



Zeolita natural proveniente de Puebla como tratamiento de suelos de la región de Querétaro en vías terrestres: Efectos en su comportamiento plástico

Natural zeolite from Puebla as a soil treatment of Querétaro region in roadways: Effects on its plastic behavior

Hernández-Francisco Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

División de Investigación y Posgrado

Correo: ahernandezf201@alumnos.uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3637-2810>

López-Lara Teresa

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

División de Investigación y Posgrado

Correo: lolte@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7289-7919>

Hernández-Zaragoza Juan Bosco

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

División de Investigación y Posgrado

Correo: bosco@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5953-6446>

Horta-Rangel Jaime Moisés

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

División de Investigación y Posgrado

Correo: horta@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4314-3848>

Resumen

Las puzolanas naturales tienen fama de emplearse como materiales puzolánicos de origen natural desde hace mucho tiempo, y es uno de los compuestos principales en la fabricación de concretos de alta resistencia. Como material de construcción, su uso ha sido explorado en la estabilización de suelos, haciendo necesaria la adición de cal a la mezcla para llevar a cabo la activación puzolánica y que la formación de cristales cementantes se lleve a cabo. Sin embargo, factores como pH del suelo, intercambio catiónico, humedad natural y mineralogía del suelo afectan en gran medida la cantidad de cal libre con la que puede combinarse la zeolita y realizar su actividad. Como consecuencia, para la estabilización de algunos suelos es necesario utilizar productos químicos más complejos cuya obtención implica diversos problemas ambientales y económicos. Por ello, el siguiente trabajo tiene como propósito la evaluación de diferentes cantidades de zeolita en la estabilización de un suelo expansivo utilizando cal como activador puzolánico, evaluando las propiedades índices del suelo estabilizado y la relación de los porcentajes implicados. Los resultados de las pruebas realizadas en la muestra de suelo arcilloso expansivo (CH) indican que la dosificación óptima de cal-zeolita es de 10-6 % respectivamente, obteniendo valores de: Límite Líquido (LL)=55.25, Límite Plástico (LP) =46.1, Límite de contracción (LC)=31.86; con un promedio de disminución del Índice Plástico (IP) de 33 % respecto a los límites del suelo natural. En virtud de los resultados, se concluye que el uso de cal y zeolita natural resulta favorable para la estabilización de arcillas en la región de Querétaro.

Descriptores: Zeolita natural, clinoptilolita de Puebla, límites de Atterberg, mejoramiento de suelos Querétaro, cal.

Abstract

Natural pozzolans are well-known for being used as natural pozzolanic material for a long time, being one of the main components in the manufacture of high-resistance concrete. As a construction material, its use has been investigated by many researchers in soil stabilization, requiring the addition of lime and water to start the pozzolanic activity and subsequently, the cementitious crystal formation. However, factors such as soil pH, cation exchange, particle size, natural moisture and soil mineralogy are points that affect the amount of free lime that can be combined with zeolite can be combined and perform its activity. As a consequence, the stabilization of some soils requires the use of more complex chemical products, whose obtention involves several environmental and economic problems. Therefore, this paper aims to evaluate the different amounts of zeolite in the stabilization of an expansive soil (CH) using lime as a pozzolanic activator, evaluating the index properties of the stabilized soil and the relationship of the percentages of the involved materials. The results indicate that the optimal dosage of lime-zeolite is 10-6 % respectively, obtaining a Liquid Limit (LL) = 55.25 %, Plastic Limit (PL) = 46.1 % and Shrinkage Limit (SL) = 31.86 %, with an average decrease of Plastic Index (PI) of 33 % compared with the values of the natural soil. Based on the results obtained, it can be concluded that the use of lime and natural zeolite is favorable in the stabilization of clays from the Queretaro region.

Keywords: Natural zeolite, clinoptilolite from Puebla, Atterberg limits, soil stabilization, Queretaro region, lime.

INTRODUCCIÓN

Las puzolanas son una amplia clase de materiales silíceos y silico-alumínicos que, en presencia de agua, reaccionan con hidróxido de calcio para formar compuestos con propiedades cementantes (Mehta, 1987); entre ellos, se conocen las zeolitas. Por definición, las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos hidratados de cationes alcalinos y alcalinotérreos, que tienen estructuras tridimensionales infinitas (Mumpton *et al.*, 1981). Se han identificado al menos 40 tipos de zeolitas de origen natural, y cerca de 100 especies pueden ser sintetizadas en laboratorio; estas poseen diferentes propiedades que las hacen muy útiles para diversas actividades industriales, teniendo como ventaja las primeras por su abundancia en la naturaleza.

Entre sus principales usos, en la agricultura se han utilizado zeolitas modificadas como filtro o tamiz molecular, siendo capaces de eliminar nutrientes de aguas residuales, como nitratos y fósforo (Manjaiah *et al.*, 2019). De igual forma, se utilizan zeolitas como fertilizante de liberación lenta en regiones áridas, temporada de estiaje o en zonas donde resulta muy costoso el transporte de agua, esto gracias a la capacidad de las zeolitas de almacenar agua hasta en un 30 % de su volumen, liberándola cuando existe una menor concentración de moléculas de agua en el suelo que en el interior de ellas. En la construcción, se ha optado por agregar puzolanas naturales en la fabricación de cemento, debido a que la reacción puzolánica que se lleva a cabo no interviene con la hidratación del clinker en el cemento, por el contrario, complementa el proceso de hidratación incrementando la cantidad de hidratos de silicato de calcio que se formarán y liberando de forma gradual el agua en la mezcla, reduciendo el contenido de portlandita a utilizar (Massazza, 2000) y optimizando uso de recursos hídricos. Sin embargo, múltiples estudios muestran que los concretos tradicionales presentan mayores resistencias a edades tempranas en comparación con los concretos puzolánicos, como consecuencia de la lenta reacción de los minerales puzolánicos y el cemento (Massazza, 2000).

