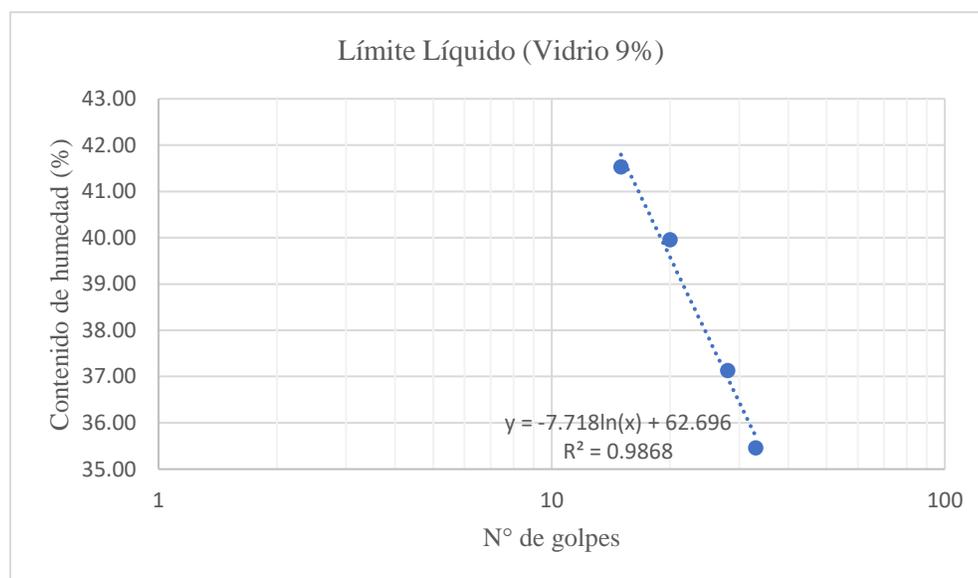
- **Contenido de vidrio = 9%**

Tabla 37. Planilla límite líquido vidrio 9%

Cápsula	1	2	3	4
N° de golpes	15	20	28	33
Suelo húmedo + cápsula (gr)	35.15	34.93	29.01	27.54
Suelo seco + cápsula (gr)	30.15	30.12	25.06	23.76
Peso del agua (gr)	5.00	4.81	3.95	3.78
Peso de la cápsula	18.11	18.08	14.42	13.10
Peso del suelo seco (gr)	12.04	12.04	10.64	10.66
Contenido de humedad (%)	41.53	39.95	37.12	35.46

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 19. Límite líquido vidrio 9%



Fuente. Elaboración propia

$$y = -7.718 \ln(x) + 62.696$$

Donde:

y = Contenido de humedad (%)

x = N° de golpes (adimensional)

$$y = -7.718 \ln(25) + 62.696$$

$$\mathbf{Limite\ liquido}_{V-9\%} = \mathbf{37.85\ \%}$$

De esta manera se completó los ensayos de límite líquido en los 3 porcentajes propuestos, y así se realizará un análisis de los resultados en un apartado siguiente.

3.6.5. Límite plástico suelo + vidrio

El ensayo de límite plástico de suelo adicionado con vidrio se lo hizo según la norma ASTM D4318 AASHTO T90, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, donde se tiene la siguiente planilla:

- **Contenido de vidrio = 3%**

Tabla 38. Límite plástico vidrio 3%

Cápsula	1	2	3
Suelo húmedo + cápsula (gr)	13.09	13.36	13.56
Suelo seco + cápsula (gr)	12.97	13.23	13.46
Peso del agua (gr)	0.12	0.13	0.10
Peso de la cápsula	12.38	12.59	12.95
Peso del suelo seco (gr)	0.59	0.64	0.51
Contenido de humedad (%)	20.34	20.31	19.61
Límite plástico (%)	20.09		

Fuente. Elaboración propia

$$\mathbf{Límite\ plástico}_{V-3\%} = \mathbf{20.09\ \%}$$

$$IP = LL - LP$$

IP=Índice de plasticidad (%)

LL=Límite líquido (%)

IP=Límite plástico (%)

$$IP = 41.74\% - 20.09\%$$

$$IP = 21.65\%$$

- Contenido de vidrio = 6%

Tabla 39. Límite plástico vidrio 6%

Cápsula	1	2	3
Suelo húmedo + cápsula (gr)	13.31	13.54	17.69
Suelo seco + cápsula (gr)	13.11	13.39	17.56
Peso del agua (gr)	0.20	0.15	0.13
Peso de la cápsula	12.08	12.59	16.90
Peso del suelo seco (gr)	1.03	0.80	0.66
Contenido de humedad (%)	19.42	18.75	19.70
Límite plástico (%)	19.29		

Fuente. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico}_{V-6\%} = 19.29\%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

LL=Límite líquido (%)

IP=Límite plástico (%)

$$IP = 39.62\% - 19.29\%$$

$$IP = 20.33\%$$

- **Contenido de vidrio = 9%**

Tabla 40. Límite plástico vidrio 9%

Cápsula	1	2	3
Suelo húmedo + cápsula (gr)	14.27	21.36	15.31
Suelo seco + cápsula (gr)	14.05	21.12	15.10
Peso del agua (gr)	0.22	0.24	0.21
Peso de la cápsula	12.90	19.79	13.93
Peso del suelo seco (gr)	1.15	1.33	1.17
Contenido de humedad (%)	19.13	18.05	17.95
Límite plástico (%)	18.37		

Fuente. Elaboración propia

$$\text{Limite plástico}_{L-9\%} = 18.37\%$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP=Índice de plasticidad (%)

LL=Límite líquido (%)

LP=Límite plástico (%)

$$IP = 37.85\% - 18.37\%$$

$$IP = 19.48\%$$

Figura 26. Suelo y vidrio



Fuente. Elaboración propia

En la figura anterior se tienen los porcentajes añadidos al suelo los cuales se usaron para el ensayo de límite líquido y límite plástico, de esta manera respetando la norma para los límites, se hizo este ensayo con resultados que se analizarán más adelante.

3.6.6. Ensayo de compactación “Proctor Modificado T-180” suelo + vidrio

El ensayo de compactación Proctor Modificado de suelo adicionado con vidrio se hizo según la norma ASTM D22 AASHTO T180, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, donde obtuvimos los siguientes resultados de las muestras ensayadas:

- **Contenido de vidrio: 3%**

Tabla 41. Planilla de ensayo de compactación vidrio 3%

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde(gr)	10279	10773	11132	10847
Capsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula(gr)	102.23	114.22	95.63	126.56
Peso suelo seco + cápsula(gr)	99.52	108.86	85.95	112.03
Peso de la cápsula(gr)	12.54	12.49	10.36	19.77
Peso del molde(gr)	6475			
Volumen de la muestra (cm3)	2141.80			
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10279	10773	11132	10847
Peso del molde (gr)	6475	6475	6475	6475
Peso suelo húmedo (gr)	3804	4298	4657	4372
Volumen de la muestra (cm3)	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm3)	1.78	2.01	2.17	2.04
Capsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	102.23	114.22	95.63	126.56
Peso suelo seco + cápsula (gr)	99.52	108.86	85.95	112.03
Peso del agua (gr)	2.71	5.36	9.68	14.53
Peso de la cápsula (gr)	12.54	12.49	10.36	19.77
Peso suelo seco (gr)	86.98	96.37	75.59	92.26
Contenido de humedad (%)	3.12	5.56	12.81	15.75
Densidad suelo seco (gr/cm3)	1.72	1.90	1.93	1.76

Fuente. Elaboración propia

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

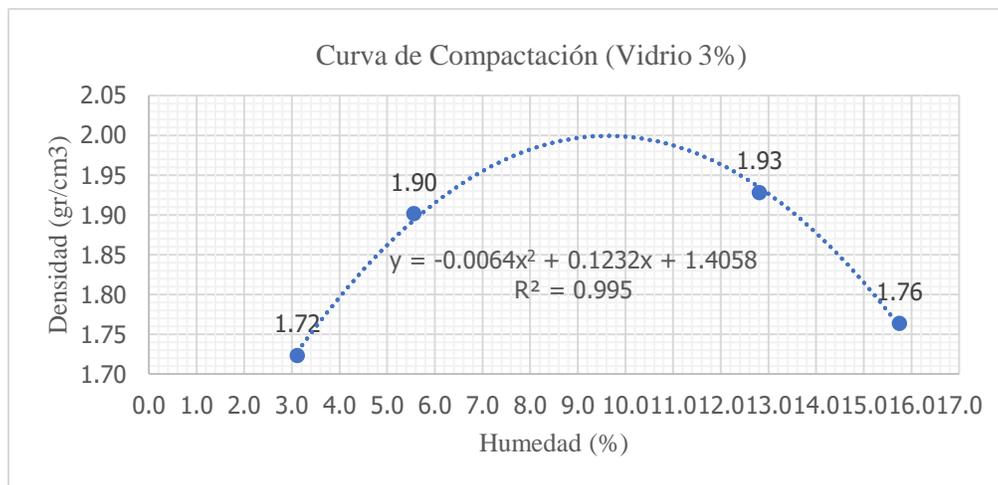
Ecuación obtenida de la curva:

$$y = -0.0064x^2 + 0.1232x + 1.4058$$

y = Densidad (gr/cm³)

x = Humedad (%)

