“ANTECEDENTES”

1.1. INTRODUCCION

1.1.1. Historia de la tierra en la construcción.

Desde los primeros asentamientos humanos hace 10.000 años, prácticamente todas las civilizaciones desarrolladas alrededor del mundo han empleado la tierra como soporte y sustento de la vida, para levantar viviendas y ciudades, murallas, palacios, iglesias, mezquitas, modestas casas de una planta y elegantes edificios en altura se erigieron usándola como principal material de construcción. Importantes testimonios arqueológicos, hoy declarados patrimonio histórico de la Humanidad.

Figura Nº1: Fotografía de la ciudad de Shibam en Yemen



Fuente: http://losviajeros.infoperduran

Desde hace siglos en los cinco continentes confirmando que, bajo ciertas condiciones, las construcciones con tierra cruda conservan al resguardo del tiempo sus cualidades físicas, mecánicas y ambientales. Prueba de ello son las centenarias

ciudades de Shiban o Sanná en Yemen, de Paquimé o Casas Grandes en México, Chan-Chan en Perú

Figura Nº2: Fotografía de la ciudad de Chan-Chan en Perú



Fuente: http://www.xn--cuscoper-v5a.com

En nuestro continente, la construcción con tierra cruda fue el sistema dominante en las ciudades Iberoamericanas durante el período colonial alcanzando su máximo desarrollo tecnológico a fines del siglo XIX hasta las primeras décadas del presente siglo un ejemplo local es la casa dorada o MASION D'OR construida entre 1887 a 1903. Luego, la aparición de otros materiales impulsados por el avance de la industrialización y el crecimiento del consumo marcaron un lento y largo período de declinación, llegándose a cuestionar su aceptabilidad social y reduciendo su

Figura Nº3: Fotografía de la Casa de la Cultura en Tarija



Fuente: Elaboración Propia

aplicación casi exclusivamente al medio rural como un fenómeno marginal, sinónimo de precariedad y pobreza. Sin embargo lejos de desaparecer, las construcciones con tierra cruda son hoy en día un hecho innegable y, en muchos países una solución irremplazable, tanto es así, que según estimaciones de la ONU, un tercio de la población mundial vive actualmente en casas de tierra.

1.1.2. Impulso de la construcción con tierra

En el resto del mundo, el creciente interés por el estudio de las "geo-arquitecturas" que se manifiesta desde la década de los años 80, favorece el desarrollo de un nuevo rigor técnico-constructivo a partir de la revalorización de este material de aparente y de relativa fragilidad. Organismos internacionales como UNESCO, ICOMOS, ICCROM; GETTY INSTITUTE (USA); Fundaciones, Universidades y ONG's. han impulsado en todo el mundo (Europa Central; Norte de África; Tailandia; Madagascar; USA; México, Nicaragua, Perú, Chile, Brasil, Argentina) la producción de importantes investigaciones y de obras destinadas a: viviendas, hospitales, iglesias, escuelas y otros edificios del hábitat social. La construcción con tierra representa hoy un gran potencial de desarrollo, especialmente en la producción de viviendas de interés social, por lo que resulta relevante actualizar, perfeccionar y proponer nuevos desarrollos en esta tecnología, aparentemente humilde, pero a la vez compleja y de gran interés por su innegable dimensión social, económica y política.

1.2. EL PROBLEMA

El deterioro ambiental que viene agravándose en las últimas décadas en todo el mundo, afecta fundamentalmente a la naturaleza, a través de elevados niveles de explotación de los recursos naturales, incluyéndose en ellos el suelo fértil, contaminación de la atmósfera y agotamiento y contaminación de los recursos hídricos, todos ocasionados por la acción del hombre.

Figura Nº4: Fotografía de Cárcavas, Erosión del suelo



Fuente: Elaboración Propia

Ante esta situación, los temas relacionados con el cuidado del medio ambiente empiezan a movilizar a importantes sectores, no sólo gubernamentales sino también de la propia sociedad civil y se comienza a pensar en una nueva forma de actuar hacia el futuro, basada en los principios del desarrollo sustentable, que está asumiendo un carácter estratégico en ciertos sectores de la producción, ayudándolos a conquistar nuevos mercados de una economía cada vez más globalizada.

Figura Nº5: Fotografía de una fábrica artesanal de ladrillos



Fuente: Elaboración Propia

Particularmente, el sector de la construcción es responsable de grandes aportaciones económicas y sociales a través de la producción de bienes y servicios. Históricamente, este sector ha requerido de grandes cantidades de materias primas y

energía, lo que consecuentemente provoca grandes cantidades de emisiones gaseosas, líquidas y sólidas, contaminantes del medio ambiente.

En Bolivia, el ladrillo cocido es uno de los insumos más utilizados en la construcción, sobre todo en las grandes ciudades, donde es prácticamente el único material empleado para los muros, estos ladrillos se fabrican con arcilla, cal y agua y son sometidos a cocción, utilizando energías no renovables como ser leña de bosques nativos, en el caso de los artesanales y gas u otro combustible en el caso de los industriales.

Los diferentes sistemas constructivos no han logrado reemplazar, a lo largo del tiempo, la utilización del ladrillo cerámico en la construcción, sobre todo en Latinoamérica. Esto se debe a dos causas fundamentales, una económica, ligada a los costos del mismo y otra cultural, vinculada a la identificación histórica de este material con un cierto estatus. Su fabricación no demanda una tecnología sofisticada ni tampoco mano de obra calificada, estas condiciones de consumo, como así también de producción, se mantienen en la actualidad.

1.3. FORMULACIÓN

¿Cómo se puede fabricar un ladrillo que elimine la cocción de su proceso de elaboración, que sea resistente y versátil, para poder tener una alternativa a los ladrillos cocidos?

Debido a que la construcción ya posee técnicas milenarias y la mayor parte de estas están ligadas a la tierra, se ha decidido utilizarlas en este estudio, motivo por el cual se ha decidido transformar el “adobe de construcción”, a “Eco-ladrillos”.

Esta transformación se la realizará tomando lo ya conocido en la fabricación de adobes, estabilizándolo con cemento o cal, y aplicando una fuerza de compresión.

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. General:

- Fabricar un ladrillo para la construcción, elaborado a partir del "adobe de construcción", mediante la estabilización del suelo y la compresión del mismo, que pueda reemplazar a los ladrillos cocidos, siendo el mismo ecológico y resistente.

1.4.2. Específicos:

- Adecuar una metodología para la fabricación de los Eco-ladrillos.
- Disminuir el desgate por la erosión hídrica.
- Disminuir la absorción de agua.
- Aumentar la resistencia a compresión.

1.5. JUSTIFICACIÓN.

Técnica:

Brindar un ladrillo para la construcción económico, duradero y resistente, el cual no necesite grande plantas para su elaboración.

Económica:

Disminuir el coste de la construcción en casas unifamiliares, cerramientos, y otros, aportando una alternativa viable ante la utilización de ladrillos cocidos.

Social:

Aportar con un eco-ladrillo, bioclimático, de bajo coste y durable, el cual pueda impulsar proyectos de viviendas sociales.

Ambiental:

Disminuir la emisión de contaminantes a la atmósfera, la deforestación de bosques, la quema de combustibles fósiles y reducir la erosión.

Brindar un material que no solo es Bioclimático, si no también que es reciclable y que no necesita gran energía para su eliminación.

1.6. HIPOTESIS PLANTEADA.

“El adobe de construcción, mejorará con la compresión y estabilización del suelo con cemento o cal, disminuyendo el desgaste por la erosión y la absorción de agua e incrementará la resistencia a compresión simple”

1.7. MARCO DE REFERENCIA.

1.7.1. Espacial

El presente trabajo se realizó en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho de la ciudad de Tarija, en el laboratorio de suelos y hormigones de dicha casa de estudio.

1.7.2. Conceptual

Eco-ladrillo.- bloque de suelo estabilizado y compactado (BSEC).

Adobe.- aquel material de construcción fabricado en forma de ladrillo y elaborado en base al suelo.

Cemento.- conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua.

Cal.- es un término que designa todas las formas físicas en las que pueden aparecer el óxido de calcio (CaO) y el óxido de calcio y magnesio (CaMgO2), denominados también, cal viva (o generalmente cal) y dolomía calcinada respectivamente.

CETA-RAM II.- máquina de moldeado de adobes que incluye una fuerza mecánica de compactación diseñado por el “Ing. Mao Lua”

Resistencia a compresión.- propiedad de resistir o aguantar a las tensiones o presiones que existe dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección.

Durabilidad.- capacidad de permanecer un cierto tiempo.

Permeabilidad.- es la capacidad que tiene un material de permitirle a un líquido que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

Degradación.- Reducir o desgastar las cualidades de una cosa.

Compactación de suelos.- se manifiesta con el aumento de la densidad aparente del suelo

1.8. ALCANCE DEL ESTUDIO.

1.8.1. Limitaciones

- En este estudio se trabajó con tres diferentes suelos arcillosos, de diferentes lugares de la ciudad, considerando parámetros como la granulometría y los límites de Atterberg para su clasificación.
- Los suelos usados en este estudio pueden recibir alteraciones con la adición de arenas para modificar sus características.
- La teoría, aplicación y ensayos solo será para mezclas ya sea Suelo-Cemento o Suelo-Cal, no se incluirá en el estudio la aplicación de los dos estabilizantes (cemento o cal) de manera conjunta
- El cemento que se utilizó en el estudio será Portland IP30.
- La cal se consideró apta para el estudio a cualquiera que contenga un grado de pureza de 82% de óxido de calcio.

- Se construyó la maquina bloqueadora de ladrillos ecológicos CETA-RAM II, pero se hará pequeñas modificaciones por facilidad de construcción y disponibilidad de materiales en el mercado local.

1.8.2. Resultados a lograr

- Construcción de la CETA-RAM II.
- Determinación cantidad óptima de cemento o cal a incluirse en adobes.
- Identificación los suelos que sean aptos para la confección de eco-ladrillos.
- Determinación el porcentaje de humedad óptimo que debe contener la mezcla para la confección de los ladrillos.
- Determinar resistencia a compresión simple en los BSEC.
- Determinar cuantitativamente las mejoras hechas con el estudio (resistencia, permeabilidad, reducción de la abrasión del agua).
- Elaborar ensayos empíricos, para la aplicación del estudio en la elaboración de adobes, (relación arena-arcilla, cantidad de agua a incluirse en la mezcla y finalmente cantidad de estabilizante a incluir en la elaboración de adobes mejorados, proporcionando tablas y ábacos).
- Elaborar una comparación económica entre el material estudiado y los ladrillos cerámicos comunes.

“MARCO TEÓRICO”

2.1. EL ADOBE CONVENCIONAL.

Llamamos adobe a aquel material de construcción fabricado en forma de ladrillo y elaborado en base al suelo, constituido éste por unas adecuadas proporciones de arena, limo, arcilla, fibra orgánica y agua.

Figura Nº6: Fabricación de adobes



Fuente: Elaboración Propia

La relación arcilla-arena del suelo es de gran importancia para el adobe debido a que, si no hay suficiente arcilla en la mezcla no se conseguirá la cohesión necesaria de todas las partículas para soportar las acciones a las que estará sometido, y se desmorona, y por el contrario, si no hay suficiente arena, el ladrillo se fisura por retracción de la arcilla durante el proceso de secado.

Si el contenido de arena que presenta el suelo se encuentra por debajo de los parámetros requeridos para su uso como material de construcción se puede recurrir a la adicción de arena para mejorar sus propiedades.

La fibra orgánica también presenta gran importancia debido a que limita las variaciones de volumen que se producen en el adobe durante el proceso de retracción que ocurre en la etapa de secado. Es decir, evita que el ladrillo se fisure en exceso

durante esta etapa. No obstante, la mayoría de las fibras orgánicas tienen las desventajas de tener que ser picadas en trozos pequeños para poder ser mezcladas en la masa de adobe, y la de disminuir la trabajabilidad del mismo.

Al día de hoy, existe gran disparidad de criterios a la hora de proponer una composición adecuada del adobe en cuanto a los porcentajes de arena y arcilla. Así por ejemplo, en Perú, es frecuente utilizar suelos que contengan entre un 55 y un 75% de arena, y entre un 25 y un 45% de arcilla. En México se aconseja que el suelo presente entre 45 y 70% de arena, y entre 20 y 40% de arcilla, en Venezuela se propone un valor más cerrado 20 % de arcilla y 80 % de arena, del mismo modo en Chile sugieren emplear suelos con un contenido de finos entre 35 y 45%, y un contenido de arena entre el 55 y el 65%.

2.2. EL CEMENTO.

Tipos de cemento según NB-011

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos. La norma boliviana (NB-011) clasifica los tipos de cemento según un código compuesto de dos partes. Las dos primeras letras clasifican al cemento según los materiales usados para su fabricación como se ve a continuación:

TablaNº1: Tipos de cemento

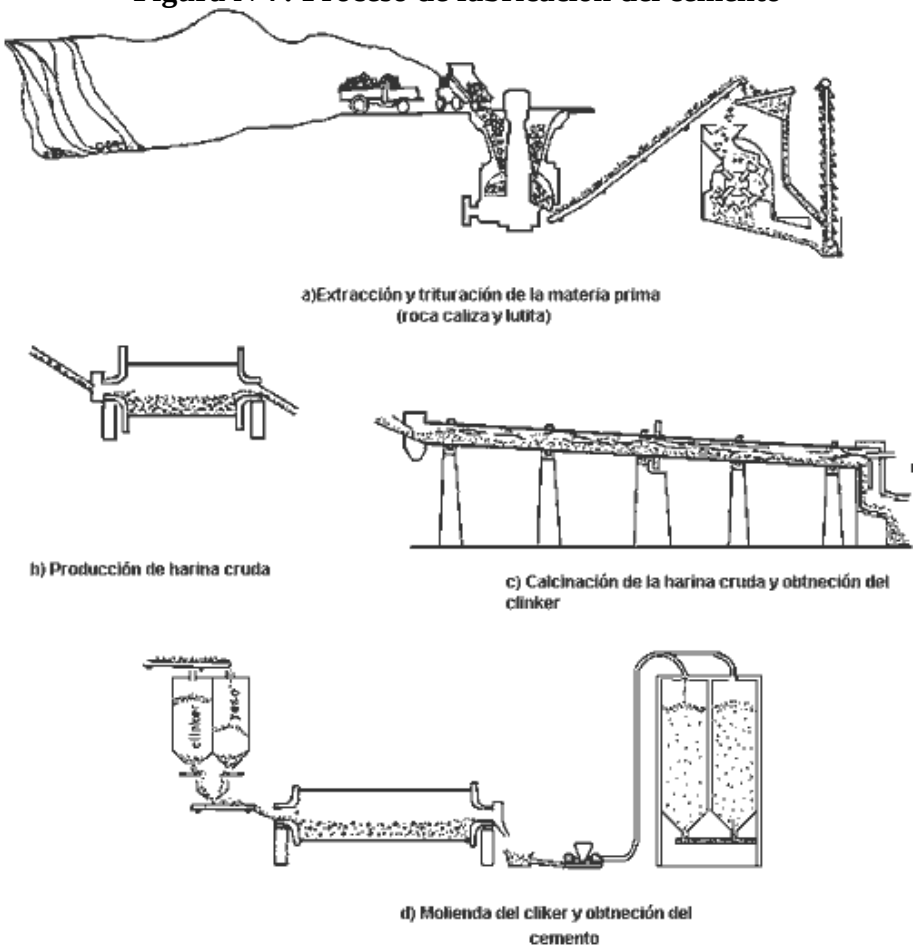
Tipo de cemento			Proporción en masa, en %			
			Componentes principales			Componentes adicionales
Denominación	Designación	Tipo	Clinker	Puzolana	Filler	
Cemento Pórtland	Pórtland	I	95 a 100			0 a 5
	Pórtland con puzolana	IP	60 a 94	6 a 40		0 a 5
	Pórtland con filler calizo	IF	65 a 94		6 a 35	0 a 5
Cemento puzolánico		P	45 a 60	40 a 55		0 a 5

Fuente: extraída de la norma boliviana NB-011

El número que se ve a continuación del código representa el valor de resistencia a compresión mínima para un ensayo normalizado (NB-470). EL CEMENTO IP-30, que es el más comercial en nuestro medio representa un cemento Portland Tipo Puzolánico con una resistencia a compresión de 30 MPa. a los 28 días de edad.

Es importante resaltar que la norma boliviana cumple la clasificación de resistencia a compresión de la norma ASTM (Norteamérica) y no se debe confundir con la norma UNE (Europa) que utiliza una escala diferente. El Cemento IP-30 es equivalente al CEM II-B de 42,5 MPa de resistencia en Europa. La diferencia en la resistencia se debe al tipo de ensayo y preparación de las muestras, sin embargo es importante aclarar que el cemento sigue siendo el mismo.

Figura Nº7: Proceso de fabricación del cemento



Fuente: www.elconstructorcivil.com

El proceso de fabricación del cemento comprende cuatro etapas principales:

1) Extracción y molienda de la materia prima
2) Homogeneización de la materia prima
3) Producción del Clínker
4) Molienda de cemento

La materia prima para la elaboración del cemento (caliza, arcilla, arena, mineral de hierro y yeso) se extrae de canteras o minas y, dependiendo de la dureza y ubicación del material, se aplican ciertos sistemas de explotación y equipos. Una vez extraída la materia prima es reducida a tamaños que puedan ser procesados por los molinos de crudo.

