

Caracterización física-química de loess con cementación puzolánica en condiciones inalteradas y remodeladas.

A. ADAMI y V. A. RINALDI

agustinadami@hotmail.com; vrinaldi@efn.uncor.edu

Universidad Nacional de Córdoba

RESUMEN: Los limos loésicos de Córdoba presentan elevadas deformaciones frente al aumento de humedad y por lo cual, normalmente deben ser compactado para mejorar su comportamiento. En los estudios realizados sobre muestras compactadas de algunos limos loessoides se registraron tendencias tixotrópicas luego del remodelado, registrándose aumentos de rigidez y resistencia al corte con el tiempo en un proceso a temperatura y humedad constante. El estudio realizado en este trabajo pretende identificar los mecanismos físicos y química que generan el proceso tixotrópico. Adicionalmente, se pretende evaluar los cambios estructurales de los loess después de realizado el remodelo. Los resultados permiten mostrar que la reacción puzolánica debido a la presencia de vidrio volcánico en la fabrica del suelo, genera enlaces cementados insolubles que confieren al esqueleto mineral una mayor rigidez y resistencia con el avance de la reacción química en el tiempo.

Palabras clave: Cementación - Reacción Puzolánica - Tixotropía - Rigidez - Microestructura.

ABSTRACT: Loessial soils from Córdoba show large deformation when increasing water content, so that usually the soil must be compacted to improve its behavior. Some experimental results obtained for compacted loessial soils show an increase of stiffness and shear strength with aging after remolding at constant temperature and water content. The aim of this work is to identify the physical and chemical mechanisms that originate this process. Additionally, the conducted research intends to evaluate the structural changes experienced by the soil after remolding. The results allow us to determine that the puzzolanic reaction, due to the presence of volcanic fly ash in the soil, originates cemented bindings of low solubility which strengthen the soil structure as the chemical reaction develops with time.

Key words: Cementation – Pozzolanic reaction – Thixotropy – Stiffness – Microstructure.

1 INTRODUCCIÓN

El perfil geotécnico característico de la ciudad de Córdoba se compone de suelos limo arenoso que alcanzan en algunos sectores hasta 60 metros de espesor. Dichos suelos están constituidos por una estructura macroporosa y son propensos a colapsar frente al aumento del porcentaje de saturación. Usualmente, se recurre a los métodos de compactación para mejorar la estabilidad del suelo. Estudios recientes detectaron ciertos lentes presentes en el perfil de la Formación loessica de la ciudad de Córdoba que poseen elevada rigidez en estado natural y que cuando son remodelados muestran un incremento significativo en su rigidez y resistencia al corte con el tiempo de añejamiento. De acuerdo con estos

mismos estudios, la presencia de vidrio volcánico o sílice amorfa sería la causante del comportamiento observado pudiendo producirse una reacción puzolánica de tipo irreversible en presencia de fluidos alcalinos.

El objetivo del trabajo consiste en la ejecución de una batería de ensayos mecánicos, físicos y químicos tendientes a reconocer los procesos que pueden explicar comportamiento estructural observado, determinar el posible proceso de formación de dicha estructura y evaluar la posibilidad de reproducir en laboratorio estos procesos en muestras compactadas.

2 BREVE ESTADO DEL CONOCIMIENTO

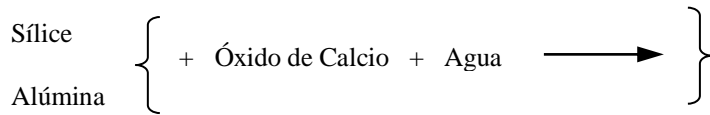
El fenómeno tixotrópico puede definirse como “la propiedad de un material que produce la rigidización en un tiempo relativamente corto de reposo, pero que cuando es agitado cambia a una sustancia de consistencia muy blanda ó a un fluido de alta viscosidad, siendo el proceso completamente reversible” Ref. [1]. El aumento de rigidez es detectado en variaciones en ciertas propiedades reológicas de un sistema, como el módulo elástico, tensión de corte ó viscosidad. Los autores Ref. [2, 3] muestran aumentos de resistencia a la compresión con el tiempo de almacenamiento de especímenes de arcilla limosa. En los trabajos reportados en Ref. [4], [5], y [6]) el efecto tixotrópico fue evaluado mediante ensayos edométricos, observando los aumentos en la presión de preconsolidación y en el módulo de deformación. Se reportaron variaciones en el módulo edométrico del orden del 20% al año de compactada las muestras y del 100% en períodos de reposo de 10 años. Mediciones indirectas de velocidad de onda de corte mediante la técnica de bender elements permiten evidenciar el aumento del módulo de corte (G) con el tiempo de almacenamiento. En las Ref. [7] y Ref. [8] se presentan resultados obtenidos de ensayos de edómetro modificado con bender elements sobre diferentes muestras de arcilla, evidenciando el aumento de G con el paso del tiempo y la consecuente rigidización de las muestras.