En la estabilización de suelos, se han utilizado materiales puzolánicos para estabilizar suelos arcillosos y de rellenos, ya que las puzolanas en presencia de agua, reaccionan químicamente con hidróxido de calcio formando compuestos con propiedades cementantes (Elsen *et al.*, 2013; Snellings *et al.*, 2012). Diferentes estudios muestran la efectividad de cenizas volantes y zeolitas naturales en la estabilización de suelos arcillosos, disminuyendo la plasticidad y mejorando la resistencia al esfuerzo cortante (Ikeagwuani & Nwonu, 2018). Sin embargo, no todos los materiales puzolánicos son efi-

cientes en la estabilización de suelos, por ejemplo, se ha mostrado mayor efectividad en la reacción puzolánica producida por zeolitas naturales sobre las producidas por residuos industriales como cenizas de caña, arroz o escorias metálicas (Frias & Sánchez, 2013), esto en primera instancia se debe a los procesos por los que ha sido sometido el material, ya que las cenizas de caña han pasado por procesos térmicos.

Por lo anterior, este trabajo tiene como propósito analizar la reacción puzolánica de una zeolita natural identificada como clinoptilolita proveniente de la región de Puebla, México, en la estabilización de un suelo arcilloso tipo montmorilonita con características expansivas de la región de Santiago de Querétaro, Querétaro, utilizando hidróxido de calcio como activador puzolánico y evaluando los límites de consistencia del suelo, así como las propiedades índice y de compresibilidad.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

ACTIVIDAD PUZOLÁNICA

La reacción que se lleva a cabo entre los materiales puzolánicos y cal en presencia de agua llevan el nombre de actividad puzolánica, la cual en términos simples, corresponde a aquellos procesos de formación de hidratos de silicato de calcio por la unión de las fases activas del material puzolánico y la cal libre (Elsen *et al.*, 2013; McCarthy & Dyer, 2019). Este proceso depende de dos parámetros principales, los cuales son la máxima cantidad de cal con la que la puzolana se puede combinar y la velocidad con la que el material puede combinarse. Estos dos parámetros, a su vez, se encuentran condicionados a diferentes factores, por ejemplo, la cantidad máxima de cal con la que la puzolana es capaz de combinarse se define principalmente por las características químicas de los materiales, como: La naturaleza de sus fases activas, el contenido de material puzolánico, su contenido de Óxido de Silíceo (SiO_2) y los porcentajes de cal/puzolana. Por su parte, la velocidad con la que el material puzolánico puede combinarse, dependerá de características físicas, como la superficie específica del material puzolánico, la relación agua/mezcla y la temperatura que se mantiene durante la reacción.

La resistencia final que el suelo estabilizado puede alcanzar dependerá de la eficiencia de la reacción puzolánica, y esta última depende de la naturaleza del material puzolánico. Otros puntos a considerar para obtener una mezcla resistente son la cantidad óptima de cal en la mezcla, el contenido de óxido de silíceo de la cal, la relación cal-puzolana, la superficie específica del material puzolánico y la cantidad de agua en la mezcla.

LA CAL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Es bien conocido que los suelos arcillosos pueden estabilizarse exitosamente mediante la adición de cal o cemento para casos específicos. La adición de estos aglutinantes aporta un incremento en la resistencia del suelo y en caso de materiales arcillosos, la reducción de la plasticidad y el potencial de expansión del producto final. La Tabla 1 muestra los parámetros físicos básicos que sirven como guía para la estabilización de suelos con cal. Sin embargo, la adición de una gran cantidad de cal puede resultar contraproducente, debido a la formación de etringita, la cual provocaría la desintegración de la mezcla, por lo que es necesario realizar un análisis químico para cada caso específico (McCarthy & Dyer, 2019).

Por su parte, las arcillas expansivas son comúnmente estabilizadas con cal. Little (2000) menciona que la cal necesaria depende del mineral predominante del suelo a estabilizar, aunado a la alcalinidad del suelo. La norma ASTM D 6276 (ASTM D., 2006) nos dice que la cantidad de cal necesaria será aquella que logre un pH de 12.4 para un suelo arcilloso, debido a que el intercambio catiónico se desarrolla de manera óptima en un entorno básico de pH. En los suelos expansivos, el mineral predominante es la montmorilonita. Este posee láminas aluminicas y silico-aluminicas sobrepuestas indefinidamente. Su arreglo atómico permite que se acumulen con mayor facilidad las moléculas de agua y estas crean cambios volumétricos drásticos. La cal impide que los cationes libres atrapen con esa facilidad las moléculas de agua, lo que disminuye la plasticidad del material y la capacidad adsorbente natural de la arcilla. Los principales componentes de la cal para estabilizaciones están normados por la ASTM C 977 (ASTM C., 2016), y se resumen en la Tabla 2, de la cual se debe destacar el contenido de óxido de sílice.