Gráfico 20. Curva de compactación vidrio 3%



Fuente. Elaboración propia

Para encontrar la humedad óptima se debe encontrar la primera derivada de la ecuación donde tenemos el resultado siguiente:

$$0 = -2 * 0.0064x + 0.1232$$

$$x = \frac{0.1232}{2 * 0.0064}$$

$$x = 9.63 \%$$

$$y = -0.0082(10.07)^2 + 0.1652(10.07) + 1.1421$$

$$y = 2.00 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 42. Resultados ensayo de compactación vidrio 3%

Resultados	
Densidad máxima (gr/cm ³)	2.00
Humedad óptima (%)	9.63

Fuente. Elaboración propia

Luego continuamos con la obtención de las densidades y humedades óptimas con la adición de vidrio, pero en mayor porcentaje:

- **Contenido de vidrio: 6%**

Tabla 43. Planilla de ensayo de compactación vidrio 6%

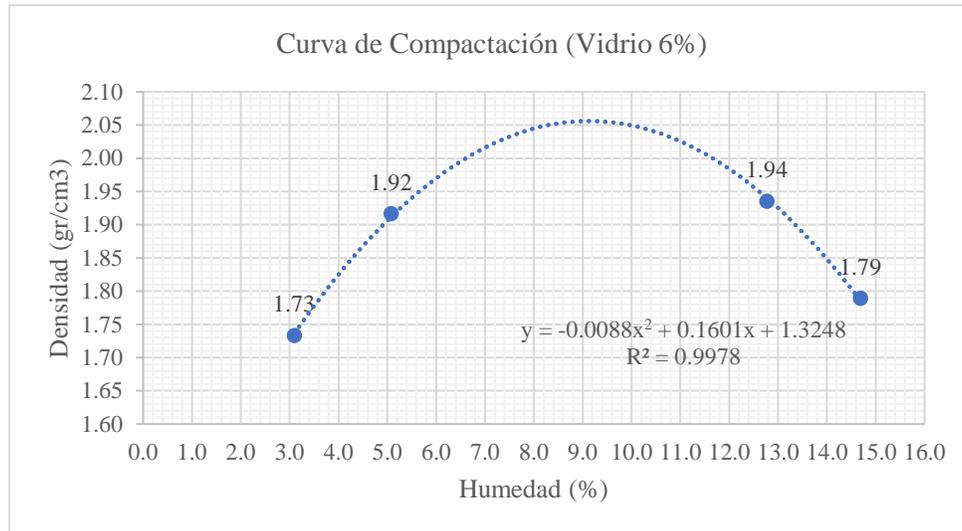
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10302	10788	11149	10869
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	95.23	119.58	124.31	106.69
Peso suelo seco + cápsula (gr)	92.94	114.76	111.65	95.54
Peso de la cápsula (gr)	18.95	19.87	12.54	19.63
Peso del molde (gr)	6475			
Volumen de la muestra (cm ³)	2141.80			
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10302	10788	11149	10869
Peso del molde (gr)	6475	6475	6475	6475
Peso suelo húmedo (gr)	3827	4313	4674	4394
Volumen de la muestra (cm ³)	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.79	2.01	2.18	2.05
Capsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula (gr)	95.23	119.58	124.31	106.69
Peso suelo seco + capsula (gr)	92.94	114.76	111.65	95.54
Peso del agua (gr)	2.29	4.82	12.66	11.15
Peso de la capsula (gr)	18.95	19.87	12.54	19.63
Peso suelo seco (gr)	73.99	94.89	99.11	75.91
Contenido de humedad (%)	3.10	5.08	12.77	14.69
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.73	1.92	1.94	1.79

Fuente. Elaboración propia

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Ecuación obtenida de la curva:

Gráfico 21. Curva de compactación vidrio 6%



Fuente. Elaboración propia

$$y = -0.0088x^2 + 0.1601x + 1.3248$$

y = Densidad (gr/cm³)

x = Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe encontrar la primera derivada de la ecuación donde tenemos el resultado siguiente:

$$0 = -2 * 0.0088x + 0.1601$$

$$x = \frac{0.1601}{2 * 0.0088}$$

$$x = 9.10 \%$$

Obteniendo la humedad óptima, volvemos a la ecuación principal y reemplazamos este valor:

$$y = -0.0088(9.10)^2 + 0.1601 * 9.10 + 1.3248$$

$$y = 2.05 \text{ gr/cm}^3$$

Resultados finales de compactación T 180:

Tabla 44. Resultados ensayo de compactación vidrio 6%

Resultados	
Densidad máxima (gr/cm ³)	2.05
Humedad óptima (%)	9.10

Fuente. Elaboración propia

- **Contenido de vidrio: 9%**

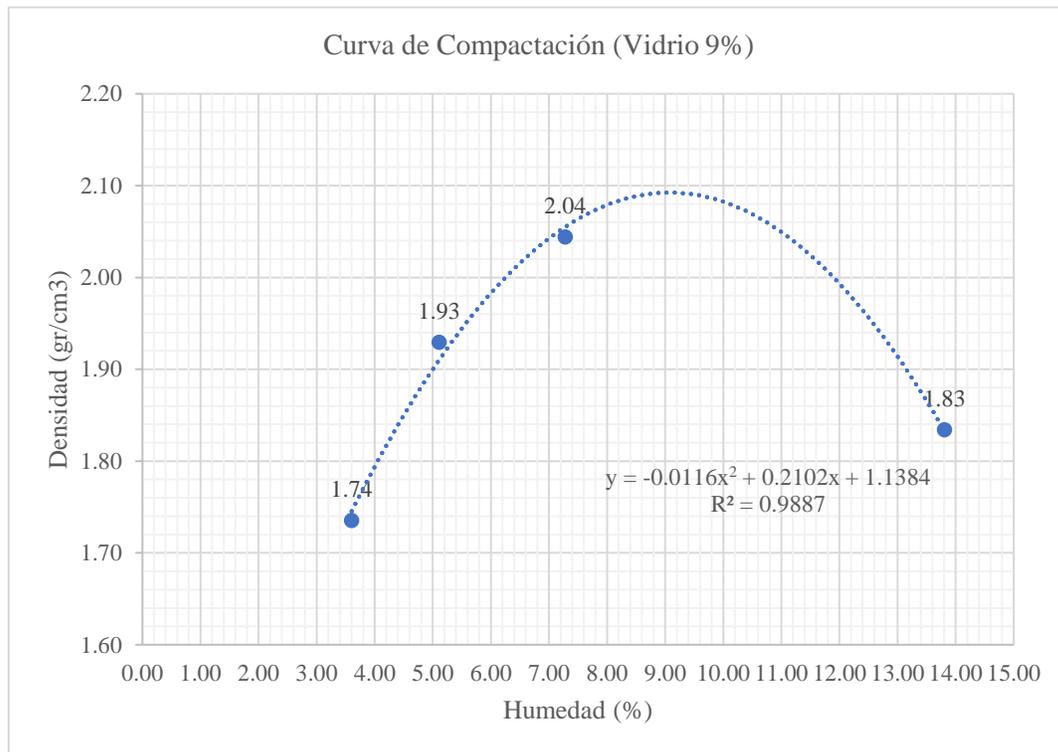
Tabla 45. Planilla de ensayo de compactación vidrio 9%

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10326	10819	11172	10945
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	108.65	95.63	124.32	103.25
Peso suelo seco + cápsula (gr)	105.56	91.48	116.92	93.00
Peso de la cápsula (gr)	19.76	10.25	15.24	18.75
Peso del molde (gr)	6475			
Volumen de la muestra (cm ³)	2141.80			
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	10326	10819	11172	10945
Peso del molde (gr)	6475	6475	6475	6475
Peso suelo húmedo (gr)	3851	4344	4697	4470
Volumen de la muestra (cm ³)	2141.80	2141.80	2141.80	2141.80
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.80	2.03	2.19	2.09
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	108.65	95.63	124.32	103.25
Peso suelo seco + cápsula (gr)	105.56	91.48	116.92	93.00
Peso del agua (gr)	3.09	4.15	7.40	10.25
Peso de la cápsula (gr)	19.76	10.25	15.24	18.75
Peso suelo seco (gr)	85.80	81.23	101.68	74.25
Contenido de humedad (%)	3.60	5.11	7.28	13.80
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.74	1.93	2.04	1.83

Fuente. Elaboración propia

Como resultado de este ensayo de compactación se obtuvo la gráfica de relación de peso unitario – humedad en los suelos, método modificado, mostrado a continuación:

Gráfico 22. Curva de compactación vidrio 9%



Fuente. Elaboración propia

Ecuación obtenida de la curva:

$$y = -0.0116x^2 + 0.2102x + 1.1384$$

Donde:

y = Densidad (gr/cm³)

x = Humedad (%)

Para encontrar la humedad óptima se debe encontrar la primera derivada de la ecuación donde tenemos el resultado siguiente:

$$0 = -2 * 0.0116x + 0.2102$$

$$x = \frac{0.2102}{2 * 0.0116}$$

$$x = 9.06 \%$$

Obteniendo la humedad óptima, volvemos a la ecuación principal y reemplazamos este valor para encontrar nuestra densidad máxima q correspondería a tal humedad:

$$y = -0.0116(9.06)^2 + 0.2102 * 9.06 + 1.1384$$

$$y = 2.09 \text{ gr/cm}^3$$

Resultados finales de compactación T 180:

Tabla 46. Resultados ensayo de compactación vidrio 9%

Resultados	
Densidad máxima (gr/cm ³)	2.09
Humedad óptima (%)	9.06

Fuente. Elaboración propia

3.6.7. Ensayo de CBR suelo + vidrio

Se realizó el ensayo de CBR para nuestro suelo con la adición de vidrio de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima también con los porcentajes de vidrio propuestos y así incluyendo los resultados obtenidos y las planillas de ensayo CBR se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (13.569 * x) + 0.9293$$