En general, la rigidización registrada con el paso del tiempo se atribuye en la literatura a procesos que generan cambios a nivel microestructural de las partículas del suelo, introduciendo un nuevo arreglo estructural más estable. En Ref. [9] se postula que la aplicación de remoldeo sobre una muestra de suelo altera la estructura inicial, destruyendo las uniones y generando un nuevo arreglo disperso de partículas. Cuando cesa la energía externa aplicada, las fuerzas de repulsión entre partículas disminuye con el paso del tiempo. En un determinado instante, las fuerzas de atracción tienden a ser mayores e inclinan el balance hacia un movimiento de floculación de partículas. En los trabajos reportados en Ref. [2] y [10] se atribuye el aumento de resistencia con el tiempo a una redistribución de las partículas móviles alrededor del contacto intergranular, estabilizando y reforzando las uniones areno-limosas mediante puentes de arcilla.

Aunque no se mencione en la literatura, el fenómeno tixotrópico podría resultar también de una cementación a nivel de contacto entre partículas. Las posibles causas de uniones entre contactos de partículas son: enlaces iónicos, puentes y contrafuertes de arcilla, precipitación de sales, reacciones puzolánicas (silicatos, carbonatos, aluminatos), y otros procesos físico-químicos. Cada uno de este tipo de uniones tiene distintas características en cuanto a estabilidad, y resistencia, siendo las más débiles las de tipo iónica, y las más fuertes y estables las de tipo de enlace químico.

En la Ref. [11] se define a los materiales de carácter puzolánico como a materiales silicios o aluminosilíceos quienes por si solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se encuentran finamente divididos y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. La reacción de materiales puzolánicos consiste en la solubilización de los componentes de sílice y alúmina amorfas o pobremente cristalizadas. Este proceso necesita un medio acuoso alcalino, que puede ser creado por la presencia de hidróxido de calcio en solución. Como resultado se forman aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos

similares a los obtenidos en el proceso de fraguada del cemento Portland Ref. [12]. Sintéticamente la reacción puede ser representada como:



De acuerdo con lo reportado en Ref. [13] la hidratación de las partículas puzolánicas ocurre en tres etapas: luego del amasado con agua, las partículas se recubren de una capa de gel que impermeabiliza el paso del agua. Cuando la concentración de álcalis y oxidrilo (OH) alcanza un valor crítico, atraviesan la capa protectora impermeable y comienza la disolución de la parte amorfa de la ceniza. La segunda etapa de inducción es puramente un fenómeno cinético de difusión. La velocidad de difusión aumenta con el nivel de pH de la solución. Finalmente, la tercera etapa es la correspondiente a la reacción puzolánica propiamente dicha. En esta etapa, el hidróxido cálcico es consumido, generándose geles de silicatos cálcicos hidratados y aluminatos cálcicos hidratados. La velocidad de reacción y el grado de reacción dependen de la cantidad de iones de calcio disponibles y la alcalinidad de la fase acuosa Ref. [14]. La resistencia mecánica final de la muestra puzolánica se desarrolla en el largo plazo. Independientemente de la velocidad de reacción inicial, la resistencia final es función de la mayor relación de Si/Al, ya que el silicato cálcico hidratado es el responsable de la rigidización de la estructura Ref. [15].