ADICIÓN DE ZEOLITA PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Las zeolitas son minerales de aluminosilicatos hidratados provenientes de metales alcalinos y alcalinotérreos. En forma natural, existen aproximadamente 40 tipos diferentes de zeolitas, donde las principales son la *chabazita*, *erionita*, *mordenita*, *filipsita* y la *cliptopilolita*, esto gracias a las aplicaciones que estas tienen. Las *chabazitas* y las *cliptopilolitas* son importantes debido a que son más reactivas que las puzolanas cristalinas; la estructura de estas últimas se combina con menos cal que las zeolitas debido principalmente a la superficie específica y fase activa (McCarthy & Dyer, 2019).

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de la cal

Característica / Componente	Valor
CaO	>83.3
MgO	0.5
Fe2O3	<2
Al2O3	<1.5
SiO2	<2.5
SO3	<0.5
Na2O	0.4 – 0.5
CO2	<5
CaCO3	<10
Gravedad específica	2
% de partículas sobre 90 um	<10
% partículas sobre 630 um	0
% de material insoluble	<1
Densidad aparente (g/l)	600 - 900

Fuente: Elaboración propia, a partir de Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils (Harichane et al., 2011) y ASTM C 977 (ASTM C., 2016)

Existe una mayor variedad de puzolanas, las cuales se sintetizan en laboratorios a partir de los minerales de las puzolanas naturales. Los científicos encargados de la creación de estas puzolanas tienen como objetivo la amplificación de una o varias propiedades específicas de acuerdo con el campo de aplicación de la puzolana, pues generalmente las zeolitas naturales poseen menor relación de sílice y aluminio en comparación con las zeolitas sintéticas. Claramente la creación de estos materiales son resultado del uso de diversos procesos químicos que encarecen el uso de estos.

La introducción de la zeolita en la estabilización de suelos aporta minerales de silicatos de calcio que se aglutinarán con las partículas pequeñas de suelo gra-

Tabla 1. Parámetros guía para la estabilización de suelos con cal

Propiedades del suelo					
Más de 25 % pasa por el tamiz #200			Menos de 25 % pasa por el tamiz #200		
IP < 0 = 10	10 < IP < 0 = 20	IP > 20	IP < 0 = 6	IP < 0 = 10	IP > 10
No aplica	Aplica	Aplica	No aplica	No aplica	Aplica

Fuente: IMT, 2003 (Pérez et al., 2019)

cias a la formación de cristales de hidróxido de sílice hidratado, otorgando propiedades friccionantes al suelo y reduciendo la plasticidad. Sin embargo, es necesaria la adición de cal como activador puzolánico, ya que la cal desencadena la reacción en presencia de agua debido a su alto contenido de óxido de calcio, del cual carecen la mayoría de las puzolanas (Cheng *et al.*, 2018) y por lo cual es necesario su adición en la estabilización de arcillas. Los minerales formados por las reacciones (silicato de calcio hidratado y aluminato de calcio hidratado) resultan como producto de la actividad puzolánica y estos serán los encargados de mejorar la estabilidad y resistencia de suelos arcillosos, logrando inclusive mitigar la expansión debido a la baja permeabilidad que consiguen (Cheng *et al.*, 2018).

INFLUENCIA DEL pH EN LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA

Por su parte, el potencial hidrogeno (pH) juega un papel importante en la capacidad de intercambio catiónico que puede mostrar un suelo y es uno de los principales factores que intervienen en las reacciones químicas y las primeras fases de la actividad puzolánica entre la cal y la zeolita. El pH es una medida de acidez o alcalinidad de un medio y es medido en una escala de 0 a 14, siendo el valor de 0 el más ácido, 7 un estado neutro y 14 un medio alcalino. Este término fue definido por el químico Sorensen S. P., basándose en el antilogaritmo de la actividad de iones de hidrogeno. El valor del pH depende de la temperatura y el potencial eléctrico de la sustancia que se esté midiendo, siendo su determinación un procedimiento importante que describe la actividad de las moléculas de los materiales implicados. Como se mencionó anteriormente, para la estabilización de suelos arcillosos se recomienda alcanzar un pH de 12.4, debido a que el aumento de alcalinidad de un suelo (disminución de cationes hidrógeno) aumenta la carga negativa de la deprotonación de grupos hidroxilo de los minerales de arcilla, lo que aumenta la capacidad de intercambio catiónico, permitiendo a los cationes de calcio de la cal, sustituir a los cationes del suelo como litio, sodio e hidrógeno; aportando mayor resistencia al suelo (Ramos *et al.*, 2018).

LÍMITES DE ATTERBERG

Los límites de consistencia o límites de Atterberg se utilizan para establecer las fronteras entre los estados en los que se puede encontrar un suelo de granos finos con diferentes contenidos de humedad; estos se han empleado por diferentes sistemas de clasificación de suelos, como el Sistema Unificado de Clasificación de