Donde:

y = Carga (kg)

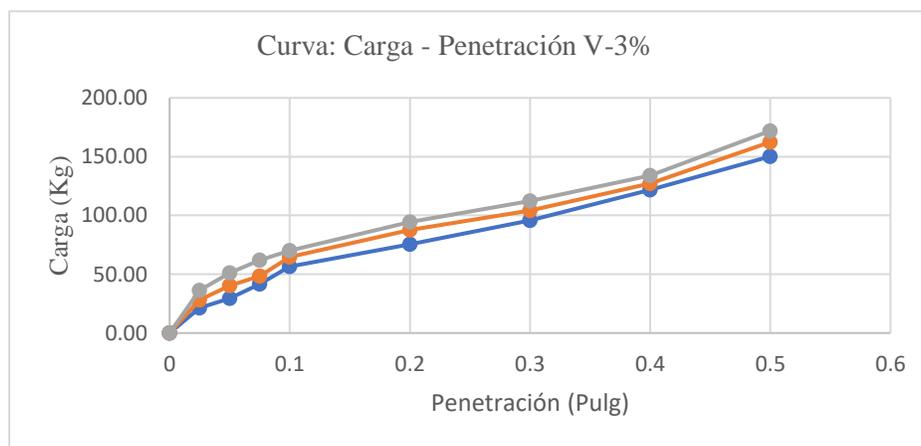
x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga: 19.3548 cm²

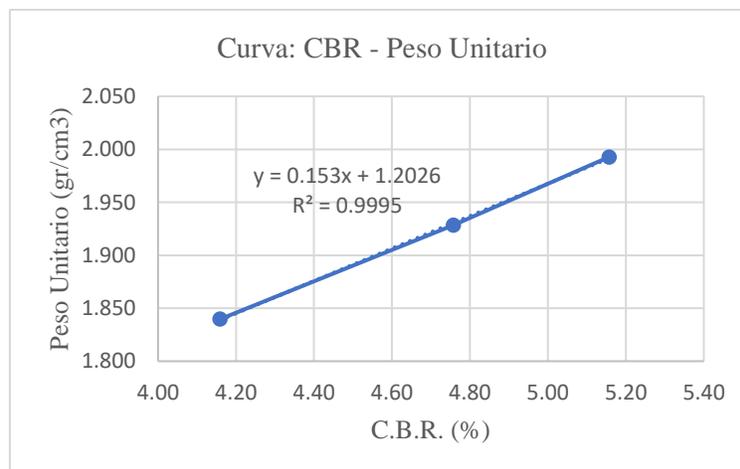
Tabla 47. Resultados CBR suelo y vidrio 3%

CBR (%)	Peso unitario (gr/cm³)
4.16	1.84
4.76	1.93
5.16	1.99

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 23. Curva “Carga-Penetración” suelo + vidrio 3%

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 24. Curva “CBR-Peso Unitario” suelo + vidrio 3%

Fuente. Elaboración propia

Considerando la gráfica 23. se extrae los coeficientes de la formula lineal:

Coeficiente A:0.153

Coeficiente B:1.2026

Aplicando la fórmula:

$$CBR_{100\%} = \frac{\text{Peso unitario} - \text{Coeficiente B}}{\text{Coeficiente A}}$$

Dando como resultado:

$$CBR_{100\%} = 5.11 \%$$

La expansión se midió de la siguiente manera:

Tabla 48. Expansión suelo y vidrio 3%

	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Expansión (%) inicial (0 días)	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Expansión (%) final (4 días)	3.10 %	2.90 %	2.70 %

Fuente. Elaboración propia

Este es el resultado de una planilla de CBR con la adición del vidrio al 3%, respetando la norma ASTM D1883 AASHTO T193 para obtener resultados más fiables, las demás planillas de suelo y vidrio en dicho porcentaje se encuentran en el apartado anexos. Además, se analizará los resultados estadísticamente en el capítulo 4.

CAPÍTULO IV
PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN
DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE DATOS

Se realizará el análisis estadístico que nos llevará a la confiabilidad de los resultados del valor CBR donde usamos como aditivos el vidrio y el ladrillo.

Para dicha validación tomaremos el método de “diferencias de medias muestrales”, más propiamente el modelo de distribución “t de student”.

4.1. Resultados para el inicio del tratamiento estadístico correspondiente

Tabla 49. Resultados para inicio de tratamiento estadístico

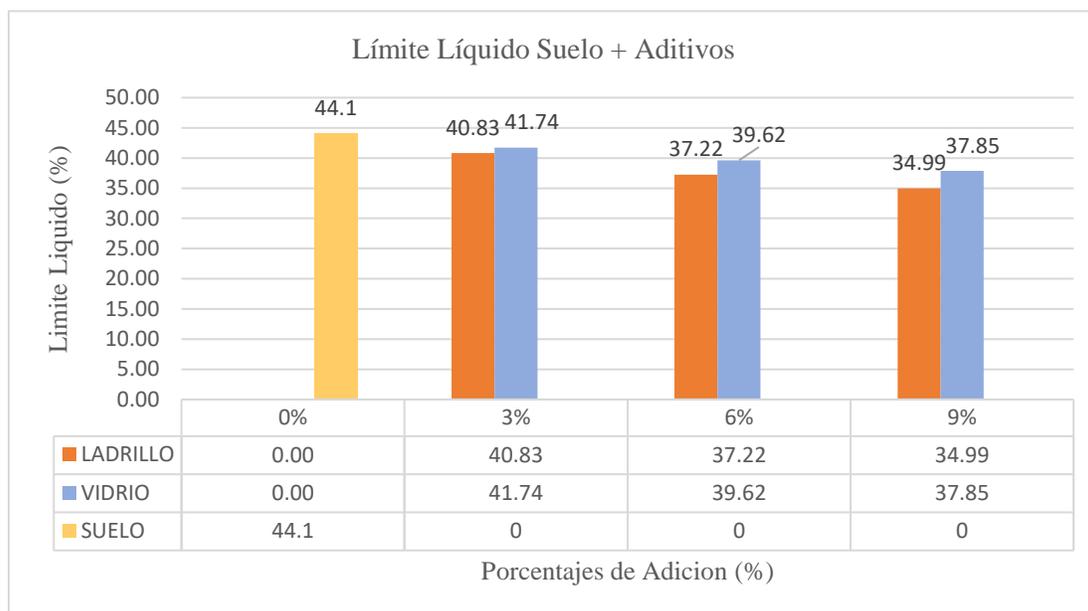
N°	Aditivo	Porcentajes de adición (%)	CBR (%)	N°	Aditivo	Porcentajes de adición (%)	CBR (%)
1	LADRILLO	3%	5.11	16	VIDRIO	3%	5.20
2			5.11	17			5.22
3			5.09	18			5.21
4			5.08	19			5.18
5			5.13	20			5.19
6		6%	5.28	21		6%	5.54
7			5.28	22			5.48
8			5.33	23			5.53
9			5.29	24			5.53
10			5.35	25			5.53
11		9%	5.46	26		9%	5.81
12			5.52	27			5.84
13			5.49	28			5.83
14			5.52	29			5.80
15			5.55	30			5.83

Fuente. Elaboración propia

4.2. Gráficos de comparación

4.2.1. Límite líquido

Gráfico 25. Límite líquido de suelo y aditivos



Fuente. Elaboración propia

En el gráfico anterior se muestra una comparación de los límites obtenidos con el suelo con aditivos y en su estado natural el cual claramente nos muestra una reducción de límite líquido con los 2 aditivos, el cual se resume en la siguiente tabla:

Tabla 50. Porcentaje de disminución de límite líquido

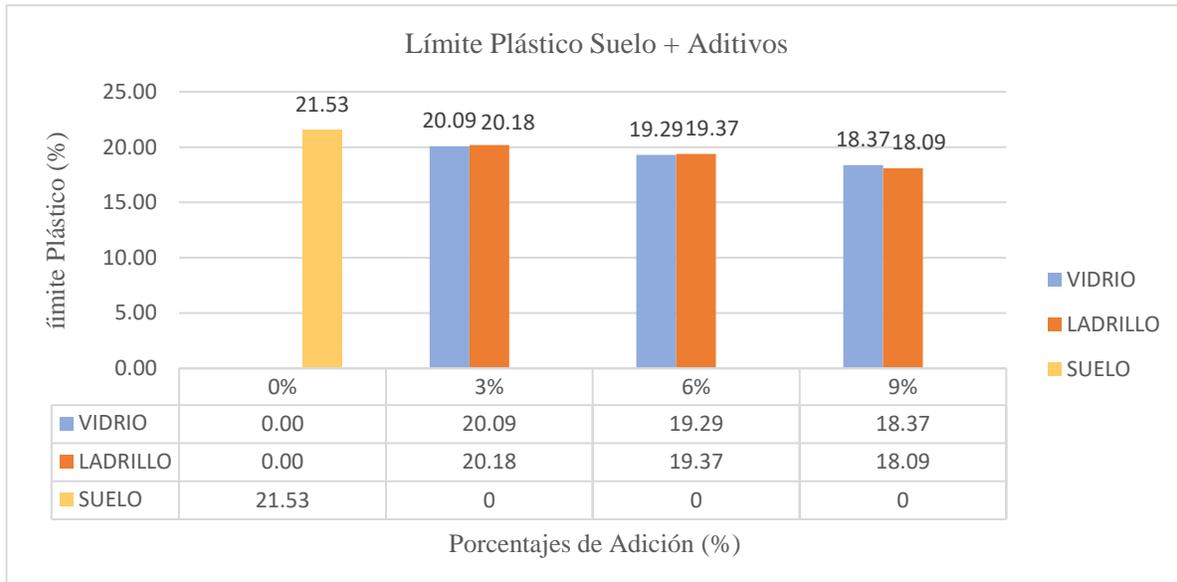
Porcentaje	Ladrillo	Vidrio
3%	-3.27	-2.36
6%	-6.88	-4.48
9%	-9.11	-6.25

Fuente. Elaboración propia

En esta caracterización de límite líquido tenemos que el ladrillo logra una mayor disminución que el vidrio, de esta manera valoraremos este resultado con el límite plástico para obtener un índice de plasticidad, el cual observaremos su reducción el cual sería ideal para saber si también su expansión se reduce.