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

El sitio de donde se extrajeron las muestras estudiadas en este trabajo se encuentra emplazado en el barrio de Nueva Córdoba, en las inmediaciones de la Terminal de Ómnibus de Córdoba. Las perforaciones fueron realizadas a mano hasta profundidades de 20 metros, con la extracción de panes inalterados del limo loésicos. En la Tabla 1 se presentan las principales propiedades geotécnicas de las muestras extraídas y la profundidad de las mismas. Las muestras de la Tabla 1 fueron seleccionadas atendiendo a que mostraban características de una estructuración marcada indicando la presencia de un cementante estable. Como se observa en la Tabla 1 la textura de todas las muestras son similares variando los parámetros entre ellas en un rango muy acotado lo cual esta indica su mismo origen genético. En Tabla 2 se presenta un resumen del programa de trabajo indicando los ensayos realizados sobre cada una de las muestras. Como se observa en este programa se incluyeron ensayos físico-químicos (espectrometría de rayos X, difracción de rayos X, superficies específica, ensayo Luxán et al., ensayo McCarter y Tran) y ensayos mecánicos como compresión simple, edómetro y medición de velocidad de propagación de ondas.

Tabla 1. Propiedades Geotécnicas de las muestras estudiadas.

	M11	M12	M13	M14
Profundidad [m]	11.0	12.0	13.0	14.0
γ_d [tn/m ³]	1.20	1.23	1.17	1.18
w [%]	34.5	34.2	36.8	34.5
Pasante 200	91.4	93.5	92.4	92.1
L.P.	30	29	28	30
L.L.	38	40	40	39
I.P.	8	11	12	9
Clasificación	ML-CL	ML-CL	ML-CL	ML-CL

Tabla 2. Resumen del programa de ensayo implementados en cada una de las muestras.

	M11	M12	M13	M14
Límites	x	x	x	x
Granulometría	x	x	x	x
Espectrometría rayos X	x	x	x	x
Difracción rayos X		x		x
Superficie específica	x	x	x	x
Ensayo Luxán et al.	x	x	x	x
Ensayo McCarter y Tran	x			
Compresión simple	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días, 14 días, 21 días	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días, 14 días, 21 días, 28 días	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días, 14 días, 21 días, 28 días	Inalt., 0 días, 7 días, 14 días, 21 días
Edómetro	Inalt., 0 días, 7 días, 14 días, 21 días	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días, 14 días, 21 días, 28 días	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días, 14 días, 21 días	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días, 14 días
Velocidad de ondas de corte.	Inalt., 3 días, 7 días, 14 días	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días, 14 días	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días, 14 días	Inalt., 0 días, 3 días, 7 días
Condición densidad γ_d [tn/m ³]	1.20	1.23	1.17	1.20
Condición humedad w [%]	34.7	34.5	37.2	35.0

4 DESCRIPCION DE LOS RESULTADOS

4.1 Espectrometría de Rayos X

Se llevó a cabo ensayos de espectrometría de rayos X sobre las cuatro muestras identificadas como M11, M12, M13 y M14. Los compuestos minerales de estas muestras se indican en la Tabla 3. Acorde a los resultados obtenidos, las muestras analizadas poseen un porcentaje elevado de compuestos de sílice y aluminio oxidados. Contabilizando la suma de silicatos, aluminatos y óxido de hierro, el porcentaje asciende a más del 85%. Este valor es superior 70% estipulado por norma ASTM C618-12. Por lo cual se puede caracterizar este material como puzolánico según este ensayo.

Tabla 3. Composición mineralógica de las muestras analizadas

Compuesto [%]	M11	M12	M13	M14
SiO ₂	55.18	55.74	62.53	55.93
Al ₂ O ₃	20.90	20.67	19.90	19.98
Fe ₂ O ₃	9.04	8.82	7.55	8.35
CaO	7.83	7.97	1.40	8.77
MgO	2.34	2.25	2.75	2.18
K ₂ O	2.33	2.29	2.64	2.23
Na ₂ O	1.19	1.26	1.47	1.32

4.2 Difracción Rayos X

Con el objetivo de determinar el contenido de material en estado amorfo sin reaccionar, se realizó un ensayo de difracción de rayos X. Las muestras fueron pulverizadas en mortero de ágata y posteriormente montadas en un portamuestras monocristal de silicio. Para el estudio se utilizó un equipo PANalytical X'PERT Pro. Los diagramas se midieron entre 5 y 60° (2θ), con un paso de 0,02° (2θ), en modo continuo y a una velocidad de 1 s/paso. Se empleó radiación X producida por cobre a 40 kV y 40 mA, filtrada con un monocromador de grafito de haz difractado. En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos para la muestra M12. Puede observarse que el pico de mayor difracción se encuentra en concordancia con la composición del mineral de cuarzo, ratificando una vez más el alto contenido de silicatos. Se identificaron así mismo altos contenidos de material arcilloso, especialmente illita, caolinita y plagioclasa. Puede observarse la presencia de elevado contenido de materiales en estado amorfo, lo cual se deriva a partir del área entre la curva de difracción y el eje de las abscisas.