Suelos (SUCS) y el Sistema de clasificación AASHTO, debido a su practicidad y relativa facilidad de obtención en los laboratorios de geotecnia. Aunado a esto, los límites de Atterberg sirven como indicadores del comportamiento mecánico del suelo, tal como la resistencia al esfuerzo cortante, compresibilidad y el potencial de expansión (Haigh *et al.*, 2014). Para tal efecto, Atterberg definió al Límite Líquido (LL) como el contenido de humedad con el que un suelo pasa de estado plástico a estado líquido; el Límite Plástico (LP) como aquel contenido de humedad con el cual un suelo pasa de estado semisólido a estado plástico y el Límite de Contracción como el cambio de un suelo al pasar de estado semisólido a un estado sólido debido a la pérdida de humedad. De los límites descritos anteriormente, se desprende el Índice de Plasticidad, descrito por la ecuación:

$$IP = LL - LP \tag{1}$$

Con base en múltiples pruebas realizadas por Arthur Casagrande, se realizó el mapeo de forma gráfica de diferentes valores de Índice Plástico contra valores de Límite Líquido (Budhu, 2011). Los valores obtenidos se ubicaban en una región específica de la gráfica, definida por la línea A, la cual separa arcillas, limos y suelos orgánicos. La línea A define las fronteras entre limos y suelos orgánicos que corresponde a la ecuación 2, mientras la Figura 2 presenta las diferentes regiones de la carta de plasticidad.

$$IP = 0.73 (LL - 20) \% \tag{2}$$

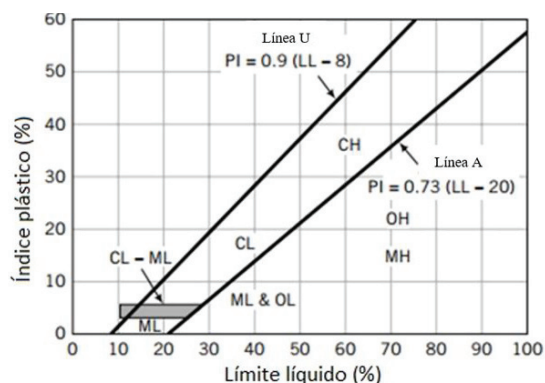


Figura 1. Gráfico para clasificar suelos finos en función de su plasticidad

Fuente: Adaptada al español a partir de Soil mechanics and foundations (Budhu, 2011)

MATERIALES Y MÉTODOS

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Suelo fino

El material para realizar las pruebas en este trabajo de investigación se obtuvo mediante un pozo a cielo abierto (PCA) a una profundidad de 2.5 m en el fraccionamiento Jurica Campestre, con las coordenadas geográficas de 20°39'49.15"N 100°26'50.25"O, mediante un muestreo alterado e inalterado. En esta zona han sido identificadas arcillas de alta plasticidad (López *et al.*, 2010; Minor *et al.*, 2005). Para la obtención de los límites de Atterberg y el límite de contracción se utilizaron las normas ASTM D 4318 (ASTM D., 2017) y ASTM D 427 (ASTM D., 2004), mientras que el valor de pH natural del suelo se obtuvo mediante el método establecido en la norma D 1293 (ASTM D., 2018). Posteriormente se contrastaron los datos con los valores típicos de suelos y minerales para realizar una estimación del mineral predominante del suelo, respaldado del análisis mineralógico por difracción de rayos X realizado por Minor *et al.* (2005) en la misma zona de estudio (Figura 2). La Tabla 3 muestra el resumen de la caracterización del suelo arcilloso, considerando la nomenclatura de color de suelo de acuerdo con la escala de colores de Munsell (Pegalajar *et al.*, 2019).

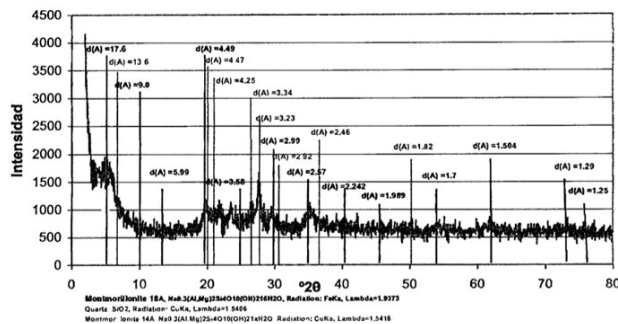


Figura 2. Espectro DRX del suelo muestreado en zona Jurica Fuente: Tomado de estudio de expansión de suelos basado en su mineralogía (Minor *et al.*, 2005)

ZEOLITA NATURAL

Se utilizó una zeolita natural (clinoptilolita) proveniente de un banco natural ubicado en Tehuacán, Puebla, con coordenadas de 18°25'20.17"N y 97°25'3.25"O. Mediante la prueba de difracción de rayos X, se identifican picos definidos en el rango de 10-50 en 2θ en el patrón DRX (Figura 3). Con la prueba de fluorescencia de rayos X se identifica el compuesto principal de la zeolita, que es SiO2 (68.25 %), seguido de Al2O3 (15.14 %). El valor de pH natural de la zeolita se obtuvo mediante la norma D1293. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3. Caracterización natural del suelo arcilloso

Propiedades básicas de caracterización de la arcilla natural	Valores
Color del material húmedo	7.5YR 4-3
Color del material seco	7.5YR 5-4
Profundidad del sondeo (m ²)	2.5
Densidad (kg/m ³)	1740
Peso específico de solidos	2.45
Material que pasa el tamiz Núm. 40 (%)	98.38
Material que pasa el tamiz Núm. 200 (%)	81.61
Humedad natural (%)	21.21
Límite líquido (%)	63.16
Límite plástico (%)	31.52
Índice plástico (%)	31.64
Límite de contracción (%)	14.31
Valor pH	7.78
Clasificación SUCS	CH
Clasificación AASHTO	A-7-5 (20)

Fuente: Elaboración propia

CAL PARA ESTABILIZACIÓN

La composición química de la cal y del valor de pH se muestra en la Tabla 5, los cuales fueron proporcionados por la empresa Calhidra y cuyos valores se ubican dentro de los parámetros de aceptación bajo la norma ASTM C977 (ASTM C 977, 2016) sobre especificaciones de la cal para estabilizaciones.