La etapa de homogeneización puede ser por vía húmeda o por vía seca, dependiendo de si se usan corrientes de aire o agua para mezclar los materiales. En el proceso húmedo la mezcla de materia prima es bombeada a balsas de homogeneización y de allí hasta los hornos en donde se produce el clínker a temperaturas superiores a los 1500 °C. En el proceso seco, la materia prima es homogeneizada en patios de materia prima con el uso de maquinarias especiales. En este proceso el control químico es más eficiente y el consumo de energía es menor, ya que al no tener que eliminar el agua añadida con el objeto de mezclar los materiales, los hornos son más cortos y el clínker requiere menos tiempo sometido a las altas temperaturas.

El clínker obtenido, independientemente del proceso utilizado en la etapa de homogeneización, es luego molido con pequeñas cantidades de yeso para finalmente obtener cemento.

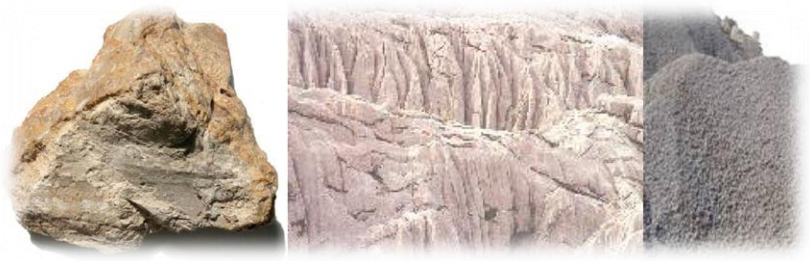
2.3. LA CAL.

Piedra caliza

Las piedras están compuestas básicamente por carbonato de calcio, aun que pueden tener varias impurezas. El carbonato de calcio es el compuesto de calcio más abundante en la naturaleza. El mármol, por ejemplo, es una roca que contiene como

componente principal carbonato de calcio y lo mismo sucede con la piedra caliza. Esta última es la materia prima con la cual se prepara la cal viva.

Figura Nº8: Fotografías piedra Caliza



Fuente: www.elconstructorcivil.com

La piedra caliza se compone de carbonato cálcico (CaCO3) e impurezas como arcillas, carbonato de magnesio, sílice, etc. Para que la cal sea de buena calidad y mantenga sus propiedades ligantes estas impurezas no deben de llegar al 5%.

Cal viva

Para obtener ésta, se calcina la piedra caliza, con lo cual el CaCO3 que contiene, se transforma en CaO, desprendiendo CO2. Para cocer la caliza es preciso someterla a una temperatura de 900 a 1200 ºC; en este proceso además de liberar dióxido de carbono (CO2), se produce una considerable pérdida de peso y volumen. El paso de la roca por el horno es el óxido de calcio (CaO), denominado comúnmente cal viva.

$$CaCO3 \longrightarrow CO2 + CaO$$

Que expresada según sus pesos molares resultaría:

$$100g \longrightarrow 44g + 56g$$

Así teóricamente, la piedra caliza de origen pierde del 44% de su peso en forma de dióxido de carbono y produce un 56% de cal viva.

Cal hidratada o cal apagada

Por consiguiente haciendo un balance:

$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + 279\ Kcal/kg$

$(40 + 16) + (1*2+16) \longrightarrow 40+(16+1)*2$

$56 + 18 \longrightarrow 40+34$

$74 \longrightarrow 74$

De esto deducimos que 56 unidades de CaO + 18 unidades de H_2O resultan en 74 unidades de $Ca(OH)_2$,. O bien 1 Kg de CaO + 0,32 Kg de agua, producen 1,32 kilos de lechada de cal.

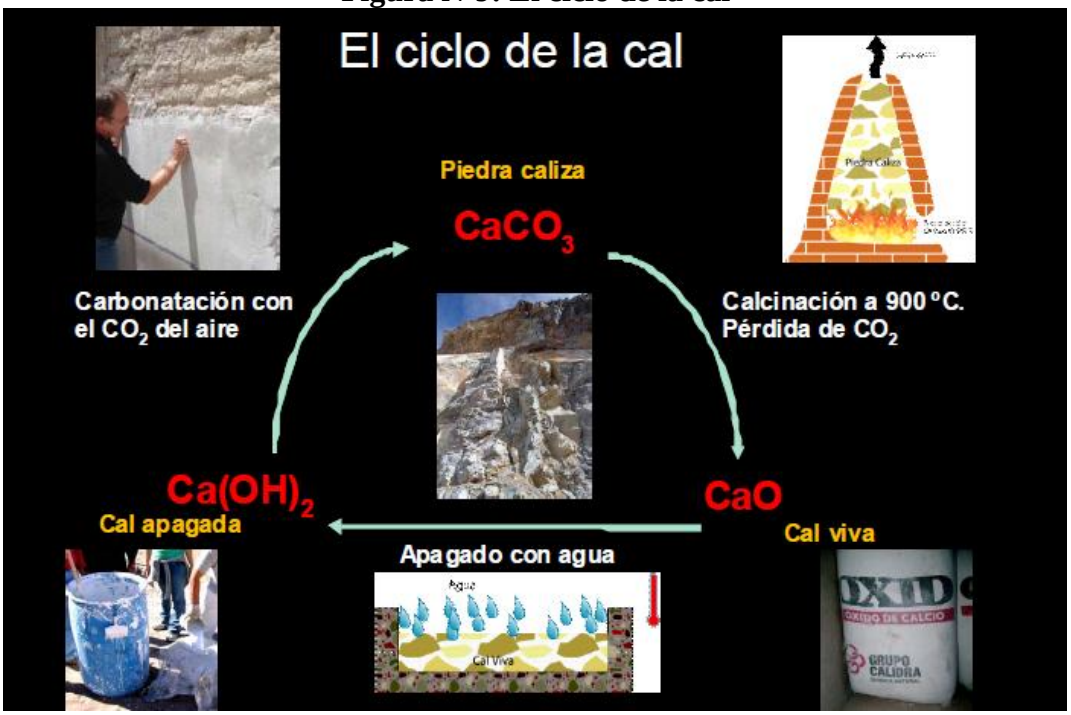
Esta es la cantidad mínima de agua requerida para la reacción química, así el hidróxido de calcio contiene 75.7% de CaO y 24,3% de agua. El proceso de adición de agua al óxido de calcio para producir hidróxido de calcio se conoce como hidratación de la cal viva. Este se limitará entonces al proceso de obtención de lechada de cal o hidratación de la cal. El proceso de hidratación de la cal es un proceso de tipo exotérmico, y que genera una gran cantidad de calor.

El proceso de hidratación cuando se hace con la cantidad de agua justa se llama "Hidratación Seca". En este caso de hidratación el producto es un polvo seco. Cuando se usa un exceso de agua en la hidratación el proceso se llama "Apagado", en este caso el producto resultante de la hidratación tiene la forma de una lechada. El proceso de Apagado normalmente se hace con una gran cantidad de agua en exceso variando desde 2½ a 6 partes de agua por 1 parte de CaO.

Secado o fraguado de la cal

El fraguado de la cal se debe a un proceso de *secado,* que se produce por absorción del dióxido de carbono del aire para formar carbonato de calcio. Es decir, El ciclo de la cal se cierra al convertirse el hidróxido de calcio en carbonato de calcio al recuperar el CO_2; recupera su calidad pétrea, aunque hay que señalar con una resistencia diferente (normalmente menor) a la que tenía en su estado natural.

Figura Nº9: El ciclo de la cal



Fuente: TICRAT 2008 Arizona-Sonora17-21 Noviembre Taller internacional de Conservación y Restauración de Arquitectura de tierra

2.4. LA ARCILLA

La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedente de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años.

Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. En la fracción textural arcilla puede haber partículas no minerales, los fitolitos, químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$.

Figura Nº10: Arcilla del periodo cuaternario, Estonia



Fuente: http://es.wikipedia.org

Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C. La arcilla endurecida mediante la acción del fuego fue la primera cerámica elaborada por los seres humanos, y aún es uno de los materiales más baratos y de uso más amplio. Ladrillos, utensilios de cocina, objetos de arte e incluso instrumentos musicales como la ocarina son elaborados con arcilla. También se la utiliza en muchos procesos industriales, tales como en la elaboración de papel, producción de cemento y procesos químicos.

Clasificación

Las arcillas se pueden clasificar de acuerdo con varios factores. Así, dependiendo del proceso geológico que las originó y a la ubicación del yacimiento en el que se encuentran, se pueden clasificar en:

- Arcilla primaria: se utiliza esta denominación cuando el yacimiento donde se encuentra es el mismo lugar en donde se originó. El caolín es la única arcilla primaria conocida.

- Arcillas secundarias: son las que se han desplazado después de su formación, por fuerzas físicas o químicas. Se encuentran entre ellas el caolín secundario, la arcilla refractaria, la arcilla de bola, el barro de superficie y el gres.

Si atendemos a la estructura de sus componentes, se distinguen las arcillas filitenses y las arcillas fibrosas.

También se pueden distinguir las arcillas de acuerdo a su plasticidad. Existen así las arcillas plásticas (como la caolinítica) y las poco plásticas (como la esméctica, que absorbe las grasas).

Por último, hay también las arcillas calcáreas, la arcilla con bloques (arcilla, grava y bloques de piedra de las morrenas), la arcilla de descalcificación y las arcillitas (esquistos arcillosos).

Granulometría

Dentro de la clasificación granulométrica de las partículas del suelo, las arcillas ocupan el siguiente lugar:

Tabla Nº2: División de los suelos según su tamaño

	BRITÁNICO [1]	**AASHTO** [2]	**ASTM** [3]	**SUCS** [4]
	ϕ (mm)	ϕ (mm)	ϕ (mm)	ϕ (mm)
Grava	60 – 2	75 – 2	> 2	75 – 4,75
Arena	2 – 0,06	2 – 0,05	2 – 0,075	4,75 – 0,075
Limo	0,06 – 0,002	0,05 – 0,002	0,075 – 0,005	< 0,075 FINOS
Arcilla	< 0,002	< 0,002	< 0,005	

Fuente: www.bdigital.unal.edu.co/1864/4/cap3.pdf pag. 29

No obstante lo anterior, la clasificación SUCS que es utilizada habitualmente en ingeniería no tiene una división de la fracción arcillosa del suelo y considera a los limos y arcillas como finos, por lo que para el estudio la fracción arcillosa del suelos tendrá un tamaño de 0,002 mm.

Historia del uso de la arcilla

La arcilla tiene propiedades plásticas, lo que significa que al humedecerla puede ser modelada fácilmente. Al secarse se torna firme y cuando se somete a altas temperaturas acaecen reacciones químicas que, entre otros cambios, causan que la arcilla se convierta en un material permanentemente rígido, denominado cerámica.

Por estas propiedades la arcilla es utilizada para hacer objetos de alfarería, de uso cotidiano o decorativo. Los diferentes tipos de arcilla, cuando se mezclan con diferentes minerales y en diversas condiciones, son utilizadas para producir loza, gres y porcelana. Dependiendo del contenido mineral de la tierra, la arcilla, puede aparecer en varios colores, desde un pálido gris a un oscuro rojo anaranjado. Un horno diseñado específicamente para cocer arcilla es llamado horno de alfarero.

La humanidad descubrió las útiles propiedades de la arcilla en tiempos prehistóricos, y los recipientes más antiguos descubiertos son las vasijas elaboradas con arcilla. También se utilizó, desde la prehistoria, para construir edificaciones de tapial, adobe y posteriormente ladrillo, elemento de construcción cuyo uso aún perdura y es el más utilizado para hacer muros y paredes en el mundo moderno. La arcilla fue utilizada en la antigüedad también como soporte de escritura. Miles de años antes de Cristo, por cuenta de los sumerios en la región mesopotámica, la escritura cuneiforme fue inscrita en tablillas de arcilla.

La arcilla cocida al fuego, la cerámica, es uno de los medios más baratos de producir objetos de uso cotidiano, y una de las materias primas utilizada profusamente, aun hoy en día. Ladrillos, vasijas, platos, objetos de arte, e incluso sarcófagos o instrumentos musicales, tales como la ocarina, fueron y son modelados con arcilla. La arcilla también se utiliza en muchos procesos industriales, tales como la producción de cemento, elaboración de papel, y obtención de sustancias de filtrado.

Los arqueólogos utilizan las características magnéticas de la arcilla cocida encontrada en bases de hogueras, hornos, etc, para fechar los elementos arcillosos que han permanecido con la misma orientación, y compararlos con otros periodos históricos.

2.5. LA ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS.

Historia

Se han utilizado la cal y sus mezclas con puzolanas naturales para la estabilización de suelos cohesivos en diferentes obras públicas, primero en China (pirámides de Shaanxi hace unos 5000 años) e India, y después durante el Imperio Romano en vías de comunicación y obras hidráulicas. En el siglo XIX se realizaron grandes avances en la producción de otros conglomerantes distintos de las cales, como los cementos pórtland artificiales, y en los procedimientos constructivos. El desarrollo de nuevas redes viarias para vehículos automóviles tanto en Estados Unidos como en Europa durante el periodo 1900 - 1930 propició una serie de experimentos que mostraron claramente las posibilidades de aprovechamiento de los suelos existentes, modificados en mayor o menor grado por la adición de alguno de estos productos, y la subsiguiente mezcla y compactación.

El desarrollo tecnológico actual tuvo sin embargo una decisiva primera fase en el periodo 1930-1950. Para ello fueron necesarios muchos estudios de laboratorio para definir unos métodos de ensayo y observar la incidencia de las diferentes variables que intervienen en los resultados. La gran variabilidad de los suelos naturales constituía un reto adicional. Hubo que construir y seguir el comportamiento de varios tramos de ensayo, hasta llegar a sistematizar el diseño, definir la ejecución más adecuada, con una maquinaria en constante desarrollo, y finalmente establecer unas primeras especificaciones técnicas.

Fueron pioneros en este periodo Estados Unidos (hay que destacar la labor de la Pórtland Cement Association y de la National Lime Association) y algunos países europeos. Las necesidades militares de la 2ª Guerra Mundial, particularmente en la

construcción rápida de aeropuertos, propiciaron más avances técnicos y una extensión del uso de los suelos estabilizados en muchos países involucrados en el conflicto.

En los años 50, con la reconstrucción e iniciación de importantes infraestructuras de transporte, comenzó una segunda fase en la que la estabilización de suelos era ya una técnica moderna establecida. También se extendió su uso a vías secundarias y de baja intensidad de tráfico. Desde mediados de los años 70 las circunstancias han cambiado considerablemente, tanto por la acuciante protección del medio ambiente como por el encarecimiento de la energía y la agresividad creciente del tráfico pesado, lo que ha obligado al empleo de explanadas de mayor capacidad de soporte y de mayor fiabilidad.

El uso de las estabilizaciones de suelos se ha ido generalizando debido a la disponibilidad de modernas máquinas estabilizadoras-recicladoras de gran potencia, rendimiento, profundidad de tratamiento y mezcla en una pasada, junto a nueva distribuidoras del conglomerante y a los compactadores pesados vibrantes, que han revolucionado la construcción. Así, en Francia, se disponía ya en 1988 de unos 150 equipos de estabilización.

En esta tercera fase se han puesto al día los diseños del cimiento de los firmes por su incidencia en el comportamiento a largo plazo y en los costes globales. Los suelos estabilizados ofrecen unas posibilidades de ejecución menos dependientes de la meteorología, facilitan la puesta en obra de las capas del firme y, en suma, reducen los riesgos que pueden mermar la calidad deseada.

2.5.1. Efectos de la cal en la estabilización de suelos

La incorporación de la cal, viva o apagada, a un suelo provoca dos tipos de acciones:

- mejora por modificación inmediata, que tiene lugar desde el momento en que se mezcla el suelo con la cal. Su duración puede ir desde algunos minutos hasta unas pocas horas

- estabilización a largo plazo, que prosigue durante varios meses, o incluso algunos años, después de la incorporación de la cal al suelo.

  Ψ *La incorporación de la cal a un suelo arcilloso provoca tanto mejoras a corto plazo, que se producen entre algunos minutos y unas pocas horas, como un efecto de estabilización a largo plazo, que se prolonga durante varios meses e incluso algunos años.*

Mejora por modificación inmediata

Afecta a la humedad del suelo y a sus propiedades geotécnicas, mejorando su trabajabilidad y su comportamiento frente al agua. Modificaciones del estado hídrico Estas modificaciones dependen de la forma en que se encuentra la cal (viva, apagada, lechada) y del porcentaje aplicado.

En el caso de emplearse cal viva, ésta provoca un descenso inmediato de la humedad del suelo por el efecto combinado de los tres procesos siguientes:

Hidratación de la cal viva, ya explicada en el capítulo 2.3, según la reacción:

$CaO + H2O \rightarrow Ca(OH)2 + 279$ kcal/kg de CaO

Evaporación de una cierta cantidad de agua, producida por el calor desprendido en la hidratación de la cal viva (279 kcal/kg de cal viva). Esta reacción es muy exotérmica (el calor generado por la hidratación de un kg de cal viva permite calentar 2,79 kg de agua de 0º C a 100º C).

Aporte de materia seca (cal en polvo, por vía seca), que reduce la relación peso de agua/peso de sólido, es decir, la humedad del material resultante. La importancia relativa de estos tres fenómenos depende de numerosos factores.