4.2.2. Limite plástico

Gráfico 26. Límite plástico de suelo y aditivos



Fuente. Elaboración propia

En cuanto al límite plástico, se tiene en cuenta que la adición de ladrillo al suelo, hace que pierda más plasticidad que el vidrio en sí, es decir que el ladrillo adicionado al suelo hace perder más plasticidad al suelo que el vidrio como se observa en la tabla siguiente:

Tabla 51. Porcentaje de disminución de limite plástico

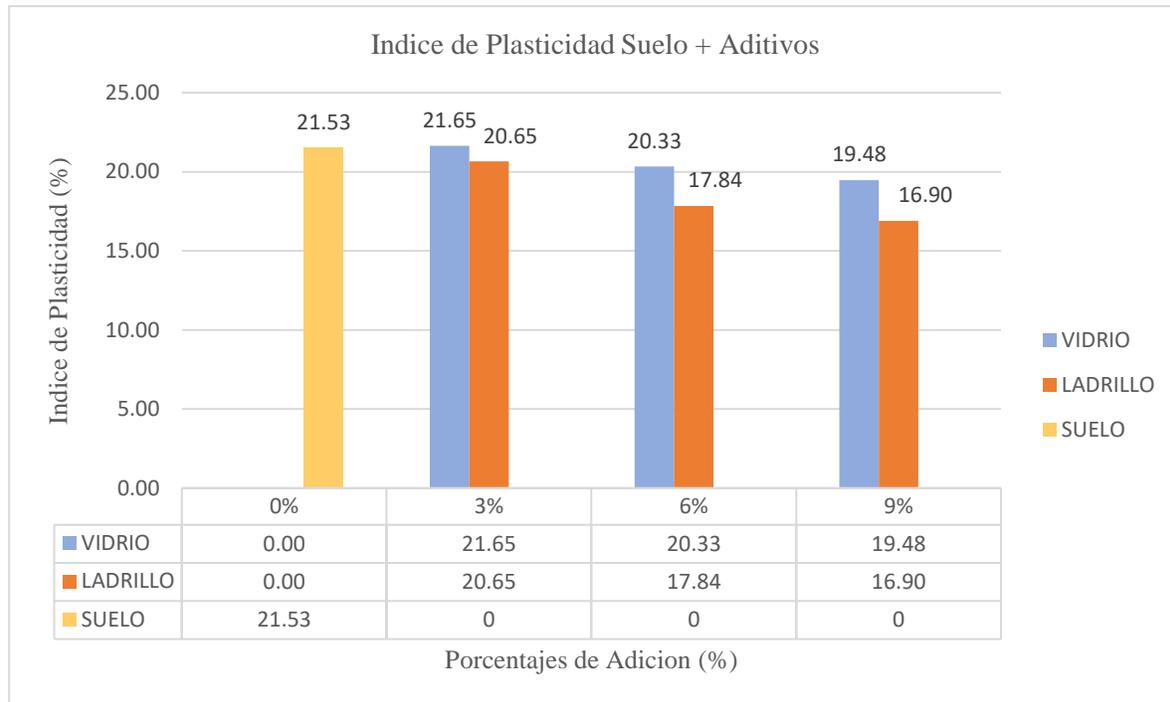
Porcentaje	Ladrillo	Vidrio
3%	-1.35	-1.44
6%	-2.16	-2.24
9%	-3.44	-3.16

Fuente. Elaboración propia

Como se observa la tabla, se tiene que el límite plástico se reduce en mayor valor finalmente en el ladrillo que repercutirá en el índice plástico que se observará a continuación.

4.2.3. Índice de plasticidad

Gráfico 27. Índice de plasticidad de suelo y aditivos



Fuente. Elaboración propia

El índice de plasticidad que se obtiene de acuerdo a los límites líquido y plástico de los suelos, se muestra en el gráfico anterior y claramente se observa que con ambos aditivos se tiene una reducción de este índice, pero es el ladrillo que tiene mayor presencia entre ambos aditivos, el cual se mostrará en la siguiente tabla.

Tabla 52. Porcentaje de reducción de índice de plasticidad

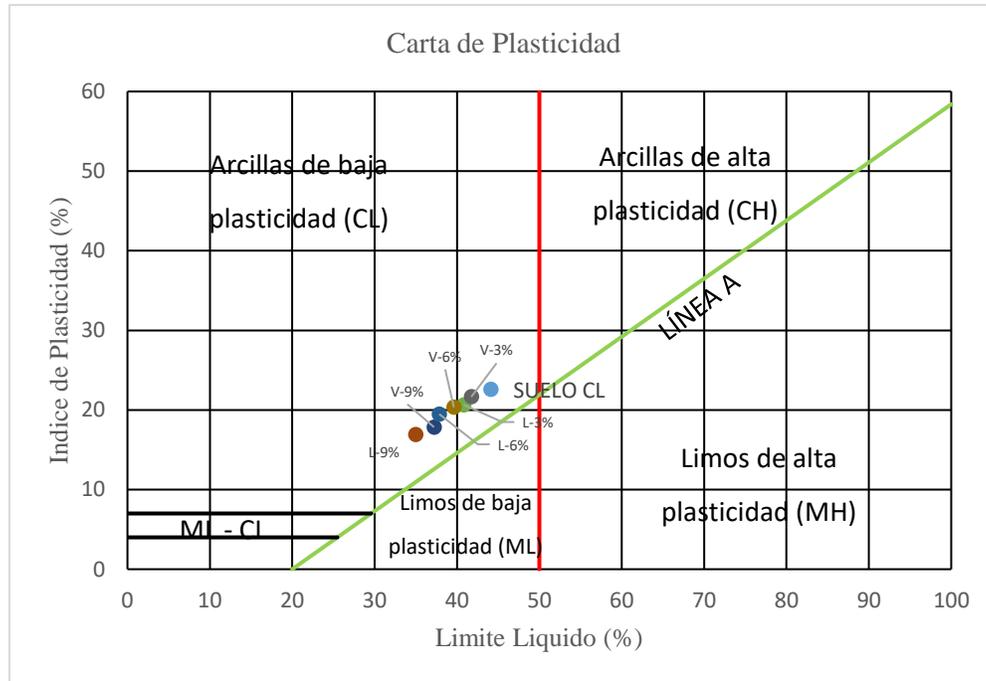
Porcentaje	Ladrillo	Vidrio
3%	-1.93	-0.93
6%	-4.74	-2.25
9%	-5.68	-3.10

Fuente. Elaboración propia

Como se observa la tabla, se tiene que el índice de plasticidad se reduce en mayor valor con el suelo y ladrillo, entonces de acuerdo a estos parámetros clasificaremos el suelo.

4.2.4. Clasificación del suelo

Gráfico 28. Clasificación de suelo con aditivos

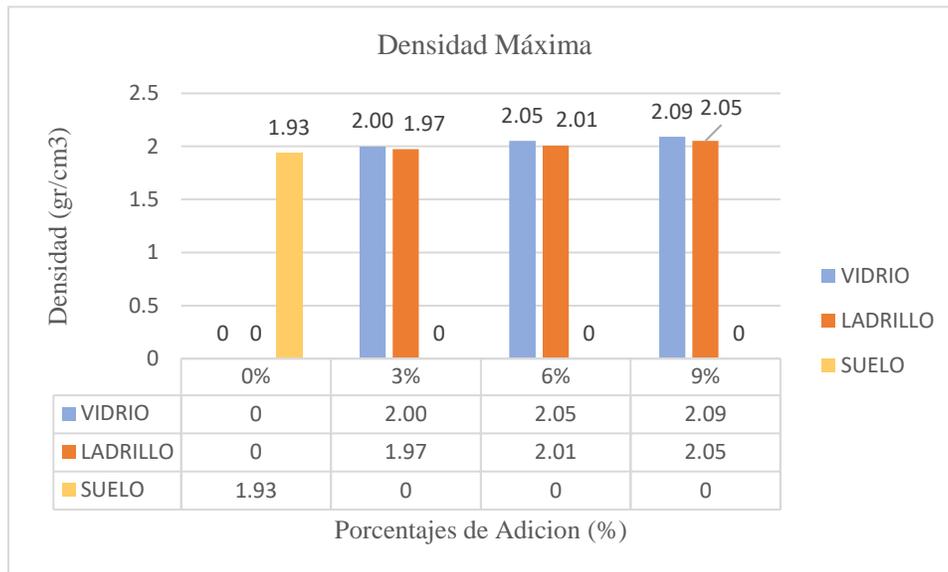


Fuente. Elaboración propia

En la clasificación se puede observar que los dos aditivos logran disminuir la plasticidad, pero el aditivo que tiene mayor efecto es el ladrillo sobre el vidrio.