PORCENTAJES DE DOSIFICACIÓN

Bajo los lineamientos de la norma ASTM D 6276 (ASTM D., 2006), se llevó a cabo la determinación del valor natural de pH de cada sustancia, posteriormente se realizaron diferentes mezclas de suelo natural con adiciones de cal en diferentes proporciones con el objetivo de observar el comportamiento en el valor del pH. El pH de cada mezcla fue analizado para encontrar aquel porcentaje para un valor de pH cercano a 12.4. El mismo procedimiento se realizó con suelo natural más zeolita y la combinación de los tres materiales (suelo natural + cal + zeolita). La Tabla 6 muestra el valor de diferentes mediciones de pH para los materiales sin mezclar.

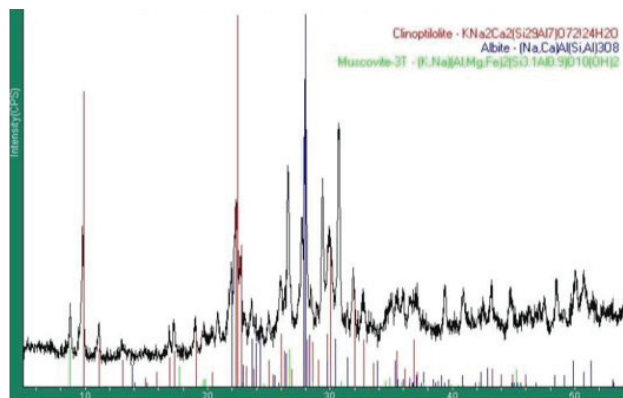


Figura 3. Espectro DRX de la zeolita

Fuente: Elaboración propia

OBTENCIÓN DE LÍMITES DE ATTERBERG

Tabla 4. Características físicas y químicas de la zeolita

Composición química y mineralógica de la zeolita	Valores
SiO ₂ (%)	68.25
Al ₂ O ₃ (%)	15.14
CaO (%)	8.67
K ₂ O (%)	4.34
Fe ₂ O ₃ (%)	1.64
Na ₂ O (%)	1.54
MgO (%)	0.22
Clinoptilolita	60
Albita	30
Moscovita	10
Grupo perteneciente	Zeolita
pH	9.3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Características físicas y químicas del hidróxido de calcio

Composición química y mineralógica de la cal	Valores
CaO (%)	90 - 92
MgO (%)	0.2 - 0.3
Fe ₂ O ₃ (%)	1.1 - 1.3
Al ₂ O ₃ (%)	0.8 - 1.0
SiO ₂ (%)	1.1 - 1.4
SO ₃ (%)	0.2 - 0.4
Na ₂ O (%)	0.5
CO ₂ (%)	3 - 4
pH	12.3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Valores de pH para el suelo, cal y zeolita

Ensayo	Muestra	Valores	
		valor pH	Temp. (°C)
1	Suelo CH	7.8	20.7
2		7.78	20.3
3		7.81	20.5
4		7.77	20.6
5		7.76	20.4
1	Zeolita	9.31	22.2
2		9.33	22.4
3		9.3	22.2
4		9.3	22.1
5		9.31	22.3
1	Cal	12.26	18.3
2		12.32	18.3
3		12.3	18.1
4		12.33	18.2
5		12.29	18.4

Fuente: Elaboración propia

De los resultados anteriores, se calcularon los límites de Atterberg bajo las normas ASTM D 4318 (ASTM D., 2017) y ASTM D 427 (ASTM D., 2004) para las dosificaciones de material con las proporciones más representativas, es decir, aquellas cuyos valores de Limite Líquido y Limite Plástico resultan más benéficas en relación con los datos obtenidos de las otras muestras. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8, donde se puede apreciar que el material denominado como 5CZ demuestra un LL=58.9 y LP de 37.9, lo que trae consigo un IP = 21, el cual indica una mejora eficaz en cuanto a las cantidades de insumos utilizadas en su fabricación, con los valores de Atterberg conseguidos.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la Tabla 7 se muestran los cambios del valor de pH del suelo natural respecto a los especímenes 1C hasta 8C dosificados con cal. Puede observarse que, mientras la muestra 3C alcanza un valor cercano a 12.1 de pH con LL= 71.8 y LP= 60.81, el espécimen 5C muestra valores de LL=65.49 y LP=51.92 con pH de 12.18, siendo de 12 % a 15 % menor al anterior (Tabla 7). La naturaleza logarítmica del valor de pH de la muestra 5C implica un aumento casi nulo del valor de pH respecto a la muestra 7C, y una mejora promedio de 8 % en el IP, incrementando el LL 7.61 % y disminuyendo el LP

7.69 % (Tabla 8). Por lo anterior, se determina que las tres dosificaciones con mejor desempeño y relación cal-pH son las muestras 3C, 5C y 7C; mismas que fueron utilizadas para la dosificación en conjunto con zeolita natural.