En general puede decirse que el descenso total de la humedad natural provocado por la incorporación de cal viva al suelo es aproximadamente del 3- 4% por cada 1% de cal viva mezclada.

Dado que el tratamiento en obra se realiza a menudo en condiciones atmosféricas que favorecen la evaporación, la reducción de la humedad natural resulta muchas veces superior a la provocada exclusivamente por la adición de la cal viva. En estas condiciones, si los efectos señalados se provocan aprovechando la aireación y volteo de materiales, pueden producirse en las obras pérdidas de humedad que llegan al 5-8%.

Esta desecación, que se produce fundamentalmente durante la fase de mezclado, puede ser necesaria en el caso de suelos (de cualquier tipo) demasiado húmedos, en los que mediante este secado se consigue su puesta en obra.

Por el contrario, en el caso de que los suelos presenten humedades cercanas a la óptima de compactación, o incluso menores, esta desecación deberá ser compensada con un aporte de humedad complementario mediante riego, con objeto de mantener o conseguir la humedad óptima. Esta aportación de agua deberá tener en cuenta también la necesaria para la hidratación de la cal viva. La cantidad de agua a añadir es del orden del 30% del peso de la cal incorporada. Además, en el caso de suelos muy húmedos y en condiciones de temperaturas bajas, que se producen en invierno en obras de carreteras de montaña, se puede presentar el problema añadido de la congelación del agua.

La mezcla del suelo con cal viva permite, debido a la conjunción de los efectos anteriormente señalados, elevar la temperatura del mismo, fundiendo el hielo y reduciendo el exceso de humedad. En estas condiciones extremas, los porcentajes necesarios de cal viva son mayores de lo habitual.

En el caso de utilizarse cal apagada, ésta actúa sobre la humedad, pero únicamente como consecuencia del aporte de materia seca, es decir, mediante el tercer proceso antes señalado. Por lo tanto, la disminución total sólo es del orden del 0,3 % de humedad del suelo por cada 1% de cal apagada aportada.

Cuando se aplica la cal por vía húmeda, es decir, en forma de lechada de cal, se incorpora al suelo una mezcla de agua y cal en suspensión en un porcentaje aproximado del 30% en masa. En este caso se produce, por el contrario, un aumento de la humedad natural que será función de su concentración (masa de cal por litro de agua) y de la cantidad mezclada con el suelo.

Debido a ello, en el caso de trabajar sobre suelos con humedades naturales excesivas, o próximas a la humedad óptima de compactación, debe aplicarse el tratamiento por vía seca (cal viva o apagada en polvo), con objeto de no añadir más humedad al suelo y dificultar con ello su puesta en obra.

- Ψ *Cuando se quiera tratar suelos con humedades naturales excesivas, superiores a la humedad óptima de compactación, debe aplicarse el tratamiento por vía seca (cal viva o apagada en polvo), con el objeto de no añadir más humedad al suelo y dificultar su puesta en obra.*

Modificaciones de las características de la fracción arcillosa del suelo

Desde el mismo momento en que se incorpora a un suelo arcilloso, la cal provoca un intercambio iónico de los cationes que estabilizan la estructura laminar de las arcillas. Como consecuencia de ello aparecen fuerzas de unión (fuerzas de Var der Waals) que dan lugar a su floculación. Estos efectos se traducen, desde el punto de vista geotécnico, en:

- ❖ Una elevación importante del límite plástico del suelo sin modificación significativa de su límite líquido, lo cual se traduce en una reducción importante del índice de plasticidad. El suelo pierde su carácter pegajoso y pasa a tener un aspecto granular, mejorando sus características geotécnicas. En este estado, resulta más fácil su puesta en obra: extracción, carga, transporte, descarga, extendido, compactación, etc.
  - Ψ *Cuando se mezcla en obra un suelo arcilloso con cal viva o apagada, se modifica de forma inmediata el comportamiento del suelo. Éste pasa*

bruscamente de un estado plástico, es decir, deformable y viscoso, a un estado sólido, es decir, más rígido y friable.

- como consecuencia de este descenso de la plasticidad se produce también una mejora de la estabilidad volumétrica del suelo, reduciendo e incluso llegando a anular su eventual expansividad. Es frecuente que los suelos arcillosos sean muy expansivos, hinchándose ante la presencia de agua y disminuyendo su volumen hasta el estado inicial cuando ésta desaparece
- un incremento de la resistencia a esfuerzo cortante del suelo. Se produce al mismo tiempo que el cambio de estado anteriormente descrito y se traduce en una mejora inmediata de su capacidad de soporte.

Esto puede apreciarse en la mejora que se obtiene tanto en la capacidad de soporte inmediata del material como en el valor CBR.

- una modificación de las características de compactación del suelo. La curva Proctor del suelo tratado se sitúa debajo y a la derecha de la del suelo natural sin tratar, con una forma más plana. Dicho de otra manera, el tratamiento con cal reduce el valor máximo de la densidad aparente seca que puede alcanzarse para una energía de compactación específica y aumenta el valor de la humedad que permite obtenerla.

Esta tendencia se observa cualquiera que sea la energía de compactación aplicada, y es tanto más marcada cuanto más arcilloso es el suelo.

Esta ligera reducción de la densidad no debe interpretarse como un inconveniente. Por el contrario, las ventajas son evidentes, al ser más fácil alcanzar la densidad máxima y permitir trabajar con contenidos más elevados de humedad del suelo.

Ψ **Efectos a largo plazo**

La estabilización propiamente dicha consiste en una mejora a largo plazo (meses/años) por cementación, en función de la temperatura ambiente y de la

naturaleza del suelo, aumentando progresivamente la capacidad de soporte y la resistencia mecánica del mismo, a la vez que hace insensible la capa estabilizada al agua y a los ciclos hielo-deshielo como consecuencia de la disminución de la permeabilidad.

Al elevar la cal el pH del suelo estabilizado hasta valores de 12,5, se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos, incrementan la resistencia mecánica. Esta reacción de tipo puzolánica es lenta pero progresiva con el tiempo.

El mecanismo de estabilización es mucho más complejo que el de modificación, debido a las dos variables que influyen en su desarrollo: por un lado, su desarrollo en el tiempo, y por otro, la reacción cal-arcilla.

Las reacciones puzolánicas se producen entre la cal y los minerales arcillosos presentes en el suelo, cuando su proporción es significativa. El principio de la acción puzolánica se basa en la posibilidad de disolución, en un medio de pH elevado (superior a 12), de la sílice, la alúmina, y los óxidos de hierro presentes en los minerales arcillosos bajo formas cristalinas más o menos alteradas.

Estos elementos en solución reaccionan a continuación con el ión calcio de la cal para formar silicatos tricálcicos y bicálcicos, aluminatos tricálcicos y ferritoaluminatos cálcicos que precipitan y fraguan en presencia de agua, creando así enlaces de la misma naturaleza que los producidos por los conglomerantes hidráulicos.

Sin embargo, dado que las velocidades de solubilización de los componentes de la fracción arcillosa de un suelo son netamente inferiores a las que existen en presencia de materiales puzolánicos tradicionales (escorias, puzolanas, cenizas volantes, etc.), los fenómenos de cementación se desarrollan, en general, muy lentamente (varios meses, o incluso años, en las condiciones climáticas normales medias).

Los factores que intervienen en la cinética del proceso de endurecimiento de las mezclas suelo-cal son los siguientes:

- **La temperatura ambiente**

Varios estudios han demostrado la importancia de este factor. Las resistencias alcanzadas al cabo de un año para una mezcla suelo-cal en condiciones de conservación a 20 ºC pueden ser obtenidas a menudo en menos de 30 días si la temperatura de conservación es del orden de 40 ºC.

Por el contrario, el proceso de endurecimiento se ralentiza cuando la temperatura desciende por debajo de 5 ºC, y se detiene cuando es inferior a 0º C, aunque mientras el pH del suelo se mantenga por encima de 11 continúa en cuanto la temperatura se eleva de nuevo. Es muy importante tener en cuenta este aspecto si el tratamiento se aplica para la construcción de explanadas y capas de firme que están sujetas a ciclos de hielo y deshielo durante su construcción.

Salvo casos particulares (suelos arcillosos muy reactivos a la cal, tratamiento con cal viva, etc.), no es recomendable construir una capa de coronación o de firme con suelo tratado con cal en aquellas obras que puedan verse sometidas a largos de helada.

- **La cantidad y naturaleza (mineralogía) de la fracción arcillosa presente en el suelo**

Cuanto más elevada sea esta cantidad y más se alteren las estructuras cristalinas de los minerales arcillosos afectados (esmectitas, montmorillonitas), más rápida será la disolución de la sílice y de la alúmina y más importantes serán las cristalizaciones (en la medida en que estén disponibles las cantidades de cal y de agua libre necesarias).

No obstante, hay que señalar que algunos suelos, aunque se definan como arcillosos en el sentido geotécnico habitual (por el valor de su Índice de plasticidad o cualquier otro indicador), no producen reacciones puzolánicas (por ejemplo, arcillas sericitosas con alto contenido de mica procedentes de la alteración de esquistos).

Lo mismo sucede cuando el suelo contiene algunos componentes en exceso que alteren las condiciones químicas: materia orgánica, carbonatos, etc. En todos estos casos, suele ser suficiente hacer un estudio geotécnico para ver si se producen o no mejoras por acción de la cal sobre el suelo.

- **el estado hídrico del suelo**

La presencia en el suelo de una cantidad suficiente de agua libre es indispensable, en primer lugar, para asegurar la ionización con pH elevado del medio necesaria para la solubilización y, en segundo lugar, para la hidratación de los compuestos que lleva a la cementación de las partículas granulares.

Por todo ello, los valores de las características mecánicas esperables a largo plazo para las mezclas suelo-cal varían mucho de un suelo a otro, y son difícilmente evaluables con precisión en la fase de estudios, dado que los plazos necesarios y las condiciones de ejecución resultan difícilmente previsibles en esta etapa (época del año en que se llevan a cabo las obras, técnicas y medios de ejecución, etc.).

- *Por otra parte, al contrario de lo que sucede con los conglomerantes hidráulicos, existe una dosificación máxima de cal (que es función de la cantidad máxima "consumible" por la arcilla presente en el suelo), más allá de la cual las características mecánicas no pueden aumentar más e incluso corren el riesgo de empeorar, ya que la cal no consumida supone un polvo mineral que aumenta la sensibilidad al agua del material.*

2.5.2. Efectos de la incorporación del cemento en la estabilización de suelos

Al igual que con la cal, se puede distinguir igualmente entre efectos inmediatos y efectos a largo plazo, si bien con el cemento son estos últimos los que se buscan preferentemente.

Mejora por modificación inmediata

- **Modificaciones del estado hídrico**

Los efectos inmediatos se refieren principalmente al estado hídrico del suelo, que sufre un secado por el hecho de la adición de una cierta cantidad de materia seca y, en menor medida, de la pérdida de agua consumida en la hidratación del conglomerante. Este secado, según las dotaciones aplicadas, varía teóricamente, entre el 0,3 y el 0,5% del contenido de agua por punto porcentual de conglomerante, si bien en estos valores no se tiene en cuenta la evaporación que, al igual que con la cal, puede producirse en el transcurso de la mezcla in situ.

- **Modificación de las características de la fracción arcillosa del suelo**

En algunos países se emplean conglomerantes especiales para carreteras con un fuerte contenido de cal (viva o apagada), que pueden dar lugar a la floculación inmediata de las partículas arcillosas, al igual que ocurre con la cal (pero sin ser ni tan rápida, ni tan intensa). Para suelos finos y con plasticidad elevada, el tratamiento mixto, primero con cal y luego con cemento, es la solución más adecuada.

- **Efectos a medio y largo plazo**

Resultan del fraguado y endurecimiento del conglomerante, los cuales proporcionan a los suelos tratados una resistencia mecánica que puede ser predominante en su comportamiento. El valor de esta resistencia varía ampliamente y es función, principalmente, del tipo de conglomerante y de la dosificación del mismo.

Puede considerarse que el fraguado se desarrolla en tres etapas. La duración de cada una de ellas depende de la naturaleza de cada conglomerante y de la temperatura de la mezcla.

- **La primera etapa es la del comienzo del fraguado.**

Comprende el tiempo necesario para disolver y precipitar en forma de gel los silicoferroaluminatos de calcio en el agua libre del suelo. Este tiempo que corresponde al plazo de trabajabilidad, puede variar entre 2, 24 o más horas después de la fabricación de la mezcla. Dicho plazo es muy importante en las operaciones de tratamiento de suelos, puesto que fija un límite máximo a las operaciones de puesta en obra

- **La segunda etapa corresponde al desarrollo de la cristalización del gel**

Y por tanto de la rigidización de la mezcla que provoca el fraguado propiamente dicho. Se extiende desde algunos días en los conglomerantes con una proporción importante de clínker hasta algunas semanas en los de fraguado lento, como es el caso de algunos conglomerantes especiales para carreteras.

- **Finalmente, una vez completado el fraguado.**

Es decir, después de la formación de la casi totalidad de los ferrosilicoaluminatos hidratados, hay un periodo durante el cual continúan creciendo las resistencias mecánicas. En climas templados su duración puede variar, siempre dependiendo de la naturaleza de los conglomerantes, entre algunas semanas y varios meses.

Se puede considerar que el fraguado de los conglomerantes hidráulicos se interrumpe una vez que la temperatura de la mezcla desciende por debajo de cero grados centígrados, lo que puede llevar en algunos casos a tener que repetir el tratamiento.

Los efectos a largo plazo de la incorporación del cemento son diferentes según se trate de suelos granulares o de suelos finos. En los primeros, la acción cementante es similar a la que se produce en el hormigón vibrado, con la diferencia de que el conglomerante no rellena completamente los huecos del esqueleto granular.

En las arenas, la cementación se produce únicamente en los puntos de contacto entre granos. Cuanto más continua sea la granulometría, más reducidos serán los huecos entre partículas, más numerosas y de mayor tamaño las zonas de contacto entre ellas

y más eficaz el efecto cementante. Por el contrario, las arenas monogranulares, como las de playa, requieren una dotación elevada de cemento para ser estabilizadas.

En los suelos finos (arcillosos y limosos con plasticidad no elevada), la hidratación del cemento crea unos enlaces resistentes entre las partículas, formando una matriz que envuelve a las mismas. Esta matriz tiene una estructura de panal de la cual depende la resistencia de la mezcla, puesto que las aglomeraciones de partículas dentro de las "celdas" tienen una resistencia muy reducida y contribuyen muy poco a la del conjunto. La matriz fija las partículas, de forma que ya no pueden deslizar las unas sobre las otras. Es decir, el cemento reduce la plasticidad y aumenta la resistencia a esfuerzos cortantes. El efecto químico de superficie del cemento reduce la afinidad por el agua y con ello la capacidad de retención de la misma de los suelos arcillosos. Debido a esta menor afinidad por el agua y a la resistencia de la matriz, los cambios de volumen (hinchamientos) provocados por la absorción de agua y los efectos de la congelación y el deshielo disminuyen notablemente.

- Ψ *La incorporación de cemento en cantidad suficiente a un suelo permite obtener un material con una resistencia mecánica apreciable a corto-medio plazo. La dotación mínima de conglomerante depende del tipo de suelo, siendo los más adecuados los de tipo granular con finos poco plásticos.*

Conviene tener en cuenta que para que el suelo tratado desarrolle una resistencia mecánica apreciable a corta edad debe incorporarse al mismo un contenido mínimo de cemento que depende del tipo de suelo, y por debajo del cual solamente es razonable esperar que se produzcan efectos de mejora de la capacidad de soporte y de disminución de la sensibilidad al agua.

En cualquier tipo de suelo, se obtiene el máximo partido del proceso cementante cuando la compactación se realiza adecuadamente, con un contenido de humedad que facilite tanto dicha operación como la hidratación del cemento.

2.6. MATERIALES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

2.6.1. Identificación y selección de los bancos de muestra.

Según el mapa geológico de la ciudad de Tarija (ver anexo VII) los suelos no se presentan puros, principalmente los suelos están compuestos por mezclas de arcillas, limos, arenas, gravas y cantos rodados (suelos del periodo cuaternario), motivo por el cual se decidió recurrir a tres bancos de muestras seleccionados por *el método no probabilístico* "Muestreo opinatico o intencional", estos bancos son lugares conocidos por ser suelos predominados por mezclas de limos y arcillas con poco contenido de arenas y gravas.

Figura Nº11: Vista satelital de la ubicación de los bancos de muestra



Fuente: Google Earth

Los bancos están designados con la letra “M” e identificado con un número del 1 al 3 dependiendo del orden de recolección que se detalla a continuación:

- “M1” ubicado en el barrio de San Blas cerca de la Villa Olímpica, en las coordenadas UTM 20K 321169.0 E 7614473.0 S, al sur de la ciudad.
- “M2” ubicado en el barrio Simón Bolívar detrás del Mercado Mayorista del Sur, en la coordenadas UTM 20K 324961.0 E 7616022.0 S, al este de la ciudad.
- “M3” ubicado en la comunidad de Sella Cercado un kilómetro entrando por la escuela de dicha comunidad, en las coordenadas UTM 20K 323188.0 E 7628189.0 S, al norte de la ciudad.