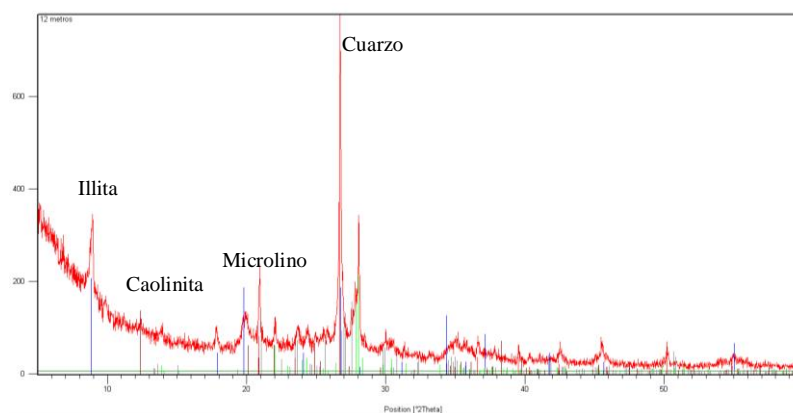


Figura 1. Espectro de difracción de rayos X correspondiente a la muestra M12.

4.3 Determinación de la Superficie Específica

El tamaño y forma de las partículas determina el grado de reactividad y la velocidad con que pueden ocurrir las reacciones puzolánicas en los suelos. La superficie específica fue determinada mediante el método simplificado de azul de metileno Ref. [17]. Dado que el objetivo del análisis es evaluar el potencial puzolánico de las muestras de suelo, la superficie específica reactiva obtenida por el método de azul de metileno, refleja la capacidad de interacción de las partículas con soluciones alcalinas. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4. La superficie específica promedio obtenida es de 60 m²/gr. lo cual se correlaciona con los valores promedio de illita que es la fracción arcillosa preponderante en el suelo analizado.

Tabla 4. Superficie Específica de las muestras analizadas

Muestra	M11	M12	M13	M14
Sup. Esp. [m ² /gr]	52.5	68.5	69.7	56.3

4.4 Potencial Puzolánico

Acorde a los resultados de los ensayos precedentes, se podría asumir que el material sería del tipo puzolánico. Las muestras presentan alto contenido de silicatos y aluminatos que reaccionarían con la solución alcalina para formar cementantes hidratados. La presencia de minerales en estado amorfo

asegura una cristalización y rigidización luego de la reacción puzolánica y por otro lado, la elevada superficie específica facilitaría el proceso de hidratación y velocidad de reacción. Existen diferentes metodologías y ensayos químicos para determinar el potencial puzolánico de un material como el suelo analizado. El objetivo de dichos ensayos es cuantificar la magnitud y velocidad de reacción mediante metodologías sencillas y de rápida evaluación. En la presente investigación se aplicaron las metodologías propuestas por Ref. [18] y por Ref. [19].

Método de Luxán: Esta metodología se describe en Ref. [18] y su objetivo es clasificar materiales acorde a la posibilidad de formar reacciones puzolánicas. El ensayo consiste en medir la variación de conductividad eléctrica con el paso del tiempo cuando se incorpora 5 gr de suelo a una solución saturada con hidróxido de calcio. Si la caída de conductividad resulta mayor a 1.20 mS/cm en el lapso de 120 segundos, el material analizado se considera muy puzolánico. Los ensayos se realizaron sobre las cuatro muestras M11, M12, M13 y M14. Los resultados obtenidos indican un elevado grado de puzolanicidad de las muestras por la variación de la conductividad mayor a 1.20mS/cm a los 120 segundos. La Figura 2 muestra la caída de conductividad registrada en cada ensayo.