Tabla 7. Variación del pH de las diferentes mezclas para cada dosificación de suelo, cal y zeolita

Número	Clave de la muestra	Dosificación	Valor pH
1	1C	3 % cal	10.5
2	2C	4 % cal	11.6
3	3C	5 % cal	12.1
4	4C	8 % cal	12.13
5	5C	10 % cal	12.18
6	6C	12 % cal	12.19
7	7C	15 % cal	12.2
8	8C	20 % cal	12.31
9	9C	22 % cal	12.31
1	1Z	3 % zeolita	7.88
2	2Z	6 % zeolita	7.91
3	3Z	9 % zeolita	8.02
4	4Z	12 % zeolita	8.3
5	5Z	15 % zeolita	8.45
6	6Z	18 % zeolita	8.8
7	7Z	21 % zeolita	9.25
8	8Z	24 % zeolita	9.26
9	9Z	26 % zeolita	9.26
1	1CZ	5 % cal + 6 % zeolita	12.15
2	2CZ	5 % cal + 12% zeolita	12.18
3	3CZ	5 % cal + 18 % zeolita	12.19
4	4CZ	10 % cal + 6 % zeolita	12.2
5	5CZ	10 % cal + 12 % zeolita	12.2
6	6CZ	10 % cal + 18 % zeolita	12.22
7	7CZ	15 % cal + 6 % zeolita	12.24
8	8CZ	15 % cal + 12 % zeolita	12.25
9	9CZ	15 % cal + 18 % zeolita	12.25

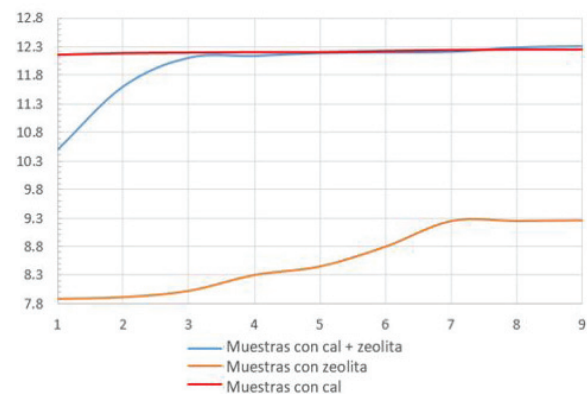
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se puede observar que la adición de zeolita sobre el suelo natural (especímenes de 1Z hasta 7Z) no tiene un gran efecto sobre el valor del pH natural (Figura 4), siendo la alcalinidad del suelo incapaz de iniciar la actividad puzolánica por cuenta propia. De estas últimas muestras (1Z a 7Z), los porcentajes de zeolita a ser utilizados en conjunto con cal fueron seleccionados principalmente por la relación en proporción que tendrán con los otros componentes de la mezcla total, esto con el fin de cubrir los resultados que se obtienen al tener una relación aproximada de 0.5:1, 1:1 y 1.5:1 de cal-zeolita; que se puede observar en las muestras 4CZ, 5CZ y 6CZ. Mientras tanto, los especímenes 4CZ, 5CZ, 7CZ y 8CZ, mezclados con cal y zeolita, muestran valores de IP de 14.15, 21, 11.88 y 7.67 respectivamente, lo que representa una mejora virtual de los valores de LL y LP desde el 10 al 20 % sobre las estabilizaciones individuales de cal y zeolita.

En las Figuras 5a y 5b, se aprecia la variación de los límites de Atterberg entre cada muestra, donde los valores de IP más altos son las muestras 2Z, 4Z y 7C. Por el contrario, se puede observar que los valores más bajos de IP están dados por las muestras 4CZ, 8CZ y 9CZ.

Finalmente, analizando los valores obtenidos de las pruebas de contracción, es posible notar que los especímenes dosificados con zeolita (especímenes 2Z, 4Z y 6Z) muestran los valores de contracción más bajos, es decir, a una menor cantidad de agua es más susceptible a cambios volumétricos; esto resulta como consecuencia de las propiedades absorbentes del material puzolánico que no se activan con la cal y que amplifican la capacidad de expansión de la arcilla. Para demostrarlo se llevó a cabo un análisis estadístico mediante la prueba t-student utilizando los datos de la Tabla 8, se compararon los datos de las mezclas 5C, 4CZ y 5CZ, con un nivel de significancia de 0.1, se obtuvo un valor $p=0.0621$

Figura 4. Variación del pH de las diferentes muestras



Elaboración propia

Tabla 8. Variación de los límites de consistencia entre dosificaciones

Clave de la muestra	Dosificación	Límite líquido	Límite plástico	Índice plástico	Límite de contracción
3C	5 % cal	71.8	60.81	10.99	29.14
5C	10 % cal	65.49	51.92	13.57	33.10
7C	15 % cal	73.1	44.23	28.87	33.41
2P	6 % zeolita	70.9	22.41	48.49	31.00
4P	12 % zeolita	72.1	36.25	35.85	29.86
6P	18 % zeolita	67.7	45.83	21.87	23.76
4CZ	10 % cal + 6 % zeolita	55.25	46.1	9.15	31.86
5CZ	10 % cal + 12 % zeolita	58.9	37.9	21	30.79
6CZ	10 % cal + 18 % zeolita	61.8	41.7	20.1	31.22
7CZ	15 % cal + 6 % zeolita	53	41.12	11.88	34.41
8CZ	15 % cal + 12 % zeolita	49.5	41.83	7.67	35.53
9CZ	15 % cal + 18 % zeolita	48.4	38.93	9.47	37.45