4.2.5. Densidad máxima y humedad óptima

Para la densidad máxima obtenida con el ensayo de compactación T180, se tiene que el vidrio aporta a aumentar la densidad del suelo por encima del ladrillo, que también tiene el mismo aporte, pero en menor valor, es así que se tiene un gráfico con la representación de las densidades de acuerdo a sus porcentajes de adición:

Gráfico 29. Comparación de la densidad máxima

Fuente. Elaboración propia

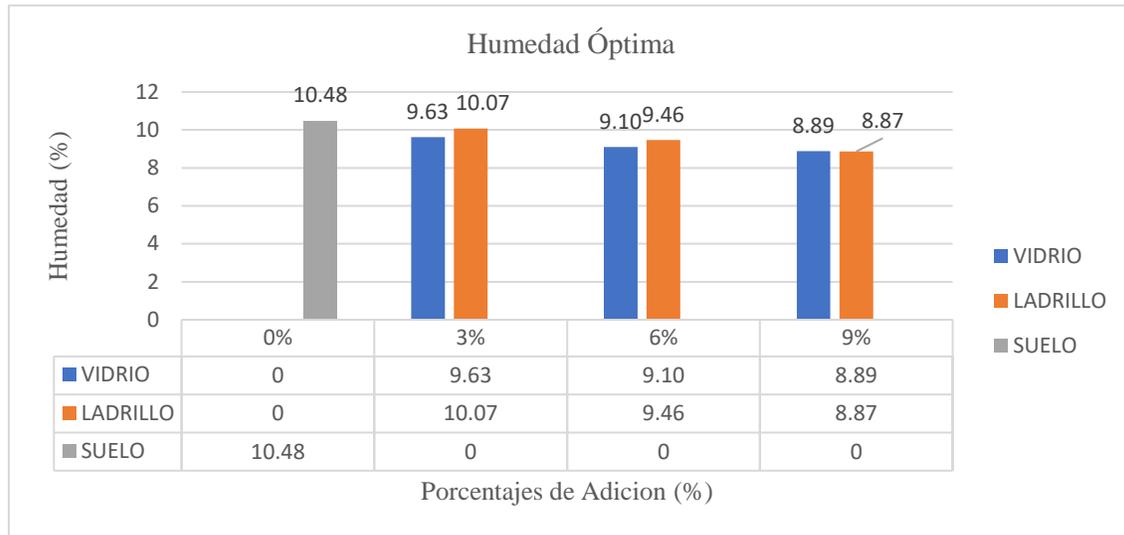
Se puede observar en el gráfico el aumento de su densidad máxima, claramente el vidrio tiene mayor aumento sobre el ladrillo, pero no están muy lejos de tener los mismos valores, esto se puede constatar en la tabla siguiente.

Tabla 53. Porcentaje del aumento de la densidad máxima

Porcentaje	Ladrillo	Vidrio
3%	0.04	0.06
6%	0.07	0.12
9%	0.12	0.16

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior se tiene el aumento de densidad máxima donde claramente se observa que el vidrio es el que predomina ya que podemos también atribuirlo a su resistencia que es mucho mayor que el ladrillo según bibliografía consultada anteriormente, entonces de esta manera confirmamos que el vidrio es el predominante en este ensayo, y observaremos como fue su evolución de la humedad óptima en el siguiente apartado.

Gráfico 30. Comparación de la humedad óptima

Fuente. Elaboración propia

Tabla 54. Porcentaje del descenso de la humedad óptima

Porcentaje	Ladrillo	Vidrio
3%	-0.41	-0.86
6%	-1.02	-1.38
9%	-1.61	-1.59

Fuente. Elaboración propia

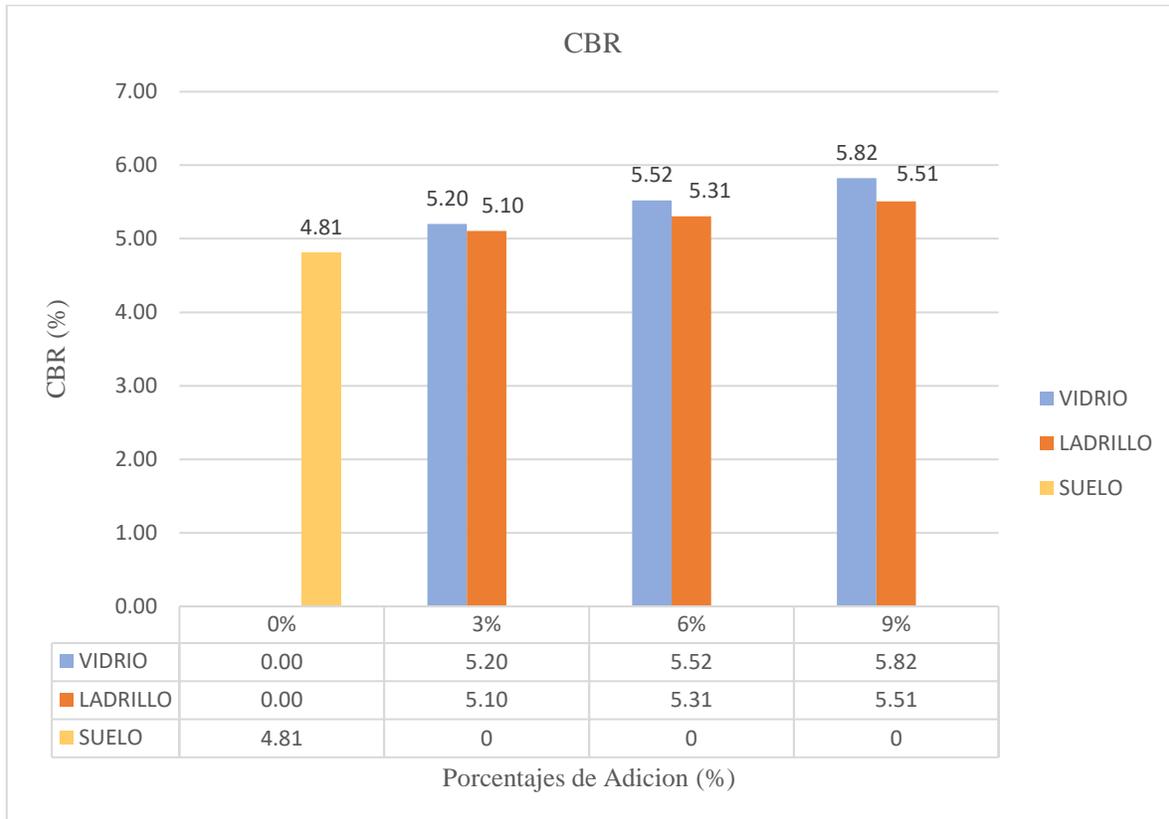
Para la humedad óptima se tiene la observación que en los dos aditivos hacen que disminuya la humedad, pero también decir que en el porcentaje de adición de 9% los valores de humedad son similares, es decir que en este punto tienen una humedad óptima similar pero la densidad máxima es diferente, este puede ser debido a que tanto el ladrillo y el vidrio tienen sus pesos específicos diferentes, entonces para este ensayo podemos decir que el aditivo que más aporta es el vidrio, ya que aumenta su densidad máxima en mayores valores que el ladrillo, además que tiende también a bajar su humedad óptima.

4.2.6. Ensayos CBR

Para el ensayo CBR se tiene que los valores obtenidos, los cuales son procesados estadísticamente en el capítulo siguiente tiene como aditivo que mayor efecto causa a nuestro

suelo el vidrio, este aditivo tiene mucha más resistencia que el ladrillo según los valores que hemos obtenido de este ensayo, de esta manera tenemos la gráfica siguiente:

Gráfico 31. Comparación del CBR



Fuente. Elaboración propia

De esta manera tenemos que el vidrio resulta que tiene un mayor efecto, en este caso positivo, ya que aumenta el CBR de nuestro suelo arcilloso en mayor intensidad que el ladrillo, de esta manera observaremos el aumento que se tiene en la siguiente tabla.

Tabla 55. Porcentaje de aumento del valor de CBR

Porcentaje	Ladrillo	Vidrio
3%	0.29	0.39
6%	0.50	0.71
9%	0.70	1.01

Fuente. Elaboración propia

4.2.7. Elección del valor óptimo

El valor óptimo de adición del ladrillo triturado es el porcentaje del 9% porque a partir de este porcentaje jugará un papel muy importante la calidad y origen del ladrillo, es así que de esta manera afectaría la elección de la cerámica de donde provenga este material y no estaríamos realizando un reciclaje completo en nuestra ciudad, entonces de esta manera para el porcentaje de adición mencionado, tendremos un aumento de CBR de 0.70 % para un suelo arcilloso de baja plasticidad CL, y en comparación con el vidrio, tendremos este mismo valor de adición con un 6% de vidrio molido, donde alcanza un valor de CBR de 0.71%.

Tabla 56. Tabla de clasificación y uso del suelo según valor de CBR

CBR	Clasificación Cualitativa del Suelo	Uso
2 - 5	Muy Mala	Sub-rasante
5 - 8	Mala	Sub-rasante
8 - 20	Regular – Buena	Sub-rasante
20 - 30	Excelente	Sub-rasante
30 - 60	Buena	Sub-base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente. Elaboración propia

Según la tabla de clasificación, tenemos que para este suelo en particular se pudo elevar con el porcentaje óptimo de los aditivos el rango de clasificación de nuestro suelo de Muy Mala a Mala llegando a obtener un valor de 5.52% de CBR.