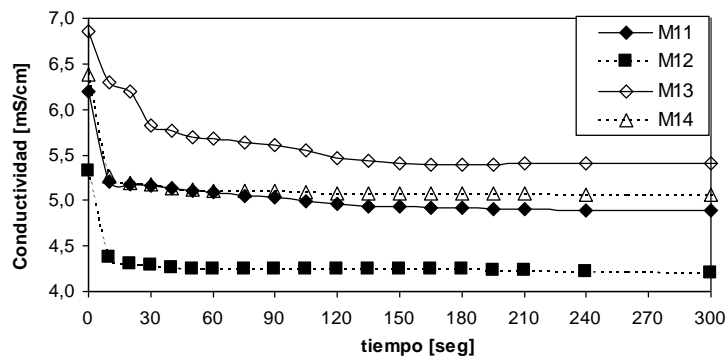


Figura 2. Resultados experimentales del método propuesto por Luxán et al. (1989). Variación de la conductividad eléctrica con el tiempo de ensayo.

Método McCarter y Tran: La metodología propuesta por los autores en Ref. [19] consiste en registrar las variaciones en la conductividad eléctrica de una muestra de suelo con hidróxido de calcio en una relación Suelo-Hidróxido de Calcio de 9:1, la cual se lleva posteriormente a una humedad de 90% en peso de material seco. La mezcla resultante se introduce en un recipiente cilíndrico de acrílico, que posee electrodos en sus extremos para medir resistividad. El equipo de acrílico fue almacenado dentro de un recipiente de telgopor en un depósito con cámara húmeda para asegurar una humedad del 100% y temperatura constante de 20°C. En la Figura 3 se ilustra la variación de la conductividad eléctrica con el avance de la reacción de hidratación para la muestra M11, registrada durante un lapso de 50 horas.

La curva de conductividad obtenida presenta cuatro regiones diferenciadas. La región I muestra una actividad química temprana por parte de las partículas, y se atribuye al proceso de disolución de los compuestos de silicato y aluminato. Dicha reacción temprana ocurre dentro de las 2 primeras horas y se registra la mayor tasa de disminución de la conductividad, en concordancia con los resultados obtenidos por la metodología propuesta por Ref. [18]. La siguiente región II representa un período de reposo donde la actividad química disminuye. La tercera etapa ocurre entre las 6 y las 27 horas luego del inicio del ensayo. En éste período ocurre la reacción puzolánica propiamente dicha, en un lento proceso pero con una tasa de variación de la conductividad constante. La región IV se extiende luego de las 24 horas de remoldeo pero sin evidenciar variaciones en la conductividad eléctrica.

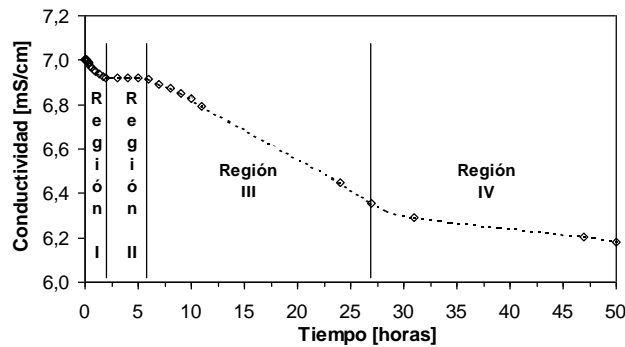


Figura 3. Variación en la conductividad eléctrica mediante el ensayo propuesto por McCarter y Tran para la muestra M11.

Para cuantificar las propiedades puzolánicas de los materiales ensayados, los autores en Ref. [19] proponen calcular el índice puzolánico a partir de la máxima tasa de variación de la conductividad y el tiempo T en el cual termina la región III. Dichos parámetros permitirían conocer la velocidad con la que se lleva a cabo el proceso de rigidización de la muestra y el tiempo necesario para que la reacción puzolánica se complete. El autor calcula el índice de puzolanicidad como:

$$IP = \frac{(\partial\sigma_t / \partial t)_{\max}}{T} \times 10^4 [S / m / h^2] \quad (1)$$

Para la muestra de la M11 de la Figura 3, la tasa máxima de variación de conductividad es $(d\sigma_t/dt)_{\max} = 0.085$, el tiempo para finalización de región III es $T = 27$ horas. Entonces, el índice de puzolanicidad resulta $IP = 31 S/m/h^2$. Los autores en Ref. [19] muestran resultados para materiales poco reactivos de $15 S/m/h^2$ (Metakaolín, cenizas volantes) y materiales con elevada puzolanicidad con valores de $65 S/m/h^2$ (GGBS, micro sílica). La actividad de los suelos ensayados mediante ésta técnica, resulta elevada en comparación con arcillas de gran superficie específica o cenizas volcánicas.