Fuente: Elaboración propia

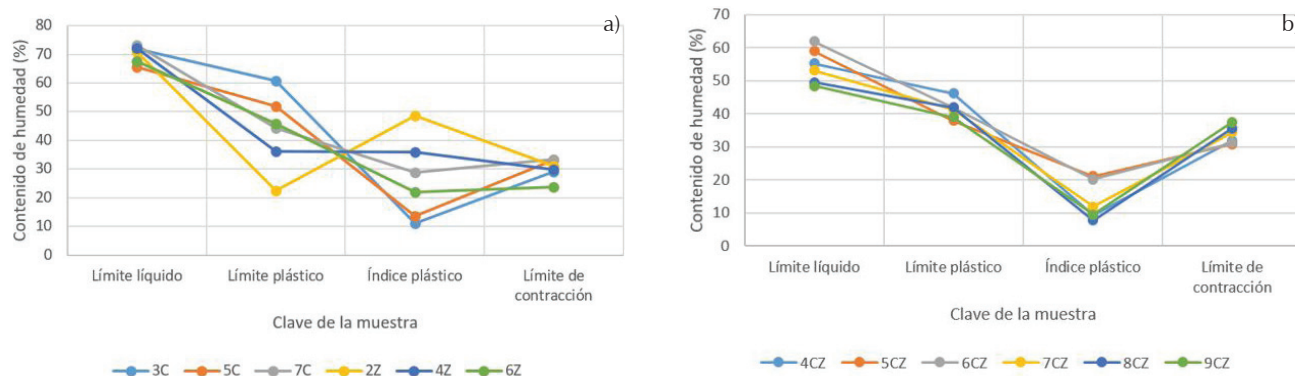


Figura 5. Variación de los límites de Atterberg a diferentes cantidades de cal y zeolita

Fuente: Elaboración propia

para el análisis entre la muestra con 10 % de cal y la mezcla de cal al 10 % con zeolita al 6 %. El análisis realizado para las dosificaciones de cal a 10 % y zeolita a 6 y 12 % (mezclas 4CZ y 5CZ, respectivamente) muestra un valor de $p=0.7358$, el cual indicó que un porcentaje mayor a 6 % de zeolita, no es significativo en los límites de Atterberg. Por consiguiente, el uso de la zeolita es favorable en los casos en los que la cantidad de cal sobrepasa su proporción en peso (especímenes 4CZ, 7CZ y 8CZ) sobre los que es menor; lo que se puede observar con mayor facilidad gracias a las proporciones de material cubiertas (0.5:1, 1:1 y 1.5:1, de cal-zeolita).

La estabilización de cal con puzolanas, específicamente zeolitas, ha sido revisada en otras investigaciones (Harichane *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2018) y aunque se sabe que los resultados de cada experimento varían por

las capacidades de reacción de cada zeolita, todas ellas tienen como resultado más favorable a los especímenes cuya relación cal-zeolita es de 1 : 0.8, respectivamente; no obstante, aún se observan investigadores que practican con dosificaciones superiores de zeolita sobre la cal, justificando su criterio por la prolongada reacción puzolánica (Cheng *et al.*, 2018). Por ello, al comparar estas evidencias, se propone una metodología experimental en la siguiente sección de la investigación, puesto que, aunque se sabe que la reacción puzolánica implica un periodo indefinido de tiempo que se puede extender hasta años (Elsen *et al.*, 2013; Mertens *et al.*, 2009; Jackson *et al.*, 2017), los resultados finales de todas las mezclas de suelos expansivos estabilizados con zeolitas y cal muestran mejores resultados con dosificaciones balanceadas entre cal y puzolana (rangos de 1:0.8, 1:1).

Como comentario adicional, el costo de una tonelada de cal, es de aproximadamente 95.84 dólares americanos, mientras que el costo de una tonelada de zeolita es de 106.06 dólares (9.6 % mayor costo). Considerando los resultados obtenidos, la dosificación de cal y zeolita en rangos de 1:0.8 o 1:1 de cada material, respectivamente, resulta conveniente debido a que los costos de los materiales son muy similares, la zeolita se utiliza en menor proporción que la cal y la ventaja del uso de zeolitas al ser un material natural.

CONCLUSIONES

Para cada caso particular, es necesario realizar los estudios químicos y mineralógicos necesarios para determinar los minerales principales que componen el suelo, y partir de esta base para elegir el método de estabilización adecuado. En el caso de los valores individuales de potencial hidrogeno (pH) de las sustancias, pudo concluirse que la zeolita natural proveniente de Puebla, no cuenta con la alcalinidad suficiente para crear un ambiente propicio en el intercambio catiónico de la arcilla y el óxido de sílice propio de la zeolita, inclusive en altas cantidades. Puede observarse también que en combinación con cal, el aporte a la alcalinidad de la mezcla es muy baja, por lo que no se considera significativa. En esa dirección, se determinó que la metodología más conveniente para el diseño de los porcentajes de dosificación de cal y zeolita sobre suelos expansivos se llevará a cabo considerando como prioridad el porcentaje de cal por masa de suelo seco, hasta alcanzar un pH óptimo y proceder a la dosificación de zeolita, la cual nunca deberá superar la relación de cal de la mezcla, puesto que los resultados de plasticidad pueden incrementarse y perjudicar el objetivo de la estabilización. Se recomienda ampliamente en investigaciones nuevas que entre los valores establecidos de mezclas se cubran las proporciones de 0.5:1, 1:1 y 1.5:1, de cal-zeolita, respectivamente, con el fin de comprobar el comportamiento en la mezcla.