Debido a que las granulometrías de los suelos son demasiado finas se contó también con un banco de arena denominado con la letra “A” e identificado con el número 1 que se detalla a continuación:

- “A1” Ubicado en la zona del Temporal (el angosto de San Luis) en las coordenadas UTM 20K 325630.0 E 7611921.0 S, al sur-este de la ciudad.

2.6.2. Selección de los estabilizantes

Se decidió utilizar la cal hidratada y el cemento como los estabilizantes para la elaboración de los eco-ladrillos, la selección de estos se debe a la vasta experiencia y buenos resultados en los procesos de estabilización de suelos.

2.6.3. La cal

La cal que se seleccionó para este estudio es fabricada por la empresa Calco-Bolivia, debido a su pureza y sus propiedades químicas, que cumple con las normativas de ASTM e ISO, con las siguientes características:

FICHA DE DATOS TECNICOS

1).- IDENTIFICACIÓN

1.1.- Identificación del producto

- Nombre del producto: Cal Industrial Hidratada
- Nombre Químico: Hidróxido de Calcio
- Sinónimos : Cal Apagada , Cal Hidratada
- Fórmula Química : Ca(OH)2

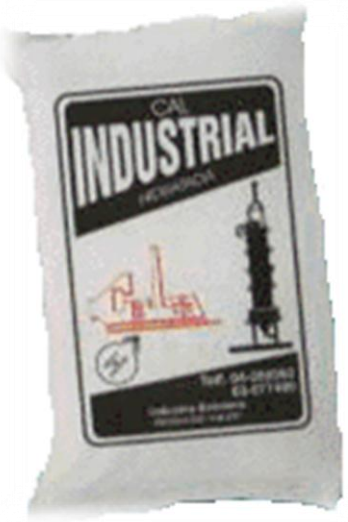
2).- INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

- Ca(OH)2 disponible (%) > 82.0
- Análisis Químico
  - Ψ Al2O3 (%) < 0.40
  - Ψ Fe2O3 (%) < 0.15
  - Ψ MgO (%) < 1.00
  - Ψ SO3 (%) < 1.00
  - Ψ SiO2 (%) < 1.20

3).- PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS

- Peso molecular 74.1 gr/mol
- Apariencia Polvo fino seco
- Color Blanco o blanco grisáceo
- Olor Inholoro
- pH 12 a 13 en solución de agua
- Temperatura de descomposición 580 ºC formando CaO + Agua
- Solubilidad en agua <2 gr/lt
- Peso Volumétrico 0.48 a 0.56 gr/cc

Figura Nº12: Presentación de la Cal Hidratada de Calco, Bolsa de 20 Kg.



Fuente: www.calcobolivia.com

2.6.4. El Cemento

Se escogió el Cemento el Puente IP-30 porque es de fácil disponibilidad, es decir que se lo encuentra tanto en el mercado local como en el nacional, cumple con todas las normativas bolivianas "NB-011", ASTM e ISO, es de bajo coste y fácil manipulación.

Figura Nº13: Presentación Cemento el Puente IP-30, bolsa de 50 Kg.



Fuente: SOBOCE

Es un cemento de uso y aplicación general, especialmente recomendado para elementos estructurales en general como zapatas, columnas, vigas, losas, pisos, muros, aceras y dinteles, obras sanitarias, cimientos, hormigones de todo tipo y otras aplicaciones muy diversas.

Tabla Nº3: Propiedades del Cemento el Puente IP-30

Material : Cemento Portland con Puzolana tipo IP30				
			CEMENTO	**REQUISITOS**
ANALISIS QUIMICO		**Unidad**	**LIDER IP30**	**Según NB011**
Oxido de Magnesio: (NB 061)	MgO	%	4,10	menor a 6.0
Oxido de Azufre: (NB 061)	S0 3	%	2,70	menor a 4,0
Pérdidas por Calcinación: (NB 061)	PPC	%	3,00	menor a 7,0
ENSAYOS FISICOS		**Unidad**		
Tiempo inicial de fraguado (NB 063)		Hrs:min	2:09	mayor a 0:45
Tiempo final de fraguado (NB 063)		Hrs:min	4:19	menor a 10:00
Expansión (Le-Chatelier C-A) (NB 643)		mm.	0,80	menor a 10
Finura, Superficie Específica según Blaine(NB 472)		cm 2 /g	4244	mayor a 2600
Peso específico (NB 064)		g/cm 3	2,94	No especifica
ENSAYOS MECANICOS		**Unidad**		
NORMA NB 470 (ASTM C109)				
Resistencia a la compresión	3 días	MPa	17,5	No especifica
en mortero normalizado a:	7 días	MPa	26,3	mayor a 17
	28días	MPa	33,7	mayor a 30

Fuente: SOBOCE

Composición del cemento: Clinker = 70 % y Puzolana = 30%

2.7. MAQUINARIA UTILIZADA EN EL ESTUDIO

2.7.1. Máquina de Moldeado Ceta-Ram II

La CETA-RAM es una prensa portátil, de operación manual, concebida para fabricar bloques huecos de suelo-cemento para construcción, diseñada por el ing. Roberto E. Lou Ma del CENTRO DE EXPERIMENTACIÓN EN TECNOLOGÍA APROPIADA (C.E.T.A.) Guatemala.

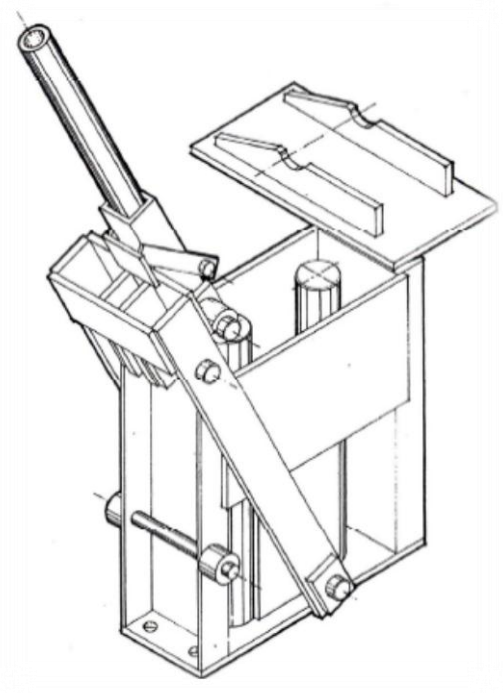
La CETA-RAM se compone de tres partes principales:

- Caja o Molde.

- Pistón.

- Dispositivo de Palanca.

Figura Nº14: Esquema CETA-RAM II



Fuente: Manual CETA-RAM II

No obstante de tratarse de un aparato sumamente portátil, de gran simplicidad mecánica, bajo costo, fácil manejo y mantenimiento sencillo, la CETA-RAM es capaz de moldear a alta presión entre 50 a 80 Kg/cm^2 (según el manual de la máquina y el modelo estático de la misma ver anexo VIII), bloques densos y bien conformados de la más alta calidad, a razón de unas 600 unidades por jornada de ocho horas (según descripción del manual de la CETA-RAM II ver ANEXO I).

Figura Nº15: Fotografia CETA-RAM II, construida para el estudio.



Fuente: Elaboración propia

El costo de construcción de la CETA-RAM, en nuestro medio se estima conforme al siguiente presupuesto:

Tabla Nº4: Presupuesto CETA-RAM II

Material	Unidad	Cantidad	P/U	Total
Plancha 10 mm	m2	0,75	1000,00	750,00
Pletina 10 mm	ml	2,50	70,00	175,00
Rodamientos 5cm	pza.	2,00	75,00	150,00
Rodamientos 4cm	pza.	2,00	50,00	100,00
Tubo galvanizado diferentes diámetros	ml	4,00	40,00	160,00
Angular 2"x2"x8mm.	ml	1,00	70,00	70,00
Pernos diferentes diámetros	--	11,00	25,00	275,00
mano de obra	glb	1,00	600,00	600,00
			Total (Bs)	2280,00

Fuente: Elaboración Propia

El producto final de la máquina corresponde a un ladrillo compactado de las siguientes dimensiones, 33.2 cm de largo, 15.7 cm de ancho y 11.5 cm de alto, la intención de las dimensiones es que tres ladrillos de largo y ocho de alto más sus juntas formen un metro cuadrado de muro, estos ladrillos cuentan con dos perforaciones de 6 cm de diámetro, están pensadas para que se pueda poner barras de acero de refuerzo rellenadas con hormigón para conforman pilares, también pueden dar pasa a tuberías de instalaciones sin necesidad de picar la pares, adicionalmente estas permiten que el aire se quede en constante movimiento formando cámaras termo acústicas disminuyendo el ruido y regulando la temperatura interior de las casas.

Figura Nº16: Fotografia casa de Eco-ladrillos en construccion.



Fuente: Hábitat para la Humanidad

2.8. ENSAYOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

Para la realización de este estudio se utilizaron ensayos de laboratorio aplicados al estudio de los suelos y la resistencia de materiales de mampostería, y ensayos empíricos utilizados en la fabricación de adobes.

Los ensayos de laboratorio fueron: contenidos de agua en el suelo (ASTM D2216), análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422), límites de consistencia (ASTM D4318), estabilización de suelos arcillosos método Eades and Grim (ASTM C997-3), hidrómetro (AASHTO T98), densidad de solidos (ASTM D854), compactación Proctor estándar (ASTM D698), ensayo de erosión acelerada Swimburne (UNE-41410), absorción de agua por capilaridad (UNE-772-11) y Ladrillos cerámicos - Métodos de ensayo (APNB 1211002).

Los ensayos empíricos fueron: granulometría método de sedimentación del frasco, prueba del bastoncillo, bola de presión y bola de impacto.

Para mayor referencia de los ensayos ver ANEXO VI y ANEXO IX.

“PROCESO DE INVESTIGACION”

3.1. PROCESO EXPERIMENTAL

Según lo explicado en el acápite 2.6.1. los suelos a de aquí en adelante serán manejados con designaciones o designaciones estabilizadas como de describe a continuación.

Digamos que sea la designación M1-75+CAL%OPT-2%, el “M1” indica de que suelo se trata según acápite 2.6.1., el “-75” se refiere a su contenido porcentual de suelo en la mezcla en este caso 75% (en caso de no existir el segundo término se trata de muestra pura al 100%) el faltante es decir el 25% es arena correspondiente a la designación “A1”, el tercer término “CAL%OPT” se refiere a con que estabilizante se incluyó al suelo en este caso se trata de cal en caso de que sea “CE%OPT” es cemento, y finalmente el cuarto término “-2%” se refiere a la adición o sustracción de estabilizante al contenido óptimo en este caso es el contenido óptimo de cal a incluir es de 7.71% pero como la designación nos indica que es -2% el contenido de cal a incluir es de 5.71%.

En la Tabla N°19: Dosificaciones generales de las designaciones, podremos apreciar todas la designaciones y designaciones estabilizadas de una manera más exacta.

También se incluyeron otras designaciones pero estas ya no corresponden a Eco-ladrillos, estas corresponden a adobes de construcción que fueron elaborados a partir de los suelos estudiados u otros, es decir Adobes M1, Adobes M3 son con los suelos estudiados, y Adobes S/C1, Adobes S/C2 son adobes comprados en fábricas artesanales donde el S/C1 indica el orden de compra de los adobes

En la fábrica que podemos catalogar como S/C1 se llevó los suelos M1 y M3 para que confeccionaran los adobes, también en esta se compraron ladrillos gambotes para realizar ensayos a compresión simple, las fábricas están ubicadas en la Av. los Sauces en la zona de la floresta en la ciudad de Tarija.

3.1.1. Características de los suelos estudiados

Granulometría.- Una vez obtenidas las muestras del suelo se procedió a realizar el análisis granulométrico para determinar las fracciones arenosas, limosas y arcillosas del suelo, según norma ASTM D-422.

Tabla Nº5: Composición granulométrica de los suelos.

Designación	Tamaño (mm)	% Porcentajes			
		M1	M2	M3	A1
Arena	4,750 - 0,075	25,85	18,23	5,95	97,93
Limo	0,075 - 0,002	36,11	42,43	34,70	--
Arcilla	< 0,002	38,04	39,34	59,35	--

Fuente: Elaboración Propia

Límites de consistencia.- Una vez determinada la granulometría se procedió a la determinación de los límites de consistencia según norma ASTM D-4318.

Tabla Nº6: Limites de consistencia de los suelos.

Designación	M1	M2	M3	A1
Limite Liquido	24.88%	27.04%	36.29%	NP
Limite Plástico	12.57%	13.47%	21.56%	NP
Índice de Plasticidad	12.30%	13.57%	14.73%	NP

Fuente: Elaboración Propia

Se determinó que el suelo “M2” es muy similar al suelo “M1” por lo que solo se trabaja de aquí en adelante con el suelo “M1”, el suelo “M2” se descartará y solo quedará de referencia.

Clasificación de los suelos según SUCS y AASHTO

Obtenidos la granulometría y límites de consistencia de los suelos se realizó la clasificación de los suelos según las clasificaciones de la SUCS y AASHTO para la clasificación SUCS ver ANEXO III.

Tabla N°7: Clasificación de los suelos.

Designación	M1	M2	M3	A1
SUCS	CL	CL	CL	SP
AASHTO	A-6 IG9	A-6 IG9	A-6 IG20	A-3 IG0

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2. Confección y designación de mezclas de suelo

Para el estudio se confeccionaron mezclas de suelo entre arcilla y arena, para tener una gama mayor de suelos para estudiar en condiciones controladas.

Se designó a las mezclas con la muestra de arcilla correspondiente y su fracción en dicha mezcla, se determinaron sus porcentajes de arenas, limos y arcillas y así mismo los límites de consistencia y clasificación de dichos suelos.

Tabla N°8: Designación de las mezclas de suelo y sus características.

Designación	% de suelo empleado		Granulometría %			Limite Liquido %	Limite Plástico %	Índice de Plasticidad %	Clasificación SUCS
	M1	A1	Arena	Limo	Arcilla				
M1	100	0	25,85	36,11	38,04	24,88	12,57	12,30	CL
M1-75	75	25	44,39	27,08	28,53	21,75	9,65	12,10	CL
M1-50	50	50	62,93	18,06	19,02	16,52	3,75	12,77	SC
M1-40	**40**	60	70,34	14,44	15,22	11,97	0,00	11,97	SC
	M3	**A1**							
M3	100	0	5,95	34,70	59,35	36,29	21,56	14,73	CL
M3-75	75	25	29,46	26,03	44,51	30,10	15,43	14,67	CL
M3-50	50	50	52,98	17,35	29,68	23,51	9,02	14,49	SC
M3-40	40	60	62,38	13,88	23,74	18,25	4,12	14,13	SC

Fuente: Elaboración Propia

3.1.3. Determinación de la humedad óptima para el moldeado

Las humedades de compactación óptimas por el método de Proctor estándar T-99 son aproximadamente iguales al límite plástico para suelos arcillosos, por lo que el suelo se mantiene en un estado semi-solido, razón por la cual es inadecuado para el moldeado de los Eco-ladrillos en la CETA-RAM II.

Debido a esto se decidió emplear el método "Bola de impacto y Bola de presión", que es un método empírico aproximado utilizado para la confección de adobes, que arroja resultados entre un 2% a 4% superiores al del límite plástico, por lo que el suelo se mantiene en un estado ligeramente plástico, es decir que no es demasiado húmedo como para deformarse fácilmente, ni es demasiado seco como para no conformarse dentro del molde.

Tabla N°9: Diferentes humedades óptimas de compactación

Designación	Densidad máxima según Proctor t99 (gr/cm3)	Humedad óptima de compactación %	Limite plástico %	Humedad óptima bola presión %	Humedad óptima bola de presión %
M1	1,94	10,98	12,57	14,21	14,75
M1-75	1,99	11,03	9,65	11,95	12,12
M1-50	2,06	10,95	3,75	6,54	5,89
M1-40	1,97	10,27	0	4,23	4,57
M3	1,61	20,14	21,56	23,52	23,36
M3-75	1,72	16,86	15,43	18,01	18,27
M3-50	1,91	11,94	9,02	10,10	10,24
M3-40	1,88	12,71	4,12	6,75	7,01

Fuente: Elaboración Propia

Una vez realizados estos ensayos de humedad óptima se confecciono eco-ladrillos con dichas humedades, además se utilizaron humedades ligeramente superiores e inferiores en un 2% de las humedades estimadas por el método empírico, donde se pudo constatar los siguientes resultados.

Tabla N°10: Aplicación de diferentes humedades (±2% de la humedad óptima) para la conformación de Eco-ladillos

Designación	Humedad óptima -2%		Humedad óptima		Humedad óptima +2%	
	Humedad estimada	Humedad calculada	Humedad estimada	Humedad calculada	Humedad estimada	Humedad calculada
M1	12.48	11,95	14,48	14,89	16,48	16,57
M1-75	10,04	9,57	12,04	11,76	14,04	14,25
M1-50	4,22	4,10	6,22	6,87	8,22	8,42
M1-40	2,40	2,53	4,40	5,21	6,40	6,87
M3	21,44	21,03	23,44	23,56	25,44	25,39
M3-75	16,14	16,01	18,14	19,12	20,14	20,54
M3-50	8,17	8,21	10,17	10,75	12,17	12,65
M3-40	4,88	4,52	6,88	7,12	8,88	9,01

Fuente: Elaboración Propia

Según las diferentes humedades aplicadas a las muestras de suelos para la fabricación de Eco-ladrillos, pasaron cinco sucesos diferentes para cuatro agrupaciones de mezclas como se describe a continuación:

1) **Para los suelos "M1, M1-75, M3 y M3-75" con contenido óptimo de humedad.**

   Los suelos se amoldan correctamente a la máquina, la mano apenas deja marca sobre la superficie al mover los bloques, el pistón sube con facilidad a al momento de conformar los bloques, el bloque sale con facilidad de la máquina y finalmente no se deforman al momento de trasladarlos para su posterior secado.