4.3. Prueba de hipótesis

4.3.1. Prueba de “t student”

- Hipótesis de la investigación:

“El CBR de suelo arcilloso combinado con vidrio molido, es mayor que el CBR del mismo suelo combinado con ladrillo triturado”

Se supone:

$$H_0 = \overline{CBR}_1 \leq \overline{CBR}_2$$

$$H_1 = \overline{CBR}_1 > \overline{CBR}_2$$

Donde:

H_0 =Hipótesis nula

H_1 =Hipótesis alternativa

CBR_1 = Media muestral 1 (vidrio)

CBR_2 =Media muestral 2 (ladrillo)

- Estadístico de prueba:

$$t = \frac{\overline{CBR}_1 - \overline{CBR}_2}{\sqrt{\frac{S_c^2}{n_1} + \frac{S_c^2}{n_2}}}$$

Donde:

t = Estadístico t calculado

CBR_1, CBR_2 = Medias muestrales

$S_c^2 = \text{Varianza común}$

$n_1, n_2 = \text{Numero de muestras}$

- Varianza común:

$$S_c^2 = \frac{(n_1 - 1) * S_1^2 + (n_2 - 1) * S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

$S_1^2, S_2^2 = \text{Varianza muestral}$

- Grados de libertad:

$$Gl = (n_1 + n_2 - 2)$$

- Nivel de significación:

$$\alpha = 5\% = 0.05$$

- Valor crítico:

Se rechaza la hipótesis nula (H_0) si: $t > t_{(1-\frac{\alpha}{2}), (n_1+n_2-2)}$

- Procedimiento de cálculo

Se tabula los resultados de los ensayos CBR para obtener resultados posteriores que ayuden a identificar si la hipótesis nula o alternativa es la aceptada:

Tabla 57. Resultados de ensayos CBR

N°	Vidrio molido CBR1	Ladrillo triturado CBR2
1	5.20	5.11
2	5.22	5.11
3	5.21	5.09
4	5.18	5.08
5	5.19	5.13
6	5.54	5.28
7	5.48	5.28
8	5.53	5.33
9	5.53	5.29
10	5.53	5.35
11	5.81	5.46
12	5.84	5.52
13	5.83	5.49
14	5.80	5.52
15	5.83	5.55

Fuente. Elaboración propia

Medias muestrales:

$$\overline{CBR}_1 = 5.51 ; \overline{CBR}_2 = 5.31$$

Numero de muestras:

$$n_1, n_2 = 15$$

Varianza muestral:

$$S_1^2 = 0.069 ; S_2^2 = 0.030$$

Varianza común:

$$S_c^2 = 0.050$$

Estadístico de prueba:

$$t = 2.56$$

Grados de libertad:

$$Gl = 28$$

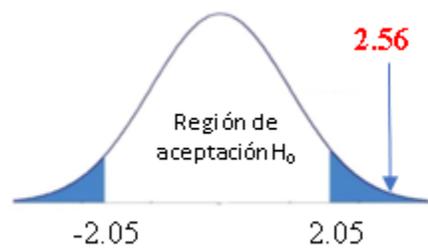
Nivel de significación:

$$\alpha = 5\%$$

Valor crítico:

$$t_{(1-\frac{\alpha}{2}), (n_1+n_2-2)} = 2.05$$

Figura 27. Curva de Gauss



Fuente. Elaboración propia

4.3.2. Estadística inferencial

- Error Medio de la Media

$$E_{\text{vidrio}} = \frac{S_{\text{vidrio}}}{\sqrt{N}}$$

$$E_{\text{vidrio}} = \frac{0.069}{\sqrt{15}}$$

$$E_{\text{vidrio}} = \mathbf{0.018}$$

$$E_{\text{ladrillo}} = \frac{S_{\text{ladrillo}}}{\sqrt{N}}$$

$$E_{\overline{ladrillo}} = \frac{0.030}{\sqrt{15}}$$

$$E_{\overline{ladrillo}} = \mathbf{0.008}$$

- Error Probable

$$E_p = Z * E_{\bar{x}}$$

NC= Nivel de confianza

$$NC = 95\%$$

$$Z = 1.96$$

$$E_{p(\text{vidrio})} = Z * E_{\overline{vidrio}}$$

$$E_{p(\text{vidrio})} = 1.96 * 0.018$$

$$E_{p(\text{vidrio})} = \mathbf{0.035}$$

$$E_{p(\text{ladrillo})} = Z * E_{\overline{ladrillo}}$$

$$E_{p(\text{ladrillo})} = 1.96 * 0.008$$

$$E_{p(\text{ladrillo})} = \mathbf{0.016}$$

4.3.3. Conclusión de la prueba de hipótesis

Como conclusión de todas las pruebas realizadas para cada porcentaje de aditivo para nuestro suelo arcilloso, se tiene que la hipótesis nula es rechazada y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, que se confirma nuestra hipótesis planteada de que el vidrio produce un mayor efecto y observando claramente se tiene mejoría con ambos materiales en cuanto a su caracterización y CBR con el cual damos por concluido la prueba de hipótesis de manera satisfactoria para nuestro trabajo.

4.4. Precios unitarios de adición de ladrillo y vidrio con suelo arcilloso (CL)

Para el análisis de precios unitarios se optó por analizar por m³ de producción de aditivo para combinarlo con suelo, independientemente del porcentaje de adición que se requiera ya que son las mismas consideraciones para cualquier porcentaje, y con esto se obtendrá el costo de

producción del triturado y molido de los aditivos mencionados y además los costos de recolección, traslado y la puesta en obra de los mismos.

Para una mayor comprensión, se optó por realizar una tabla con el total de precios por materiales, mano de obra y equipo maquinaria y herramientas, de esta manera el modelo del formulario de precios unitarios B-2 se encuentra en el apartado de anexos.

Tabla 58. Precio unitario del ladrillo

Ladrillo	
Descripción	Costo total
1.- Materiales.	
Total, materiales:	175.00
2.- Mano de obra.	
Total, mano de obra:	8.70
3.- Equipo, maquinaria y herramienta.	
Total, equipo maquinaria y herramienta:	33.74
4.- Gastos generales. -	
Total, gastos generales:	33.62
5.- Utilidad. -	
Total, utilidades:	25.00
6.- Impuestos. -	
Total, impuestos:	8.50
Total, precio unitario:	283.56

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior se encuentra el precio de producción de aditivo por m³, el cual se tiene precios regulares, ya que recalcaremos que la producción de 1 m³ de aditivo contempla 750 Kg de ladrillo y el cual podrá cubrir volúmenes de suelo y no se tendrá que utilizar grandes cantidades para el desarrollo de la misma, el formulario B-2 se encuentra en el apartado anexos para tener un mejor detalle del costo que se tiene para la construcción de subrasante que servirá de fundación para construir una carretera.

Tabla 59. Precio unitario del vidrio

Vidrio	
Descripción	Costo total
1.- Materiales.	
Total, materiales:	200.00
2.- Mano de obra.	
Total, mano de obra:	8.70
3.- Equipo, maquinaria y herramienta.	
Total, equipo maquinaria y herramienta:	33.74
4.- Gastos generales. -	
Total, gastos generales:	36.37
5.- Utilidad. -	
Total, utilidades:	27.88
6.- Impuestos. -	
Total, impuestos:	9.48
Total, precio unitario:	316.17

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior se encuentra el precio del suelo combinado con vidrio, el cual notoriamente se tiene que los materiales es el costo más elevado, esto se refiere a que el traslado y el chancado es un poco más caro ya que es un material que se debe tener mucho cuidado en la manipulación y además considerar que para el chancado es un material más duro, entonces de esta manera se dio un precio referencial aunque recalcar que como se dijo anteriormente, estas empresas no estarían dispuestas a realizar el chancado de este material por razones antes mencionadas. El formulario B-2 se encuentra en el apartado anexos para tener un mejor detalle del costo que se tiene para la construcción de terraplén o subrasante que servirá de fundación para construir una carretera.