Para este estudio se encontró que el suelo natural posee un IP de 31.64 % y una contracción de 14.31 %. El mineral predominantemente es la montmorillonita, reconocido como principal componente de suelos expansivos.

La cantidad de cal utilizada en el espécimen 4CZ se consideró como la óptima, posterior a un análisis estadístico y económico del uso de materiales, pues como sugiere Little (2000) exceder 15 % de cal implica altos costos económicos, además de la probabilidad de generar etringita; y sumado a esto, un consumo elevado de agua. La ventaja económica del uso de zeolitas, al em-

plearse en menores proporciones que la cal; resulta ser un material sustentable, evitando materiales que llevan un costo ecológico en su elaboración.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y la Universidad Autónoma de Querétaro. Agradecemos al Mvz. Dagoberto Paz-Martínez por las facilidades otorgadas y la donación del material zeolítico para la realización de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- ASTM, C. (2016). Specification for quicklime and hydrated lime for soil stabilization. En Annual book of ASTM standards (1-6). Conshohocken: ASTM International.
- ASTM, D. (2004). Test method for shrinkage factors of soils by the mercury method. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM, D. (2006). Using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soul stabilization. En Annual book of ASTM standards (pp. 1-4). West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM, D. (2017). Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM, D. (2018). Standard test methods fpr pH of water. West Conshohocken: ASTM International.
- Budhu, M. (2011). *Soil mechanics and foundations 3th*. Arizona: John Wiley & Sons.
- Cheng, Y., Wang, S., Li, J., Huang, X., Li, C. & Wu, J. (2018). Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans. *Contruction and building materials*, 1871, 1031-1038.
- Elsen, J., Cizer, O. & Snellings, R. (2013). Lessons from a lost technology. *American mineralogist*, 98, 1917-1918.
- Flanagan, D. (2018). Zeolites (Advance release). *2016 Minerals Yearbook*, 84.1-84.4.
- Frias, M. & Sánchez, M. (2013). Artificial pozzolans in eco-efficient concrete. En *Pozzolans* (pp. 105-122). España: Woodhead.
- Haigh, S., Vardanega, P., Bolton, M. & Barnes, G. (2014). The plastic limit of clays. *Géotechnique*, 64, 584-586. <https://doi.org/10.1680/geot.13.D.06>
- Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S. & Grine, K. (2011). Use of natural pozzolana and lime f or stabilization of cohesive soils. *Geotechnical Geological engineering*, 29, 759-769.
- Ikeagwuani, C. & Nwonu, D. (2018). Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>
- Jackson, M., Mulcahy, S., Chen, H., Li, Y., Li, Q., Cappelletti, P. & Wenk, H. (2017). Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reac-

- tions in Roman marine concrete. *American mineralogist*, 102, 1435-1450. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5993CCBY>
- Little, D. (2000). Mixture design and testing procedure for lime stabilized soils. En *Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates* (pp. 1-171). USA: National lime association.
- López, T., Hernández, J., Horta, J., Coronado, A. & Castaño, V. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 11(3), 159-168.
- Manjaiah, K., Mukhopadhyay, R., Ranjan, P., Data, S. & Sarkar, B. (2019). Clay minerals and zeolites for environmentally sustainable agriculture. *Concept of environmentally sustainable agriculture*, 309-329. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814617-0.0008-6>
- Massazza, F. (2000). Pozzolanic cements. *Cement & concrete composites*, 15(4), 185-214.
- McCarthy, M. & Dyer, T. (2019). Pozzolans and pozzolanic materials. *Lea's chemistry of cement and concrete*, 9, 363-466.
- Mehta, P. (1987). Natural pozzolans: Supplementary cementing materials in concrete. *CANMET Special Publication*, 86, 1-33.
- Mertens, G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P. & Elsen, J. (2009). Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. *Cement and concrete research*, 39(3), 233-240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.008>
- Minor, A., López, T., Hernández, J., Pérez, M., Manzano, A. & Zepeda, J. (2005). *Estudio de expansión de suelos basado en su mineralogía* (Tesis de maestría), Universidad Autónoma de Querétaro.
- Mumpton, F., Boles, J., Flanigen, E., Gude, A., Hay, R. & Surdam, R. (1981). *Mineralogy and geology of natural zeolites*. Virginia: Southern Printing Company.
- Pegalajar, M., Ruiz, L., Sanchez, M. & Mansilla, L. (2019). A Munsell colour-based approach for soil classification using Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks. *FUZZY sets and systems*, 1-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fss.2019.11.002>
- Pérez, N., Pérez, A. & Garnica, P. (2019). Propiedades mecánicas de un suelo estabilizado con "estabilical". *Publicación bimestral de divulgación externa*, 3(178).
- Ramos, F., Carvalho, E., dos Santos, O., Beber, D., Campelo, J. & Souza, J. (2018). Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. *Journal of the science food and agriculture*, 98(9), 3595-3602. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>
- Snellings, R., Mertens, G. & Elsen, J. (2012). Supplementary cementitious materials. *Reviews in mineralogy & geochemistry*, 74, 211-278. <https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6>

Cómo citar: Hernández-Francisco A., López-Lara T., Hernández-Zaragoza J. B. & Horta-Rangel J. M. (2021). Zeolita natural proveniente de Puebla como tratamiento de suelos de la región de Querétaro en vías terrestres: Efectos en su comportamiento plástico. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22 (03), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.3.024>