2) **Para los suelos "M1-50, M1-40, M3-50 y M3-40" con contenido de humedad óptimo.**

   Los suelos se amoldan correctamente a la máquina, el pistón sube con facilidad a al momento de conformar los bloques, el bloque sale con facilidad de la máquina y finalmente al momento de trasladarlos para su posterior secado estos se desmoronan o se rajan, es posible que esto se deba a la poca cantidad de arcilla en la mezcla de suelo reduciendo drásticamente su cohesión.

3) **Para todas las mezclas con contenido de humedad 2% menor a la óptima.**
   Los suelos no se amoldan correctamente a la máquina las caras quedan de manera irregular o deforme, el pistón sube con dificultad a al momento de conformar los bloques, pedazos del bloque se desmoronan al sacarlos de la máquina y finalmente estos se rompen o desmoronan al momento de trasladarlos para su posterior secado.

4) **Para los suelos "M1, M1-75, M3 y M3-75" con contenido de humedad 2% mayor a la óptima.**
   Los suelos se amoldan correctamente a la máquina, la mano deja grandes marcas sobre la superficie al mover los bloques, el pistón sube con facilidad a al momento de conformar los bloques, pero parte del material es expulsado por los contornos del pistón, el bloque sale con facilidad de la máquina y finalmente se deforman al momento de trasladarlos para su posterior secado.

5) **Para los suelos "M1-50, M1-40, M3-50 y M3-40" con contenido de humedad 2% mayor a la óptima.**
   Los suelos se amoldan correctamente a la máquina, la mano deja grandes marcas sobre la superficie al mover los bloques, el pistón sube con facilidad a al momento de conformar los bloques, pero parte del material es expulsado por los contornos del pistón, el bloque sale con facilidad de la máquina y finalmente se desmorona al momento de trasladarlos para su posterior secado.

Por lo que se procedió a descartar todos los suelos "SC" según la clasificación de la SUCS, es decir M1-50, M1-40, M3-50 y M3-40, no son aptos para la para la conformación de Eco-ladrillos según los visto en el inciso 2 de este acápite.
Y todos los suelos "CL" según la clasificación de la SUCS, es decir M1, M1-75, M3 y M3-75, son aptos para la para la conformación de Eco-ladrillos según los visto en el inciso 1 de este acápite.

Figura N°17: Fotografía de Eco-ladrillos con diferente humedad.



Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede apreciar en la Figura N°16, a la izquierda tenemos un bloque con humedad óptima, y a la derecha un bloque con humedad mayor a la óptima.

3.1.4. Determinación de contenido óptimo de cemento o cal

Debido a su rapidez y fiabilidad, se consideró para la estabilización el método del pH, planteado por Eades and Grim (1966), indicado en la norma ASTM C 977-00.

Este procedimiento se basa en el hecho de que la adición de cal necesaria para estabilizar un suelo es aquella que garantiza un elevado pH que permita el desarrollo de las reacciones puzolánicas.

Para ello, se ensayan muestras con distintos porcentajes de cal u otro estabilizante, midiéndose el pH en determinadas condiciones. El porcentaje óptimo es aquel que permite alcanzar el valor de "12,4" en el caso de la cal, o en caso de usar otro estabilizante con un pH mayor a "11,0" se busca igualar el pH con una diferencia de "0.2", suponiendo un pH de "12,0" el valor buscado seria de "11,8".

Se aplicó este método a las diferentes mezclas de suelo y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla N°11: Ensayo Eades & Grim para mezclas de M1 con Cal

Estabilizante: Cal hidratada con un pH de 12,56 en una solución al 2%				
% Estabilizante	**M1**	**M1-75**	**M1-50**	**M1-40**
0,00	7,78	7,87	7,95	7,99
2,00	11,86	11,93	11,99	12,02
4,00	12,12	12,20	12,24	12,26
6,00	12,31	12,34	12,37	12,39
8,00	12,38	12,41	12,44	12,45
10,00	12,45	12,47	12,49	12,50

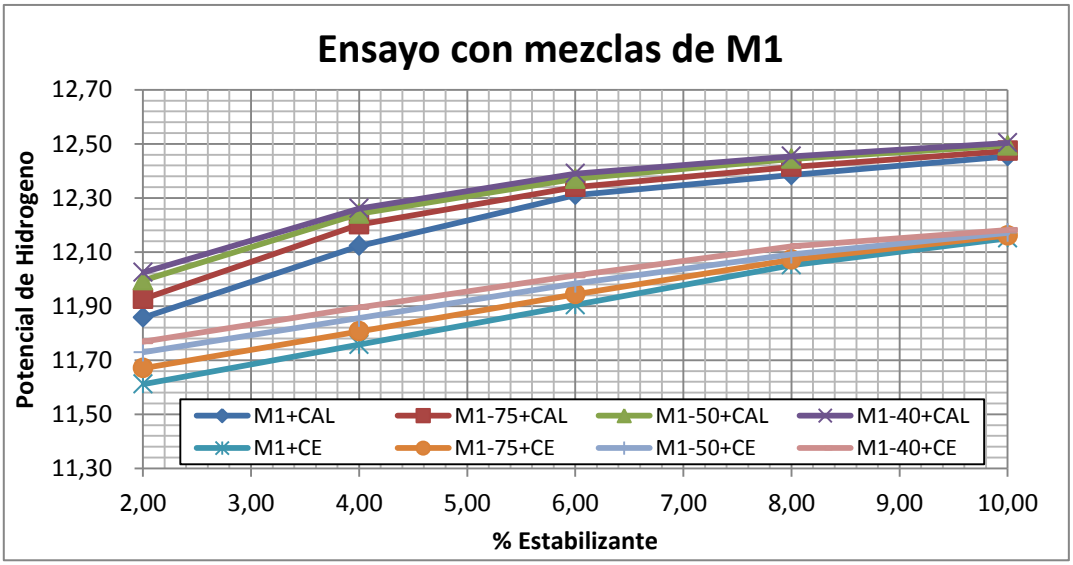
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°12: Ensayo Eades & Grim para mezclas de M1 con Cemento

Estabilizante: Cemento IP30 con un pH de 12,23 en una solución al 2%				
% Estabilizante	M1	M1-75	M1-50	M1-40
0,00	7,78	7,87	7,95	7,99
2,00	11,61	11,67	11,73	11,77
4,00	11,76	11,81	11,86	11,90
6,00	11,90	11,94	11,98	12,01
8,00	12,05	12,07	12,09	12,12
10,00	12,15	12,16	12,17	12,18

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N°18: Método gráfico Eades & Grim para mezclas de M1 con Cal y Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°13: Ensayo Eades & Grim para mezclas de M3 con Cal

Estabilizante: Cal con un pH de 12,56 en una solución al 2%				
% Estabilizante	**M3**	**M3-75**	**M3-50**	**M3-40**
0,00	8,02	8,11	8,20	8,24
2,00	12,05	12,12	12,19	12,22
4,00	12,27	12,35	12,39	12,41
6,00	12,41	12,44	12,47	12,49
8,00	12,51	12,54	12,57	12,58
10,00	12,58	12,60	12,62	12,63

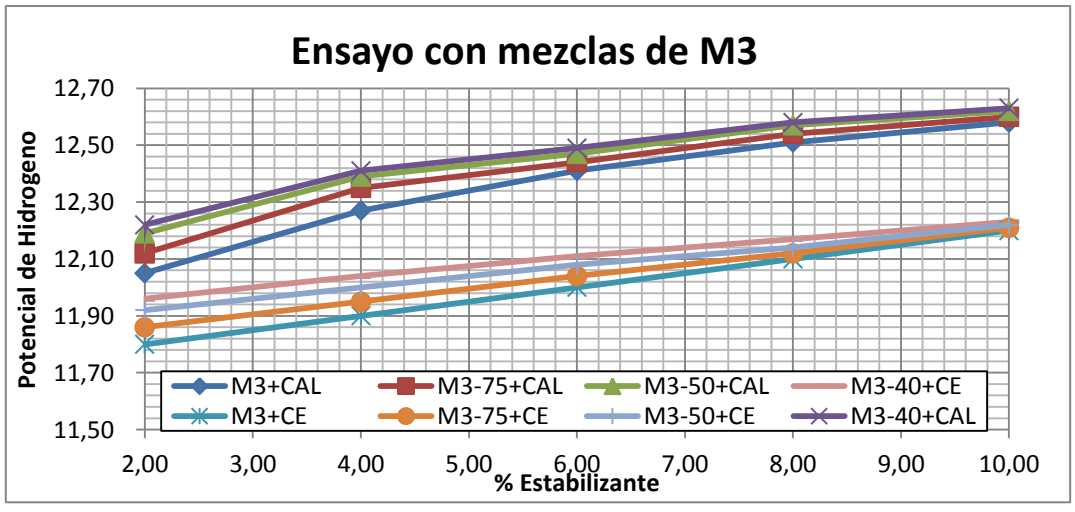
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°14: Ensayo Eades & Grim para mezclas de M3 con cemento

Estabilizante: Cemento con un pH de 12,23 en una solución al 2%				
% Estabilizante	**M3**	**M3-75**	**M3-50**	**M3-40**
0,00	8,02	8,12	8,22	8,28
2,00	11,80	11,86	11,92	11,96
4,00	11,90	11,95	12,00	12,04
6,00	12,00	12,04	12,08	12,11
8,00	12,10	12,12	12,14	12,17
10,00	12,20	12,21	12,22	12,23

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N°19: Método gráfico Eades & Grim para mezclas de M3 con Cal y Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Según los ensayos los contenidos óptimos de estabilizante a incluir son los siguientes.

Tabla N°15: Contenido óptimo de estabilizante para mezclas de M1 con el ensayo Eades & Grim

designación	M1	M1-75	M1-50	M1-40
Contenido óptimo con Cal	8,57 %	7,71 %	6,86 %	6,33 %
Contenido óptimo con Cemento	7,73 %	7,38 %	6,90 %	6,36 %

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°16: Contenido óptimo de estabilizante para mezclas de M3 con el ensayo Eades & Grim

designación	M3	M3-75	M3-50	M3-40
Contenido óptimo con Cal	5,85 %	5,11 %	4,25 %	3,89 %
Contenido óptimo con Cemento	6,60 %	5,77 %	4,75 %	3,75 %

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.5. Dosificación de muestras para la conformación de Eco-ladrillos.

Según lo visto en los acápites 3.1.3. y 3.1.4. se realizó la dosificación y preparación de material para la conformación de 15 Eco-ladrillos por designación aceptada.

También a estas designaciones se las dosifico para la conformación de 30 Eco-ladrillos adicionales con contenidos de estabilizante en un 2% superior y un 2% inferior al óptimo.

Adicional se conformaron 15 Eco-ladrillos adicionales por designación aceptada sin ningún tipo de estabilizante.

En el acápite 3.1.3. se elaboraron Eco-ladrillos para la determinación de la humedad óptima de conformación, con esos datos se determinó el peso específico de los Eco-ladrillos ensayados.

Tabla N°17: Peso específico de Eco-ladrillos sin estabilizar

Designación	largo	ancho	alto	ø orificio	Área Bruta	Área Neta	Volumen Bruto	Volumen Neto	Peso Húmedo	Peso Seco	γ Bruto	γ Neto
	cm	cm	cm	cm	cm^2	cm^2	cm^3	cm^3	g	g	g/cm^3	g/cm^3
M1	32,1	15,5	12,5	6,0	497,5	441,0	6.219,3	5.512,5	10.225,2	8.899	1,43	1,61
M1-75	32,2	15,6	12,6	6,0	502,3	445,7	6.329,2	5.616,7	10.035,4	8.957	1,49	1,68
M3	32,2	15,6	12,6	6,0	502,3	445,7	6.329,2	5.616,7	9.771,5	7.908	1,24	1,40
M3-75	32,1	15,5	12,5	6,0	497,5	441,0	6.219,3	5.512,5	9.448,5	7.998	1,29	1.45

Fuente: Elaboración Propia.

Según los resultados mostrados en la tabla N°17 se realizaron las dosificaciones para las designaciones aceptadas.

Tabla N°18: Dosificaciones generales de las designaciones

Designación Estabilizada	P/U	Cantidad	Contenido de estabilizante	Humedad óptima	peso estimado	Peso a mezclar +20%	Peso designación	Peso estabilizante	Peso Agua
	Kg	u	%	%	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
M1	8,90	15	0	14,48	133,50	160,20	160,20	0	23,20
M1+CAL%OPT	8,90	15	8,57	14,48	133,50	160,20	146,47	13,73	23,20
M1+CAL%OPT-2%	8,90	15	6,57	12,04	133,50	160,20	149,67	10,53	19,29
M1+CAL%OPT+2%	8,90	15	10,57	12,04	133,50	160,20	143,27	16,93	19,29
M1-75+CAL%OPT	8,90	15	7,71	12,04	133,50	160,20	147,85	12,35	19,29
M1-75+CAL%OPT-2%	8,90	15	5,71	12,04	133,50	160,20	151,05	9,15	19,29
M1-75+CAL%OPT+2%	8,90	15	9,71	12,04	133,50	160,20	144,64	15,56	19,29
M1+CE%OPT	8,90	15	7,73	14,48	133,50	160,20	147,82	12,38	23,20
M1+CE%OPT-2%	8,90	15	5,73	12,04	133,50	160,20	151,02	9,18	19,29
M1+CE%OPT+2%	8,90	15	9,73	12,04	133,50	160,20	144,61	15,59	19,29
M1-75+CE%OPT	8,90	15	7,38	12,04	133,50	160,20	148,38	11,82	19,29
M1-75+CE%OPT-2%	8,90	15	5,38	12,04	133,50	160,20	151,58	8,62	19,29
M1-75+CE%OPT+2%	8,90	15	9,38	12,04	133,50	160,20	145,17	15,03	19,29
M3	7,91	15	0	23,44	118,62	142,35	142,35	0	33,37
M3+CAL%OPT	7,91	15	5,85	23,44	118,62	142,35	134,02	8,33	33,37
M3+CAL%OPT-2%	7,91	15	3,85	12,04	118,62	142,35	136,87	5,48	17,14
M3+CAL%OPT+2%	7,91	15	7,85	12,04	118,62	142,35	131,17	11,17	17,14
M3-75+CAL%OPT	7,91	15	5,11	18,14	118,62	142,35	135,08	7,27	25,82
M3-75+CAL%OPT-2%	7,91	15	3,11	12,04	118,62	142,35	137,92	4,43	17,14
M3-75+CAL%OPT+2%	7,91	15	7,11	12,04	118,62	142,35	132,23	10,12	17,14
M3+CE%OPT	7,91	15	6,60	23,44	118,62	142,35	132,95	9,40	33,37
M3+CE%OPT-2%	7,91	15	4,60	12,04	118,62	142,35	135,80	6,55	17,14
M3+CE%OPT+2%	7,91	15	8,60	12,04	118,62	142,35	130,11	12,24	17,14
M3-75+CE%OPT	7,91	15	5,77	18,14	118,62	142,35	134,14	8,21	25,82
M3-75+CE%OPT-2%	7,91	15	3,77	12,04	118,62	142,35	136,98	5,37	17,14
M3-75+CE%OPT+2%	7,91	15	7,77	12,04	118,62	142,35	131,29	11,06	17,14

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.6. Proceso de Mezclado y confección de Eco-ladrillos.

Para el proceso de mezclado se procedió en el mismo orden de designaciones mostrado en la tabla N°18.

Se disgregaron los suelos con contenido de humedad natural, a estos suelos se los paso por la malla N°4 (4.75 mm), donde todo el material retenido en dicha malla fue descartado y solo se utilizó el material que pasaba la malla.

Figura N°20: Muestra tamizada y pesada para la confección de Eco-ladrillos.



Fuente: Elaboración Propia.

Una vez preparado el material se procedió al pesaje del mismo según cada designación dosificación, debido a la capacidad de la mezcladora se decidió hacer tres ciclos de mezclado, dividiendo en tres cada dosificación y realizándolas por separado.

En el primer ciclo de mezclado se comprobó que la cantidad de agua a incluirse era la correcta aplicando el método empírico de "Bola de impacto y Bola de presión", donde todas las muestras mostraron el comportamiento deseado.

Cada ciclo de mezclado estuvo compuesto por 4 etapas

1) llenado de la mezcladora con la designación de suelo correspondiente y su porcentaje de estabilizante.

2) Batido de la designación en seco por el lapso de un minuto, esto se realiza con la finalidad de que el suelo y estabilizante estén mezclados de manera más o menos homogénea.
3) Adición del agua de mezclado de poco en poco durante un batido de tres minutos.
4) Batido de homogeneización de dos minutos y vaciado de la mezcla a una carretilla.

Figura N°21: Fotografía de una designación en la mezcladora Eco-ladrillos.



Fuente: Elaboración Propia.