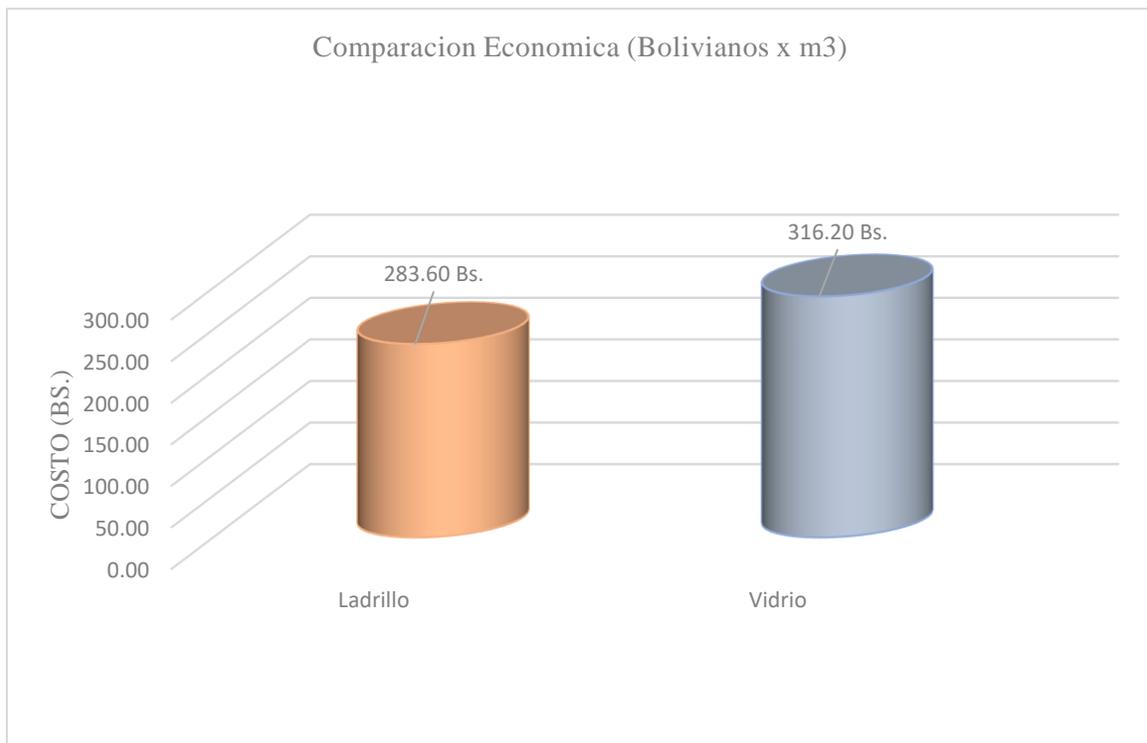
4.4.1. Conclusión de costos

Observando las tablas anteriores se concluye claramente que el ladrillo es más barato y más practico adquirirlo, trasladarlo y procesarlo en nuestras chancadoras, lo cual no ocurre con el vidrio, el cual se considera un material que se debe tener cuidado en la manipulación y que además las empresas chancadoras no las podrían realizar, pero si dieron una pequeña

referencia de lo que sería su precio, recalcando que quizás sea más elevado, entonces de esta manera proporcionaron el costo de la trituración del ladrillo que es similar al costo que tiene el chancado de los áridos que procesan normalmente y de esta manera podemos concluir que en este análisis el ladrillo es el más barato y de procesamiento más fácil que el vidrio.

Para observar este análisis tenemos una gráfica donde se observará específicamente el costo del total m³ de cada material, donde nuevamente se tiene claramente que el ladrillo es mucho más barato que el vidrio en cuestión de costos, para una mejor comprensión se tiene una gráfica para representarlo:

Gráfico 32. Comparación económica de los aditivos



Fuente. Elaboración propia

Se debe tener en cuenta que los porcentajes de valores de los impuestos IVA e IT, son fijos, mientras que las cargas sociales, gastos generales, herramientas menores y la utilidad fueron tomados como una media de los rangos establecidos por norma, los cuales pueden ser modificados según se requiera.

4.5. Análisis de factibilidad

Para el análisis de factibilidad como anteriormente mencionamos que este trabajo se centra principalmente en la comparación de los efectos de los aditivos en un suelo arcilloso, donde podemos decir que efectivamente dichos materiales si aportan una mejoría al suelo en cuanto al valor de CBR, pero se observó también que dicho aumento es pequeño, el cual solo es del 0.70% en el porcentaje óptimo de adición, este aumento no tendrá relevancia en el suelo ya que cuando se quiere mejorar el suelo se requiere un aumento significativo de este valor que sería por encima del 15% aproximadamente, el cual ocurre en el caso del mejoramiento suelo-cemento. Mencionando también que, si relacionamos el costo de producción de estos materiales con su valor mejorado de CBR, no se justifica su uso, ya que con precios similares se podría recurrir a un mejoramiento con los materiales que están en el manual de ensayos de la ABC, los cuales son la cal o el cemento, que brindarían resultados que tendrás mejoras mucho más significativas en sus propiedades.

Mencionar que también se tiene el problema del chancado, el cual las empresas que realizan este trabajo no quieren realizarlo con el vidrio, por su peligro en su manipulación y el costo de la limpieza que se requerirá cada vez que se lo realice, lo cual no ocurre con el ladrillo, que mencionaron que si lo podrían hacer, pero como se dijo anteriormente, el costo que tendremos para realizar este chancado contra la mejoría que brinda a un suelo arcilloso, seria prácticamente no productivo, entonces finalmente analizando este punto diremos que tanto el vidrio molido como el ladrillo triturado, no son materiales factibles de uso en un mejoramiento de suelo arcilloso tanto por costo, y por un bajo aumento de valor de CBR que este parámetro es considerado para evaluar la calidad de una subrasante.

Entonces bajo esta premisa se debe buscar otras alternativas de uso o aplicaciones de estos desechos de materiales para minimizar la producción de escombros y ampliar el campo del reciclado para estos tipos de materiales.

4.6. Comparaciones finales

4.6.1. Comparación técnica

Comparando técnicamente el ladrillo triturado y el vidrio molido, tenemos que el vidrio tiene un mayor aporte a nuestro suelo en cuanto a mejoras se refiere, teniendo en cuenta que el

ladrillo tiene un valor óptimo de 9% de adición al suelo, con una mejora en el CBR de 0.70%, en cambio el vidrio alcanza este valor de CBR en un porcentaje de adición del 6%, además que, si tomamos en cuenta un porcentaje de adición del vidrio de 9%, al igual que el valor óptimo del ladrillo, el valor de CBR del mismo llegaría a mejorar hasta 1.01%, donde finalmente podemos indicar que el vidrio es el material aditivo que más aporta a mejorar la capacidad resistente del suelo que el material aditivo ladrillo triturado.

Es importante aclarar que las mejoras brindadas por ambos aditivos no son significativas, y que los métodos de mejoramiento de suelos ya existentes en nuestro manual de ensayos como el suelo-cal ofrece un mínimo de aumento de CBR de 6%, mientras que el suelo-cemento ofrece mejoras mínimas del 10%, comparando con nuestro aumento máximo que tuvimos en el vidrio de 1.01%, podemos decir que estos aditivos utilizados como el ladrillo triturado y el vidrio molido, no podrían ser aplicados en un mejoramiento de una subrasante por las bajas mejoras que ofrecerían en combinación con el suelo.

4.6.2. Comparación ambiental

La contaminación ambiental que generan estos materiales está relacionada con la emisión de gases al momento de su fabricación, que después de haber llegado a obtener el producto final, estos pueden tener roturas, algunas imperfecciones en sus medidas, o algún otro factor que finalmente se decida desechar estos materiales, los cuales pueden ser reutilizados o finalmente solo se deposita en algún vertedero de la ciudad o zonas alejadas.

Estos materiales, tanto el vidrio como el ladrillo, no causan ninguna contaminación ni un impacto ambiental negativo por si solas, sin embargo, se conoce que los lugares donde desechan estos materiales, con el tiempo se vuelven basurales solo por el hecho que las personas lo catalogan de esa manera.

Entonces podemos concluir que los desechos generados por los materiales de vidrio y ladrillo no tienen impactos ambientales negativos, refiriéndonos a después de haber obtenido el producto final, sin embargo, si existe contaminación en su producción por la emisión de gases que generan las industrias que las fabrican.

4.6.3. Comparación económica

Económicamente se puede observar que el precio del mejoramiento de un suelo por m³ de suelo mejorado y compactado con ladrillo triturado al 9% es de 283.60 Bs, y el precio del mismo ítem, pero con vidrio molido también al 9% es de 316.20 Bs, entonces en este caso podemos atribuir que el vidrio molido tiene un costo más elevado, por tanto, en esta comparación entre estos 2 aditivos resulta que el ladrillo triturado es el material más barato para aplicarlo a un suelo.

Como observación mencionaremos que los precios de un mejoramiento suelo-cal o suelo-cemento, oscilan en un precio relativamente similar, pero la gran diferencia está en que estos aditivos tienen una mejora mucho más elevada en relación a los aditivos de ladrillo triturado y vidrio molido, en conclusión tenemos que no sería factible económicamente la aplicación de los aditivos de ladrillo triturado y vidrio molido a una subrasante porque sería preferible aplicar un mejoramiento de suelo con cal o cemento por tratarse de precios similares pero con mejoras mucho más significativas.

4.6.4. Comparación social

Socialmente el material más aceptado es el ladrillo, refiriéndose a los usos que se le ha dado a este material en el campo del reciclado, ya que las personas los usan para realizar adornos estéticos en sus domicilios, e incluso en el suelo ya son utilizados como adornos en las entradas de los domicilios, también en los jardines, y mencionar que el polvo de ladrillo es utilizado en las canchas de tenis y esto ocurre mundialmente hasta en importantes eventos deportivos, mientras que el vidrio es un material que se debe tener mucho cuidado en su manipulación, ya que un vidrio roto puede convertirse en un material punzocortante, entonces las personas solo optan por desechar este material a los vertederos de la ciudad y no las reciclan, entonces la aplicación del ladrillo en un mejoramiento de suelos sería el material más aceptado para su aplicación, pero sin embargo por los costos, y el bajo aporte que implica realizar este mejoramiento como se mencionó anteriormente, se concluye que no se puede aplicar ninguno de estos materiales a un mejoramiento de suelos y que más bien se encuentre otra manera de reutilizar estos materiales e impulsar el campo del reciclado que es de gran ayuda a la conservación del medio ambiente.