Una vez que se finalizó el proceso de mezclado se continuó con la conformación de los Eco-ladrillos, el molde está diseñado de tal manera que retiene el mismo volumen que un balde de albañil enrasado, pero para que los bloques salgan de un tamaño similar se pesó cantidad de material correspondiente a la media de tres baldes de albañil enrasados, para poner esa cantidad exacta en el molde de la CETA-RAM II.

El proceso de elaboración de un Eco-ladrillo consiste en un ciclo de 9 partes o movimientos.

1) Cargado de material en el molde.
2) Cerrado de la tapa.
3) Levantado de la palanca a posición vertical.
4) Quitar el seguro de la palanca y encastrar de los rodillos con las muescas en la tapa.
5) Accionado de la palanca a posición horizontal.

6) Dirigir la palanca a posición vertical y colocar el seguro de la palanca.
7) Volver la palanca a posición inicial y retirar la tapa.
8) Accionar la palanca hacia abajo.
9) Retirado del Eco-ladrillo y acopiado del mismo.

Figura N°22: Proceso de elaboración de un Eco-ladrillo



Fuente: Elaboración Propia.

Una vez que todos los Eco-ladrillos estuvieron conformados, se los retiro durante 28 días a que curen de manera natural, para sus posteriores ensayos.

3.2. ENSAYOS EN ECO-LADRILLOS

3.2.1. Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)

Se seleccionó dos especímenes completos al azar, de los cuales uno es de referencia y otro es al que se le aplica el chorro de agua.

Figura N°23: Diversas fotografías del ensayo de erosión acelerada.



Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede apreciar en la Figura N°22, 1) fotografía del equipo de aceleración acelerada, 2) fotografía del equipo de erosión acelerada funcionando sobre un Eco-ladrillo sin estabilizar, 3) fotografía del equipo de erosión acelerada funcionando

sobre un adobe, 4) fotografía de un Eco-ladrillo estabilizado después de la aceleración acelerada y 5) ampliación de la oquedad mostrada en “4”.

Tabla N°19: Resultados del ensayo de erosión acelerada (SAET)

designación	Profundidad de la oquedad	Catalogación
	mm	Apto/No Apto
M1	10	Apto
M1+CAL%OPT-2%	7	Apto
M1+CAL%OPT	5	Apto
M1+CAL%OPT+2%	5	Apto
M1-75+CAL%OPT-2%	8	Apto
M1-75+CAL%OPT	6	Apto
M1-75+CAL%OPT+2%	6	Apto
M1+CE%OPT-2%	5	Apto
M1+CE%OPT	3	Apto
M1+CE%OPT+2%	3	Apto
M1-75+CE%OPT-2%	7	Apto
M1-75+CE%OPT	4	Apto
M1-75+CE%OPT+2%	4	Apto
M3	7	Apto
M3+CAL%OPT-2%	5	Apto
M3+CAL%OPT	3	Apto
M3+CAL%OPT+2%	2	Apto
M3-75+CAL%OPT-2%	4	Apto
M3-75+CAL%OPT	3	Apto
M3-75+CAL%OPT+2%	2	Apto
M3+CE%OPT-2%	3	Apto
M3+CE%OPT	2	Apto
M3+CE%OPT+2%	2	Apto
M3-75+CE%OPT-2%	4	Apto
M3-75+CE%OPT	3	Apto
M3-75+CE%OPT+2%	3	Apto
Adobes M1	18	No Apto
Adobes M3	16	No Apto
Adobes S/C1	20	No Apto
Adobes S/C2	24	No Apto

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la tabla N°19, todos los Eco-ladrillos son aptos para su empleo según pide la normativa.

3.2.2. Absorción de Agua por capilaridad

El ensayo se realizó utilizando el mismo equipo mostrado en el ANEXO VI, los elementos de composición del equipo fueron instrumentos caseros pero tomando en cuenta la funcionalidad de conjunto.

Figura N°24: Equipo para la determinación de la absorción de agua por capilaridad



Fuente: Elaboración Propia.

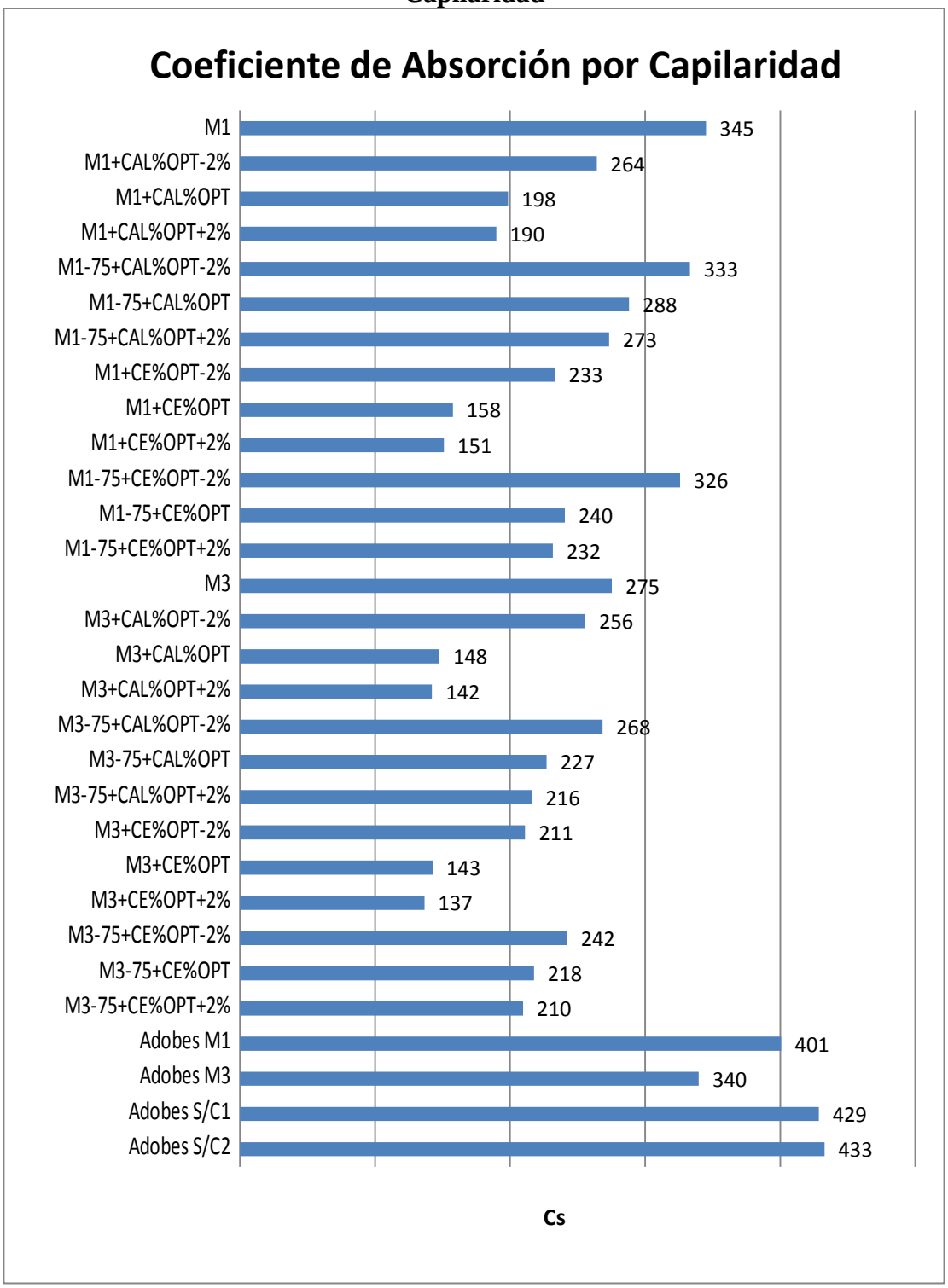
Se seleccionó cinco especímenes completos de las designaciones estabilizadas curados durante 28 días para la aplicación de este ensayo, se lo realizo según lo descrito en el ANEXO VI, se consideró un sección constante de 408 cm2, también este ensayo se realizó sobre adobes conformados por los suelos utilizados en este estudio sin estabilizar y adobes de producción local para tener un punto de referencia en cuanto a la mejora que presenta con la compresión con la CETA-RA II y la aplicación de estabilizantes, como se detalla en la tabla a continuación.

Tabla N°20: Resultados del ensayo absorción de agua por capilaridad

Designación	Ensayo 1			Ensayo 2			Ensayo 3			Ensayo 4			Ensayo 5			Promedios Cs
	md	ms	Cs	md	ms	Cs	md	ms	Cs	md	ms	Cs	md	ms	Cs	
	g	g	$\left(\frac{g}{m^2 * s^{\frac{1}{2}}}\right)$	g	g	$\left(\frac{g}{m^2 * s^{\frac{1}{2}}}\right)$	g	g	$\left(\frac{g}{m^2 * s^{\frac{1}{2}}}\right)$	g	g	$\left(\frac{g}{m^2 * s^{\frac{1}{2}}}\right)$	g	g	$\left(\frac{g}{m^2 * s^{\frac{1}{2}}}\right)$	$\left(\frac{g}{m^2 * s^{\frac{1}{2}}}\right)$
M1	9047	9445	361	8358	8725	333	8616	8995	343	8875	9265	354	8401	8770	335	345
M1+CAL%OPT%OPT-2%	9119	9486	333	8424	8763	307	8685	9034	317	8945	9306	326	8468	8751	256	264
M1+CAL %OPT	8957	9186	207	8275	8486	192	8531	8749	197	8787	9011	203	8317	8530	192	198
M1+CAL %OPT+2%	8307	8526	198	7674	7876	183	7911	8120	189	8148	8363	195	7713	7917	184	190
M1-75+CAL%OPT%OPT-2%	9575	9959	348	8845	9200	322	9119	9485	332	9393	9770	342	8891	9248	323	333
M1-75+CAL%OPT	9405	9737	301	8689	8995	278	8957	9274	287	9226	9552	295	8733	9042	279	288
M1-75+CAL%OPT%OPT+2%	8722	9037	285	8057	8349	264	8307	8607	272	8556	8865	280	8099	8392	265	273
M1+CE%OPT-2%	9343	9612	244	8631	8880	225	8898	9154	232	9165	9429	239	8676	8925	226	233
M1+CE%OPT	8650	8832	165	7991	8159	152	8238	8411	157	8486	8664	161	8032	8201	153	158
M1+CE%OPT+2%	9395	9569	158	8679	8840	146	8947	9113	150	9216	9386	155	8724	8885	146	151
M1-75+CE%OPT-2%	9717	10093	341	8976	9324	315	9254	9612	324	9532	9900	334	9023	9372	316	326
M1-75+CE%OPT	8996	9274	251	8311	8567	232	8568	8832	239	8825	9097	246	8354	8611	233	240
M1-75+CE%OPT+2%	9770	10037	242	9026	9273	224	9305	9559	231	9584	9846	237	9072	9320	225	232
M3	8224	8542	288	7598	7891	266	7833	8135	274	8068	8379	282	7637	7932	267	275
M3+CAL%OPT-2%	8290	8585	267	7658	7931	247	7895	8176	254	8132	8421	262	7698	7972	248	256
M3+CAL%OPT	8143	8313	154	7523	7680	142	7755	7917	147	7988	8155	151	7561	7719	143	148
M3+CAL%OPT+2%	7551	7715	149	6976	7128	137	7192	7348	141	7408	7568	146	7012	7164	138	142
M3-75+CAL%OPT-2%	8705	9014	280	8041	8327	259	8290	8585	267	8539	8842	275	8083	8370	260	268
M3-75+CAL%OPT	8550	8812	237	7899	8141	219	8143	8392	226	8387	8644	233	7939	8183	220	227
M3-75+CAL%OPT+2%	7929	8178	226	7325	7555	209	7551	7789	215	7778	8023	222	7363	7594	210	216
M3+CE%OPT-2%	8455	8699	221	7811	8036	204	8053	8284	210	8294	8533	216	7851	8077	205	211
M3+CE%OPT	7828	7993	149	7232	7384	138	7456	7612	142	7679	7841	146	7269	7422	138	143
M3+CE%OPT+2%	8502	8659	143	7854	8000	132	8097	8247	136	8340	8494	140	7895	8041	133	137
M3-75+CE%OPT-2%	8793	9047	229	8123	8357	212	8375	8616	218	8626	8874	225	8165	8425	235	242
M3-75+CE%OPT	8142	8392	227	7521	7753	210	7754	7993	217	7986	8233	223	7560	7793	211	218
M3-75+CE%OPT+2%	8842	9084	219	8168	8392	202	8421	8651	209	8674	8911	215	8210	8435	203	210
Adobes M1	7458	7920	419	6890	7317	387	7103	7543	399	7316	7769	411	6925	7354	389	401
Adobes M3	7508	7899	355	6936	7297	328	7150	7523	338	7365	7749	348	6971	7335	330	340
Adobes S/C1	7958	8452	448	7352	7808	414	7579	8050	426	7806	8291	439	7390	7848	416	429
Adobes S/C2	8038	8537	452	7425	7886	418	7655	8130	431	7884	8374	444	7463	7927	420	433

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°21: Vista grafica de los coeficientes de Absorción de Agua por Capilaridad



Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3. Resistencia a compresión simple

Se ensayaron cinco Eco-ladrillos enteros, se procedió según lo especificado en la normativa APNB 1211002 (ver anexo X) se sección constante bruta de 465 cm2 (31cm x 15cm) donde se utilizó la siguiente expresión.

$$Rc = \frac{P}{A}$$

Donde:

Rc = Resistencia a compresión.

P = Carga de rotura.

A= Promedio de las áreas brutas superior e inferior de la probeta.

Figura N°25: Fotografía de un Eco-ladrillo siendo ensayado a compresión simple



Fuente: Elaboración Propia

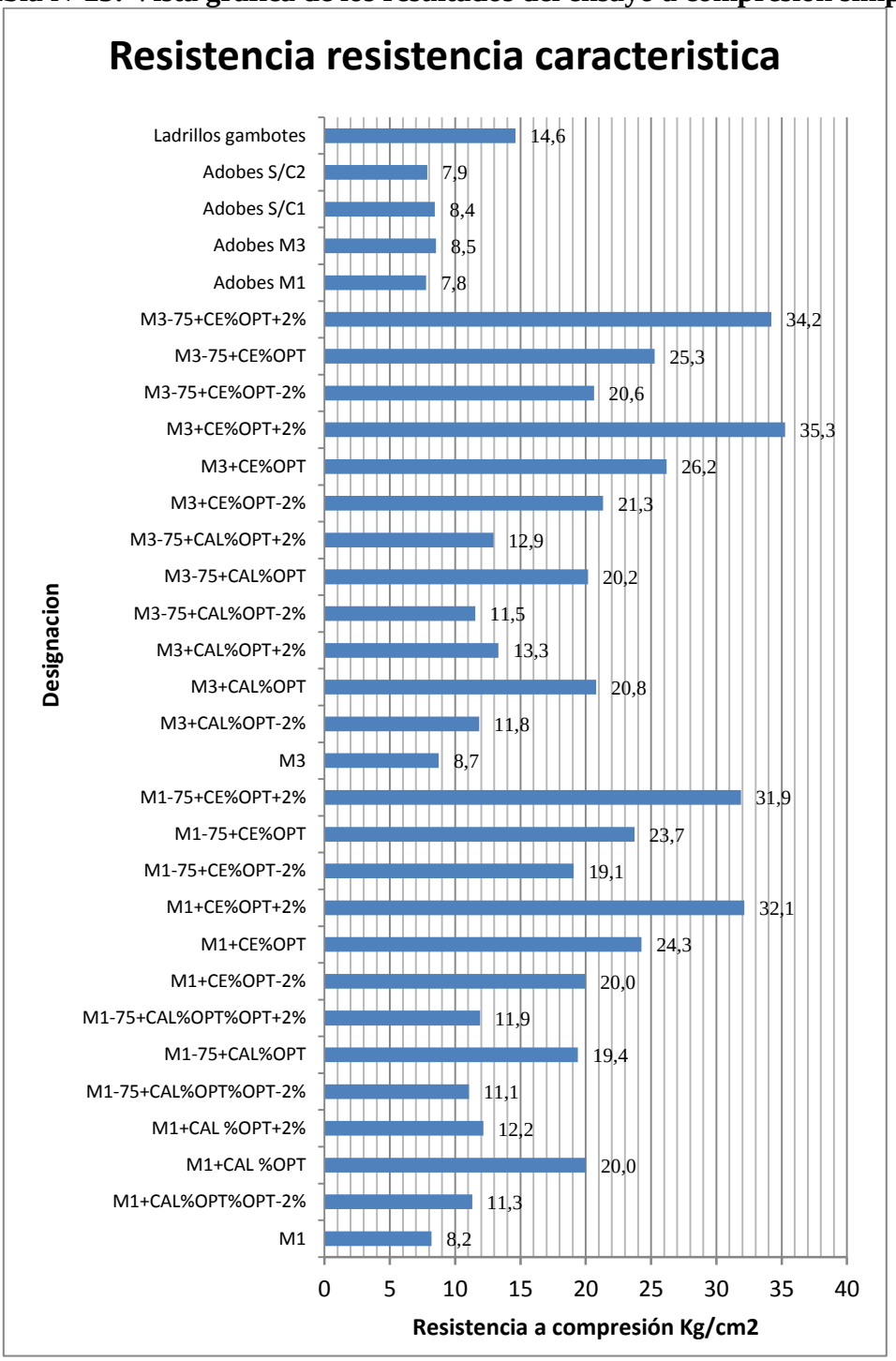
También se ensayaron cinco ladrillos gambotes, diez adobes C/S1, cinco adobes C/S2, cinco abobes conformados con suelos M1 y cinco adobes conformados con suelos M2 (todos los abobes tienen un tiempo de secado superior a 28 días), donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla N°22: Resultados del ensayo a compresión simple

Designación	Área media	Fuerza de rotura					Resistencia					Resistencia media	Desviación Estándar	error	error	Resistencia media
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
	cm^2	KN	KN	KN	KN	KN	KN/cm^2	KN/cm^2	KN/cm^2	KN/cm^2	KN/cm^2	KN/cm^2	--	Kg/cm2	%	Kg/cm^2
M1	465,00	37,10	36,30	34,10	39,60	39,90	0,08	0,08	0,07	0,09	0,09	0,080	0,005	0,26	3,23%	8,20
M1+CAL%OPT%OPT-2%	465,00	50,80	50,20	47,20	54,40	55,20	0,11	0,11	0,10	0,12	0,12	0,111	0,007	0,36	3,17%	11,30
M1+CAL %OPT	465,00	88,80	89,70	84,30	95,00	98,60	0,19	0,19	0,18	0,20	0,21	0,196	0,012	0,61	3,06%	20,01
M1+CAL %OPT+2%	465,00	56,60	52,70	49,50	60,60	57,90	0,12	0,11	0,11	0,13	0,12	0,119	0,009	0,48	3,95%	12,16
M1-75+CAL%OPT%OPT-2%	465,00	46,50	51,30	48,20	49,70	56,40	0,10	0,11	0,10	0,11	0,12	0,108	0,008	0,42	3,75%	11,05
M1-75+CAL%OPT	465,00	80,80	90,50	85,10	86,50	99,60	0,17	0,19	0,18	0,19	0,21	0,333190	0,015	0,78	4,02%	19,40
M1-75+CAL%OPT%OPT+2%	465,00	52,00	54,00	50,70	55,60	59,40	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13	0,117	0,007	0,37	3,12%	11,91
M1+CE%OPT-2%	465,00	94,30	85,60	80,40	101,00	94,10	0,20	0,18	0,17	0,22	0,20	0,196	0,017	0,89	4,44%	19,97
M1+CE%OPT	465,00	114,90	103,80	97,60	123,00	114,20	0,25	0,22	0,21	0,26	0,25	0,238	0,022	1,10	4,52%	24,27
M1+CE%OPT+2%	465,00	131,10	151,90	142,80	140,30	167,10	0,28	0,33	0,31	0,30	0,36	0,315	0,029	1,49	4,65%	32,15
M1-75+CE%OPT-2%	465,00	84,80	85,40	80,30	90,80	93,90	0,18	0,18	0,17	0,20	0,20	0,187	0,011	0,59	3,07%	19,08
M1-75+CE%OPT	465,00	105,80	105,90	99,60	113,30	116,50	0,23	0,23	0,21	0,24	0,25	0,233	0,014	0,74	3,10%	23,72
M1-75+CE%OPT+2%	465,00	122,00	156,10	146,80	130,50	171,70	0,26	0,34	0,32	0,28	0,37	0,313	0,043	2,18	6,83%	31,88
M3	465,00	39,50	38,70	36,40	42,30	42,60	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,086	0,006	0,28	3,25%	8,75
M3+CAL%OPT-2%	465,00	53,30	52,60	49,40	57,00	57,90	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,116	0,007	0,38	3,20%	11,85
M3+CAL%OPT	465,00	92,30	93,20	87,60	98,80	102,50	0,20	0,20	0,19	0,21	0,22	0,204	0,013	0,64	3,07%	20,80
M3+CAL%OPT+2%	465,00	62,00	57,70	54,20	66,30	63,50	0,13	0,12	0,12	0,14	0,14	0,131	0,010	0,53	3,95%	13,32
M3-75+CAL%OPT-2%	465,00	48,50	53,50	50,30	51,90	58,90	0,10	0,12	0,11	0,11	0,13	0,113	0,009	0,44	3,77%	11,54
M3-75+CAL%OPT	465,00	84,00	94,10	88,50	89,90	103,50	0,18	0,20	0,19	0,19	0,22	0,198	0,016	0,81	4,01%	20,17
M3-75+CAL%OPT+2%	465,00	56,40	58,60	55,10	60,40	64,50	0,12	0,13	0,12	0,13	0,14	0,127	0,008	0,40	3,12%	12,93
M3+CE%OPT-2%	465,00	100,80	91,40	85,90	107,90	100,50	0,22	0,20	0,18	0,23	0,22	0,209	0,019	0,95	4,45%	21,33
M3+CE%OPT	465,00	124,00	112,00	105,30	132,70	123,20	0,27	0,24	0,23	0,29	0,26	0,257	0,023	1,18	4,52%	26,18
M3+CE%OPT+2%	465,00	143,80	166,60	156,60	153,90	183,30	0,31	0,36	0,34	0,33	0,39	0,346	0,032	1,64	4,65%	35,26
M3-75+CE%OPT-2%	465,00	91,70	92,30	86,80	98,10	101,60	0,20	0,20	0,19	0,21	0,22	0,202	0,012	0,64	3,08%	20,63
M3-75+CE%OPT	465,00	112,80	112,60	106,10	120,70	124,20	0,24	0,24	0,23	0,26	0,27	0,248	0,015	0,79	3,12%	25,27
M3-75+CE%OPT+2%	465,00	130,90	167,50	157,50	140,00	184,30	0,28	0,36	0,34	0,30	0,40	0,336	0,046	2,34	6,84%	34,21
Adobes M1	256,30	19,50	18,90	17,80	20,90	20,80	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,076	0,005	0,26	3,35%	7,79
Adobes M3	256,30	20,70	21,30	20,00	21,90	23,40	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,084	0,005	0,26	3,01%	8,54
Adobes S/C1	256,30	19,00	22,00	20,70	20,30	24,20	0,07	0,09	0,08	0,08	0,09	0,083	0,008	0,39	4,64%	8,45
Adobes S/C2	256,30	20,00	18,90	17,80	21,40	20,80	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,077	0,006	0,29	3,66%	7,87
Ladrillos gambotes	256,30	37,80	34,70	32,60	40,40	38,20	0,15	0,14	0,13	0,16	0,15	0,143	0,012	0,61	4,19%	14,61
													error promedio		3,90%	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°23: Vista grafica de los resultados del ensayo a compresión simple



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N°26: Diversas fotografías de los Eco-ladrillos siendo ensayados a compresión simple



Fuente: Elaboración Propia

En la figura N°25 se puede apreciar:

1) Serie de Eco-ladrillos a ser ensayados a compresión simple.
2) Eco-ladrillo ensayado de la designación M3+CE%OPT-2%.
3) Eco-ladrillo ensayado de la designación M3+CE%OPT
4) Resultado de la designación M3+CE%OPT-2%.
5) Resultado de la designación M3+CE%OPT.

Para determinar el error aleatorio en la rotura se utilizó la siguiente expresión:

$$Sn = \frac{\sigma}{\sqrt{N-1}}$$

Dónde:

Sn= error de medición en ± unidades

σ= desviación estándar

N= número de lecturas

“ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS”

4.1. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ECO-LADRILLO

4.1.1. Selección de los suelos.

En el acápite 3.1.3., se descartó ciertos tipos de materiales por ser inadecuados, en tal motivo podemos decir que los materiales más adecuados para la conformación de Eco-ladrillos son los suelos “CL” de acuerdo con la clasificación de la SUCS, con un contenido de arcillas entre el 30% al 60%.

Según los resultados obtenidos:

Tabla N°24: Suelos catalogados como adecuados para la conformación de Eco-ladrillos

Designación	% de suelo empleado		Granulometría %			Limite Liquido %	Limite Plástico %	Índice de Plasticidad %	Clasificación SUCS
	M1	A1	Arena	Limo	Arcilla				
M1	100	0	25,85	36,11	38,04	24,88	12,57	12,30	CL
M1-75	75	25	44,39	27,08	28,53	21,75	9,65	12,10	CL
M3	100	0	5,95	34,70	59,35	36,29	21,56	14,73	CL
M3-75	75	25	29,46	26,03	44,51	30,10	15,43	14,67	CL

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la tabla anterior y de una manera aproximada, podemos catalogar a los suelos adecuados, por su granulometría y sus límites de consistencia según se explica en la siguiente tabla y gráfico.

Tabla N°25: Composición de granos de los suelos adecuados para la conformación de Eco-ladrillos

Material	Limites
Granular (Arenas + Limos)	**40% al 70%**
Arcilloso	**30% al 60%**

Fuente: Elaboración Propia

Se decidió que los suelos estén separados de esta forma y no de la habitual (granulares y finos) debido a que las arcillas son las que proporcionan la cohesión entre las partículas de suelos.

Figura N°27: Abaco de Casa Grande, mostrando los Límites de Consistencia Adecuados para la conformación de Eco-ladrillos.

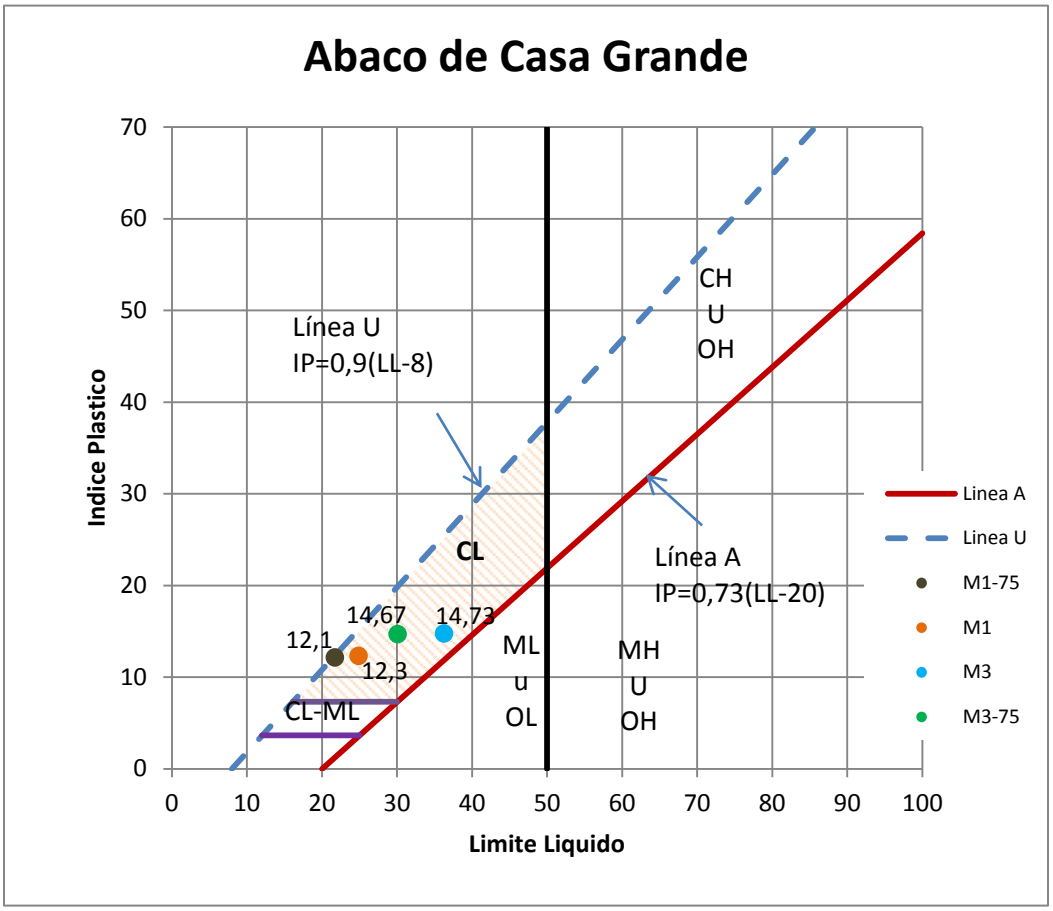


*Gráfico en Base al mostrado en el libro "Principios de Ingeniería en Cimentaciones 4° edición de Brajas M. Das" de la página 19.

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo al anterior gráfico se decidió escoger todos los suelos que caen en el sector sombreado de la gráfica, correspondientes a los suelos CL de acuerdo a la clasificación de la SUCS, debido a que los limites plásticos de este sector dentro de un rango de valores del 9.2% al 28.1%, y los obtenidos 9.7% al 21.6%.

4.1.2. Contenido de humedad óptimo

En función a los resultados obtenidos podemos decir que el contenido óptimo de humedad es un 2% a 3% superior al límite plástico, esto fue demostrado en el acápite

3.1.3., con el método empírico “Bola de presión Bola de impacto” podemos ver los datos obtenidos en la siguiente tabla.

Tabla N°26: Composición de granos de los suelos adecuados para la conformación de Eco-ladrillos

Designación	Limite plástico	Humedad óptima bola presión	Humedad óptima bola de presión	Promedio del método empírico	Diferencia entre el promedio del método empírico y el Limite Plástico
	%	%	%	%	%
M1	12,57	14,21	14,75	14,48	1,91
M1-75	9,65	11,95	12,12	12,035	2,385
M3	21,56	23,52	23,36	23,44	1,88
M3-75	15,43	18,01	18,27	18,14	2,71

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la tabla superior todas las designaciones mostradas corresponde a suelos CL de acuerdo a la clasificación de la SUCS, estos suelos incrementan la humedad óptima con respecto al límite plástico en cuanto mayor es su porcentaje de material granular y esto es consecuente con la idea de la compactación mecánica debido a que los suelos granulares no poseen limites plásticos, pero si humedades óptimas de compactación.

4.1.3. Estabilización de los suelos

De acuerdo a la tabla N°19 en el acápite 3.2.1., la figura N°23 en el acápite 3.2.2. y en ANEXO V, en las cuales se pudo apreciar mejoras de los suelos estabilizados con respecto a los no estabilizado, notándose diferencias entre los suelos estabilizados con cal y los estabilizados con cemento.

Demostrándose que la estabilización de suelos por el método propuesto por Eades & Grim, descrito en el ANEXO VI, es fiable para mejorar la estabilización de los suelos para la fabricación de Eco-ladrillos.

4.2. MEJORAS OBTENIDAS EN EL ECO-LADRILLO

4.2.1. Erosión hídrica.

Según la tabla N°19 en el acápite 3.2.1., se puede observar:

a) Que en cuando es menor el porcentaje de cal o cemento al contenido óptimo, la profundidad de las oquedades es menor que las de un Eco-ladrillo sin estabilizar.
b) Cuando el porcentaje de cal o cemento es óptimo la reducción en las profundidades de la oquedad es bastante notoria con respecto a un Eco-ladrillo sin estabilizar.
c) Y cuando es mayor el porcentaje de cal o cemento al óptimo la reducción del en la profundidad de las oquedades es sensiblemente similar a los Eco-ladrillos que contienen el porcentaje óptimo de cal o cemento.
d) También se pude observar que los suelos con mayor contenido de material granular poseen oquedades más profundas que al de los suelos que contienen mayor porcentaje de arcillas.
e) Y finalmente que los suelos estabilizados con cemento tienen unas oquedades de menor profundidad que los suelos estabilizados con cal.

4.2.2. Absorción de agua

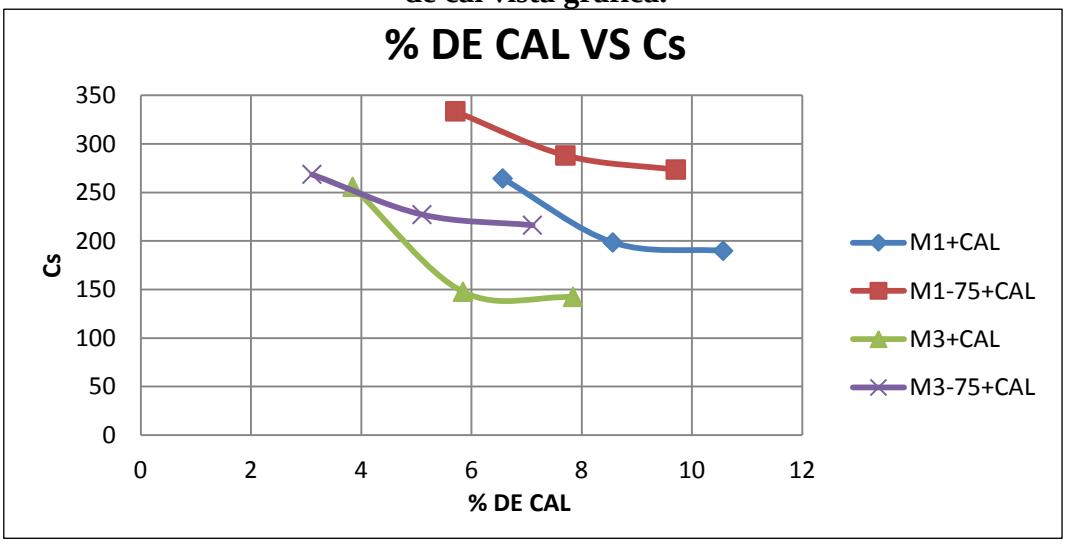
Presentan los siguientes coeficientes de absorción por capilaridad respecto a su porcentaje de estabilizante.