4.7. Modelo de especificaciones técnicas

- **Título**

**MEJORAMIENTO DE SUELOS (CL)
LADRILLO TRITURADO Y/O VIDRIO MOLIDO**

- **Definición**

Este ítem comprende el mejoramiento de un suelo de tipo arcilloso de baja plasticidad CL, con un aumento de CBR de 0.70% para una construcción de una subrasante o también considerado para un terraplén. Este ítem también apoya el reciclado de materiales como ser el ladrillo y el vidrio que provienen de los desechos de las fábricas de nuestra ciudad los cuales serán utilizados como aditivos utilizando el traslado de los mismos a una chancadora cercana a la obra y conseguir el tamaño de partícula deseado además de la cantidad necesaria para la ejecución de este ítem.

- **Materiales, herramientas y equipo**

Los materiales requeridos para la ejecución de este ítem son:

- ✓ Desecho de ladrillo de 6 huecos (recolectado de las industrias cerámicas)
- ✓ Desecho de vidrio plano o común (recolectado de las vidrierías)
- ✓ Suelo a ser mejorado (Suelo caracterizado previamente de tipo CL)

El equipo necesario para la ejecución de este ítem es:

- ✓ Chancadora (empresa más cercana al lugar del mejoramiento)
- ✓ Motoniveladora
- ✓ Vibro compactador
- ✓ Camión Cisterna
- ✓ Volqueta

Las herramientas necesarias para la ejecución de este ítem:

En forma general todos los materiales que el Contratista se propone emplear en estos mejoramientos serán algunas herramientas menores como palas, picos, etc.

- **Procedimiento para la ejecución**

Después de haber obtenido los materiales reciclados de las industrias de nuestra ciudad, se

procede al traslado de los mismos a la chancadora más cercana al lugar donde se está realizando la obra, en este lugar se hace el seleccionado del material que en el caso del ladrillo, solo sean desechos de ladrillo de 6 huecos y en el caso del vidrio se debe solo utilizar vidrios comunes o planos y que sean transparentes, luego de este procedimiento, se realiza el chancado del material a un diámetro de partícula que pase el tamiz N° 4 y se retenga en el tamiz N° 10 esto aplicado para ambos materiales, y esto se lo obtiene tamizando el material y luego observando y descartando partículas que no cumplan la relación de ancho y largo de 1:3.

Al término del tamizado del material y obteniendo la cantidad necesaria para nuestra obra se lo traslada nuevamente, pero esta vez hacia el lugar donde se desea realizar el mejoramiento, donde se realizará la adición del materia al suelo previamente obteniendo su caracterización y respectiva aplicación de su humedad optima con la ayuda del carro cisterna para que luego se ayude al esparcimiento con la motoniveladora y que posteriormente se hará la compactación con el vibro compactador del suelo junto con el aditivo seleccionado y así se obtendrá el mejoramiento procurando que se distribuya el aditivo de manera uniforme con el suelo.

- **Medición**

El mejoramiento de suelos con estos aditivos será medida en m^3 , considerando el volumen de suelo a mejorar midiendo la superficie y la altura de la capa de subrasante para obtener el volumen total y con la densidad del suelo que se obtendrá al realizar el ensayo de compactación, se debe obtener el peso total en Kg para considerar la cantidad de aditivo a que se requiera para el mejoramiento de dicho suelo.

- **Forma de pago**

El pago por este ítem se hará por el precio de m^3 que será adjuntado en el formulario de precios unitarios.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Como ventajas del mejoramiento del suelo con ladrillo triturado mencionaremos que este material es de gran presencia en nuestro medio, y es de fácil obtención. También se tiene que es un material que podemos adquirirlo con un costo cero por ser reciclado, y así no se tiene que comprar material nuevo lo cual implicaría un costo adicional a nuestro presupuesto. Mencionar también que la adherencia de las partículas del ladrillo al suelo se efectúa de manera homogénea, esto debido a la rugosidad que tiene el ladrillo al ser triturado y de esta manera se logra esta propiedad.
- Como desventajas del mejoramiento del suelo con ladrillo se tiene que la realización de la molienda manual es complicada, ya que para aplicarlo en una subrasante no se la podría realizar de esta manera y entonces se necesitara de una chancadora para la realización del triturado y esto implica un costo más elevado de producción. También se tiene que no se reciclara el 100% del material obtenido, es decir, que como se tiene establecido que se debe usar un diámetro de partícula, los demás diámetros que se obtengan en el proceso de triturado serán desechados y no se tomaran en cuenta.
- Para las ventajas del vidrio mencionaremos que claramente el vidrio tiene un mayor aporte al mejoramiento de un suelo y esto se lo obtiene en un menor porcentaje de adición que el ladrillo, es decir que como se tomó en cuenta el porcentaje optimo del ladrillo el 9%, el cual hacía que el valor del CBR aumente en un 0.70%, y el vidrio con una adición del 6% ya llegaba a este porcentaje se utilizaría una menor cantidad de aditivo que el ladrillo. Otra ventaja es que el vidrio es un material que puede ser reutilizado las veces que se requiera, y además de que no importa el tiempo que este en desuso, es decir que no afectaría el tiempo que tenga el material para poder reciclarlo.
- Las desventajas del vidrio podemos mencionar la menor presencia que tiene este material en nuestro medio comparando con el ladrillo, ya que las vidrierías de nuestra ciudad si producen desechos, pero no en una cantidad igual al ladrillo, entonces podríamos llegar a no cumplir la demanda necesaria de recolección de vidrio para

alguna obra que requiera este material para utilizarlo como aditivo. Otra desventaja ligada a la anterior es que se debe clasificar el vidrio en plano o común, entonces está limitado a este tipo de vidrio, ya que también se descarta el uso de botellas de vidrio, los cuales teóricamente los únicos que son iguales a los vidrios comunes o planos serían los transparentes, ya que los de color tienen una composición química diferente.

- En cuanto a los límites de Atterberg podemos decir que los dos aditivos aportan a reducir la plasticidad del suelo, es decir que obviamente hacen que existe menor presencia de arcilla en el suelo y esta a su vez hace que su expansión sea menor, de esta manera se reduce el límite líquido y el límite plástico, y por tanto el índice de plasticidad, y el aditivo que reduce en mayor valor es el ladrillo.
- En el ensayo de compactación se tiene que los dos aditivos aportan a que su densidad máxima aumente y a su vez baje la humedad óptima, mucho más el vidrio por ser un material impermeable y mayor resistencia del mismo, entonces esto tendrá un efecto en el valor de CBR, ya que es necesario tener estos valores para llegar a realizar dicho ensayo.
- Como se mencionó anteriormente que el vidrio es el que mayor efecto positivo tiene en el valor de CBR, podemos agregar que el vidrio también tiene la ventaja de resistir temperaturas altas, tiene una resistencia mayor a la del ladrillo, es un material impermeable el cual para una subrasante es ideal, ya que no es recomendable que ingrese agua al mismo, pero económicamente hablando, es más barato el ladrillo, y de mayor factibilidad, por su disponibilidad, entonces como conclusión final elegiremos al ladrillo triturado como el mejor aditivo en comparación con el vidrio.
- En comparación de los efectos causados por los aditivos se tiene que el vidrio causa un aumento mayor de CBR de nuestro suelo frente al ladrillo, y que además hace que su expansión también disminuya con dicho material, esto es muy importante ya que un suelo arcilloso es expansivo y eso causa grietas, fisuras y otros problemas en la subrasante como también en otras obras.
- Finalmente para la comparación de factibilidad y costos se mencionó que finalmente ninguno de los 2 aditivos son factibles de uso, es decir que primeramente no se tiene una gran mejoría para que pueda ser utilizado en una subrasante, y que además el

costo de producción también es relevante, ya que construir una subrasante de una vía es de grandes longitudes y se requerirá grandes cantidades de aditivo ya sea ladrillo o vidrio, y será preferible usar cemento o cal ya que estos mejoran en mayor cantidad el parámetro del CBR.

5.2. Recomendaciones

- Se debe tomar en cuenta la disponibilidad de los materiales a utilizar como aditivos ya que no en cualquier lugar se encontrará los mismos, la elección del aditivo a utilizar tendrá mucha influencia en el costo.
- Tener en cuenta la norma que rige en nuestro país de ensayos de materiales para poder tener resultados fiables y realizar una buena adición de los aditivos al suelo que requiere el aumento de CBR, tener en cuenta que en un proyecto futuro se puede tomar solo aditivo y realizar otros ensayos complementarios y tomar partículas más grandes para poder observar la evolución del suelo con dicho aditivo.
- Tanto en los ensayos como en la construcción de una subrasante, tener en cuenta la distribución de partículas de los aditivos, ya que este factor es muy importante para lograr la estabilización deseada, ya que una mala distribución puede causar otros efectos los que deseamos obtener.
- El molido tanto del vidrio como del ladrillo se realizó de forma manual sin problema alguno por ser un tema de investigación sin embargo si se realiza para el mejoramiento de una subrasante, se debe tener en cuenta las chancadoras de nuestra ciudad para el preparado de estos aditivos, de manera general esto quiere decir que se debe utilizar materiales, mano de obra, maquinaria y equipo que se encuentren disponibles en nuestro medio para evitar costos que se encuentren fuera de nuestro presupuesto.
- Si se requiere la aplicación de estos aditivos se debe tomar en cuenta el tamaño de partícula que pase del tamiz N° 4 y que se retenga en el tamiz N° 10, esto para realizar el ensayo de CBR, y además de eso descartar las partículas que no cumplan con la relación de ancho, largo, espesor de 1:3:1, para posteriormente realizar el ensayo de acuerdo a normas establecidas.