Tabla N°27: Coeficientes de absorción por capilaridad respecto a su porcentaje de cal.

Designación	Estabilizante	Coeficiente de Absorción por capilaridad	Mejora
	%	$g/m^2s^{0,5}$	%
M1	--	345,1	--
M1+CAL%OPT-2%	6,57	264,23	23,432
M1+CAL%OPT	8,57	198,42	42,503
M1+CAL%OPT+2%	10,57	189,82	44,996
M1-75+CAL%OPT-2%	5,71	333,22	3,442
M1-75+CAL%OPT	7,71	288,01	16,543
M1-75+CAL%OPT+2%	9,71	273,25	20,821
M3	--	275,23	--
M3+CAL%OPT-2%	3,85	255,61	7,1292
M3+CAL%OPT	5,85	147,61	46,369
M3+CAL%OPT+2%	7,85	142,15	48,354
M3-75+CAL%OPT-2%	3,11	268,39	2,4857
M3-75+CAL%OPT	5,11	227,09	17,492
M3-75+CAL%OPT+2%	7,11	216,17	21,46

Fuente: Elaboración Propia

Figura N°28: Coeficientes de absorción por capilaridad respecto a su porcentaje de cal vista gráfica.



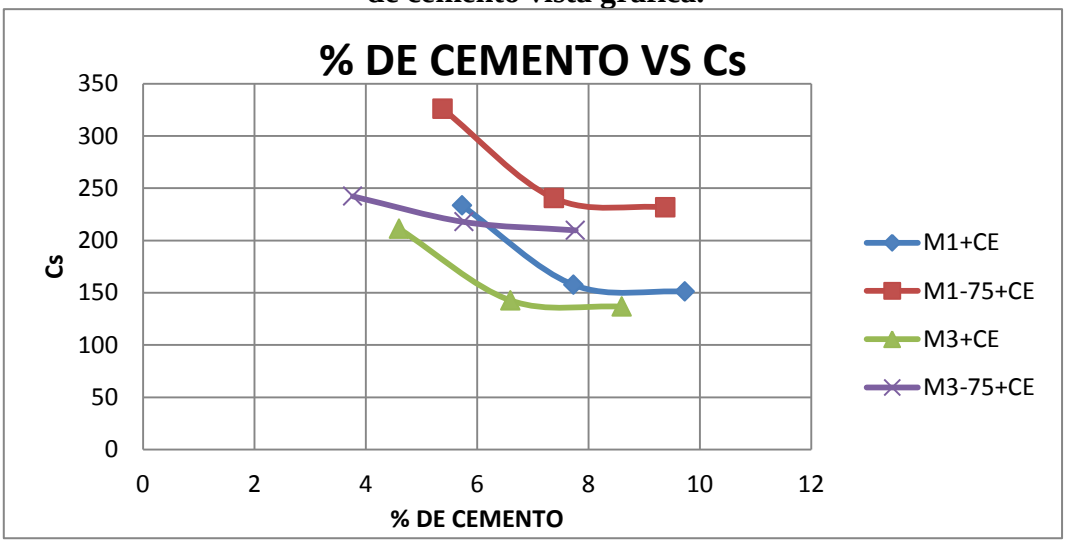
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N°28: Coeficientes de absorción por capilaridad respecto a su porcentaje de cemento.

Designación	Estabilizante	Coeficiente de Absorción por capilaridad	Mejora
	%	$g/m^2s^{0,5}$	%
M1		345,1	--
M1+CE%OPT-2%	5,73	233,24	32,412
M1+CE%OPT	7,73	157,58	54,339
M1+CE%OPT+2%	9,73	150,94	56,263
M1-75+CE%OPT-2%	5,38	325,94	5,5533
M1-75+CE%OPT	7,38	240,48	30,317
M1-75+CE%OPT+2%	9,38	231,66	32,872
M3		275,23	
M3+CE%OPT-2%	4,6	211,08	23,308
M3+CE%OPT	6,6	142,6	48,188
M3+CE%OPT+2%	**8,6**	**136,59**	**50,372**
M3-75+CE%OPT-2%	3,77	242,16	12,018
M3-75+CE%OPT	**5,77**	**217,63**	**20,93**
M3-75+CE%OPT+2%	7,77	209,65	23,83

Fuente: Elaboración Propia

Figura N°29: Coeficientes de absorción por capilaridad respecto a su porcentaje de cemento vista gráfica.



Fuente: Elaboración Propia.

Según se observa en las tablas y figuras anteriores, se puede apreciar:

a) Que en cuanto es menor el porcentaje de cal o cemento al contenido óptimo, la reducción del coeficiente de absorción de agua por capilaridad "Cs" es poco apreciable.
b) Cuando el porcentaje de cal o cemento es óptimo la reducción del Cs es apreciable.
c) Y cuando es mayor el porcentaje de cal o cemento al óptimo la reducción del Cs es similar al obtenido con el contenido óptimo de cal o cemento.
d) También se pude observar que los suelos con mayor contenido de material granular poseen un Cs mayor al de los suelos que contienen mayor porcentaje de arcillas.
e) Y finalmente que los suelos estabilizados con cemento tienen un Cs menor a los suelos estabilizados con cal.

4.2.3. Resistencia a compresión simple.

Según la tabla N°23 en el acápite 3.2.3., se pudo observar lo siguiente.

Los Eco-ladrillos estabilizados con cal aumentaron su resistencia respecto a los Eco-ladrillos sin estabilizar, con la particularidad que el contenido óptimo de cal presenta mayor resistencia que los contenidos de 2% menos y 2% más del contenido óptimo, en otra palabras que la resistencia de los suelos estabilizados con cal tienen una curva de resistencia de forma parabólica donde el mayor valor de resistencia corresponde a los suelos estabilizados con contenidos óptimos de cal.

Los Eco-ladrillos estabilizados con cemento aumentaron su resistencia respecto a los Eco-ladrillos sin estabilizar, con la particularidad de que el aumento de la resistencia ocurre en forma linear.

Los Eco-ladrillos estabilizados con cemento presentaron mayor resistencia a compresión simple, que los Eco-ladrillos que fueron estabilizados con cal, a pesar que ambos mejoraron su resistencia en comparación a los Eco-ladrillos sin estabilizar.

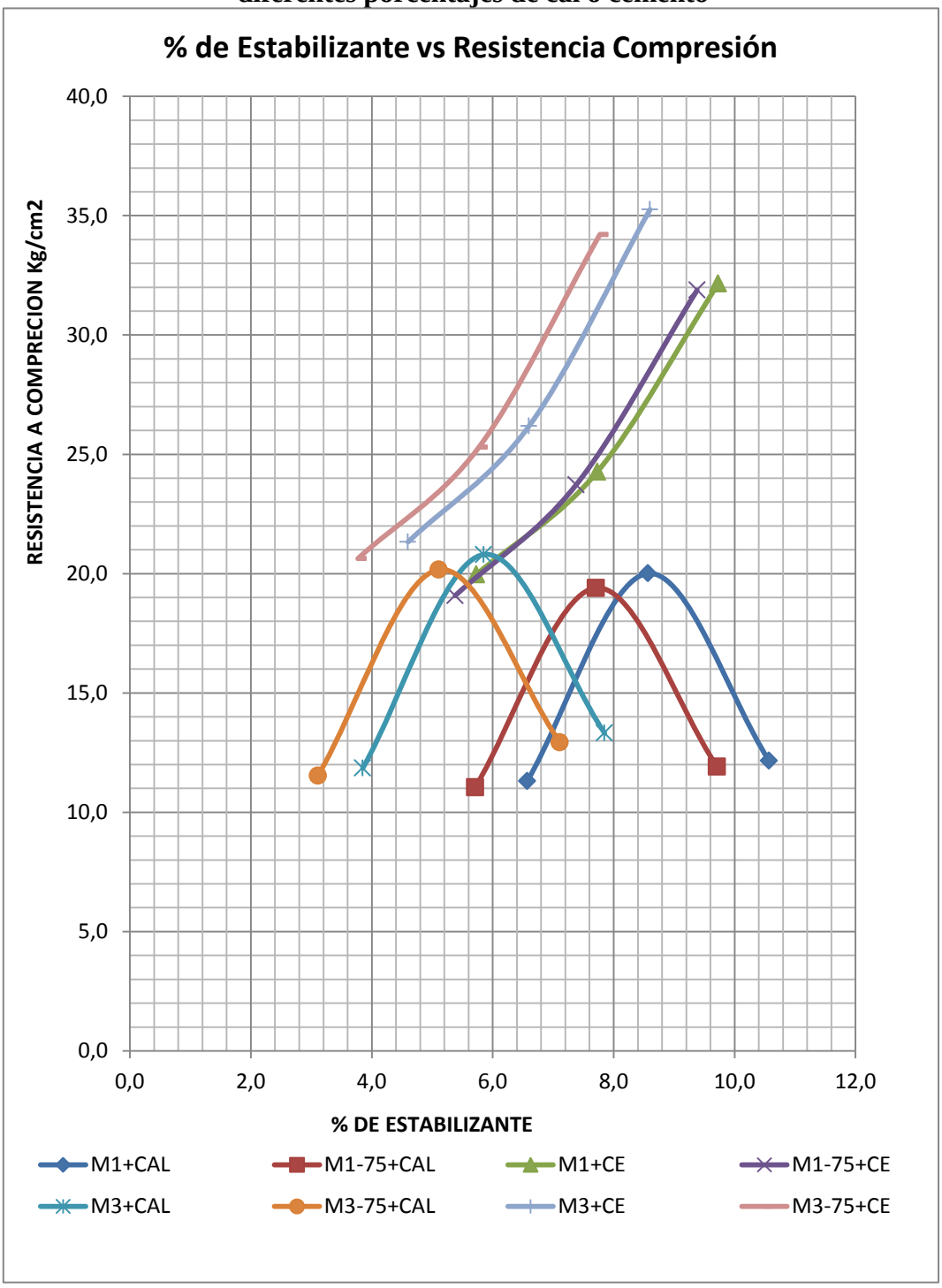
Estas mejoras en la resistencia a compresión simple se las podrá observar a mayor cabalidad en la siguiente tabla y gráfico.

Tabla N°29: Resistencia a compresión simple en los Eco-ladrillos

Designación	Porcentaje de estabilizante	Resistencia Bruta Media	Mejora de la resistencia a compresión
	%	Kg/cm2	%
M1	0,0	8,2	0,0
M1+CAL%OPT-2%	6,6	11,3	37,8
M1+CAL%OPT	8,6	20,0	144,0
M1+CAL%OPT+2%	10,6	12,2	48,3
M1-75+CAL%OPT-2%	5,7	11,1	34,8
M1-75+CAL%OPT	7,7	19,4	136,6
M1-75+CAL%OPT+2%	9,7	11,9	45,3
M1+CE%OPT-2%	5,7	20,0	143,5
M1+CE%OPT	7,7	24,3	195,9
M1+CE%OPT+2%	9,7	32,2	292,1
M1-75+CE%OPT-2%	5,4	19,1	132,7
M1-75+CE%OPT	7,4	23,7	189,3
M1-75+CE%OPT+2%	9,4	31,9	288,7
M3	0,0	8,7	0,0
M3+CAL%OPT-2%	3,9	11,8	35,5
M3+CAL%OPT	5,9	20,8	137,9
M3+CAL%OPT+2%	7,9	13,3	52,3
M3-75+CAL%OPT-2%	3,1	11,5	31,9
M3-75+CAL%OPT	5,1	20,2	130,7
M3-75+CAL%OPT+2%	7,1	12,9	47,9
M3+CE%OPT-2%	4,6	21,3	144,0
M3+CE%OPT	6,6	26,2	199,5
M3+CE%OPT+2%	8,6	35,3	303,2
M3-75+CE%OPT-2%	3,8	20,6	136,0
M3-75+CE%OPT	5,8	25,3	189,3
M3-75+CE%OPT+2%	7,8	34,2	291,2

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N°30: Grafica de resistencia a compresión simple en Eco-ladrillos con diferentes porcentajes de cal o cemento



Fuente: Elaboración Propia.

4.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.3.1. Conclusiones

- En el acápite 4.1 de este trabajo, se puede observar todos los pasos y secuencias para la fabricación de los Eco-ladrillos, desde la selección del suelo, la obtención de la humedad óptima de compresión y el porcentaje de cal o cemento a incluir en los Eco-ladrillos, se puede observar todo el proceso de mezclado y confección de los Eco-ladrillos en el acápite 3.1.6., con lo que se logró adecuar una metodología para la fabricación de Eco-ladrillos.
- Como se puede observar en el acápite 4.2.1., se logró disminuir el desgaste ocasionado por la erosión hídrica, de valor mínimo obtenido en la profundidad de las oquedades de los adobes convencionales de 16 mm a un valor mínimo de 2 mm en los Eco-ladrillos reduciéndose estos en un 800%.
- Con la compresión y estabilización de los Eco-ladrillos se pudo reducir los valores de los coeficientes de absorción de agua por capilaridad "Cs" hasta en un 300%, de los Eco-ladrillos estabilizados (valor mínimo de Cs=142 $g/m^2 s^{0.5}$) en contrastación con los adobes de construcción (valor máximo de Cs= 433 $g/m^2 s^{0.5}$).
- Como se puede observar en la tabla N°22 del acápite 3.2.3., no solamente se logró que los Eco-ladrillos posean mayor resistencia a compresión simple que los adobes de construcción, también se logró que algunos posean resistencias superiores a los ladrillos Gambotes, es decir que los Eco-ladrillos estabilizados poseen resistencias desde los 11.1 a los 35.3 Kg/cm^2, los adobes ensayados poseen resistencias de los 7.8 a los 8.5 Kg/cm^2, los ladrillos gambotes poseen una resistencia de 14.6 Kg/cm^2, si bien las resistencia de estos no llegan a una resistencia de 40.0 Kg/cm^2 para ser catalogados como ladrillos tipo C según la designación de la NB 1211003 (ver anexo XI), pero son valores superiores a los ladrillos tipo D, y todavía la resistencia puede aumentar con una mayor inclusión de estabilizante en el caso del cemento y no así en el caso de la cal para llegar a la catalogación C, que es la de principal uso de estos ladrillos.

- Con la realización de este trabajo de investigación, se pudo conformar un "Bloque de suelo estabilizado y compactado", es decir un Eco-ladrillo, como se puede observar en los, capítulos 3 y 4 de este trabajo, gracias a la estabilización del suelo con pequeños porcentajes de cal o cemento y la compresión del mismo en la máquina CETA-RAM II, se logró fabricar los Eco-ladrillos que no necesitan el proceso de cocción a diferencia de los ladrillos cerámicos convencionales, así mismo se logró que los Eco-ladrillos tengan mayor resistencia a compresión simple a comparación de los ladrillos gambotes, menor absorción de agua por capilaridad y reduciendo el desgate ante la erosión hídrica, comprobándose la hipótesis planteada en el acápite 1.6.y los objetivos planteados en 1.4. obteniéndose Eco-ladrillos con un precio de fabricación de 0.55 Bs como se muestra en el ANEXO V.
- Según todo el proceso de investigación se obtuvo siempre los mejores resultados con la estabilización con cemento, la siguiente designación tuvo los mejores resultados M3+CE%OPT+2%, con las siguientes características.

  Granulometría:

Material	Tamaño (mm)	Porcentajes (%)
Arena	4.750 - 0.075	5.95
Limo	0.075 - 0.002	34.70
arcilla	< 0.002	59.35

  Límites de consistencia:

Limite liquido	36.29
Limite plástico	21.56
Índice de plasticidad	14.73

  El suelo es catalogado como CL según la SUCS, y se estabilizó con un 8.6% de cemento siendo este un porcentaje dos por ciento superior al obtenido en el ensayo de Eades and Grim.

Designación en la cual se obtuvo los siguientes resultados:

Erosión hídrica	2.00 mm
Adsorción por capilaridad	137 $g/m^2s^{0.5}$
Resistencia a la compresión	35.26 Kg/cm^2

- La estabilización con cemento es mejor, ya que esta no decrece la resistencia al aumentar la cantidad de estabilizante, las características de los suelos estabilizados con cemento son superiores a los suelos estabilizados con cal.

4.3.2. Recomendaciones

- A la hora de elaborar la CETA-RAM II, hay que tener muy en cuenta las dimensiones y las holguras dejadas en la máquina, sobre todo en la parte de la caja, ya que esta tiene que ser totalmente recta o tener una holgura en la cara superior no mayor a los 2 mm.
- Al momento de realizar las mezclas de suelo-cal o suelo-cemento, es recomendable comprobar que el contenido de humedad sea el óptimo en el primer mezclado y considerar las cantidades que se mezcló para las posteriores mezclas que se vayan a realizar en las próximas horas.
- Cuando se realice el ensayo de erosión acelerada (SAET), hay que adicionar una llave al equipo en la parte de la salida del agua, ya que sin esta el chorro de agua sigue constante y demora al momento de realizar diferentes ensayos.
- Para la realización del ensayo de absorción de agua por capilaridad es necesario secar dos veces la muestra ya que algunos bloques pierden material al momento del ensayo, la primera vez es para realizar el ensayo y la segunda para tener el peso real del bloque ensayado.
- Para realizar el ensayo de compresión simple siempre es mejor realizarlo sobre el eco-ladrillo entero ya que de cierta forma es imposible conseguir probetas de diferente tamaño y además se puede conocer el comportamiento real del eco-ladrillo entero.