4.5 Ensayos de Compresión Simple

La resistencia a compresión es un parámetro que permite evaluar la resistencia al corte en condición no drenada. Este ensayo ha sido utilizado normalmente en la literatura para mostrar los cambios de rigidización de los suelos con el paso del tiempo. En este trabajo se prepararon muestras cilíndricas de 50mm de diámetro y 100 mm. Las muestras se compactaron en un molde tripartido con un contenido de humedad y a una densidad igual a los valores in-situ. Luego fueron almacenadas en bolsas herméticas cerradas al vacío y dentro de un recinto a humedad relativa del 100% para ser ensayadas luego de un período de almacenamiento de 0, 3, 7, 14, 21 y 28 días. Por cada tiempo de reposo, se ensayaron 3 muestras y se tomaron un promedio de las mismas como la curva tensión-deformación característica.

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos para el caso de la muestra M13. Se observa claramente que a medida que transcurre el tiempo de curado, la tensión de rotura última aumenta considerablemente y la deformación para alcanzar dicho punto es cada vez menor. La rigidez aumenta conforme se produce la reacción y la estructura se vuelve más frágil. Esto último confirmaría la formación de vínculos cementantes.

Los valores registrados tienden a aproximarse a los valores correspondientes a las muestras inalteradas. Nótese que la densidad de las muestras compactadas y el contenido de humedad son iguales a los parámetros originales del suelo, las variaciones registradas evidencian cambios estructurales notables en las muestras analizadas. La succión es una componente que no influye debido al alto grado de saturación de las muestras preparadas, que permanece constante durante todo el tiempo de almacenamiento.

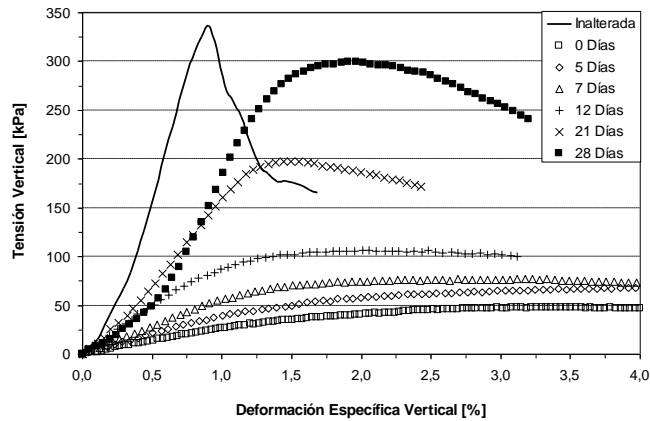


Figura 4. Curva típica de tensión vertical en función de la deformación registrada en el ensayo de compresión simple para la muestra M13, para cada uno de los tiempos de almacenamiento.

4.6 Ensayo de Compresión Confinada

En este estudio los ensayos de compresión confinada se realizaron en un edómetro de anillo flotante. Las muestras se prepararon en condición inalterada y remoldeada con tiempos de reposo de 0 a 21 días. Los resultados obtenidos para la muestra M11 se presentan en la Figura 5. Para la muestra en condiciones inalteradas se observa un comportamiento típico de arcilla sobreconsolidada con elevada presión de presión de preconsolidación (400 kPa,) indicando la fuerte cementación de este suelo. La muestra compactadas a la misma densidad y contenido de humedad sin reposo presentan un comportamiento completamente diferente. El comportamiento responde a un material más compresible tanto en el tramo inicial como a tensiones mayores a la fluencia. La deformación observadas a la máxima tensión de ensayo resulta cuatro 20 % mayor a la correspondiente inalterada. En esta muestra, la presión de preconsolidación puede establecerse en 100 kPa, en similitud con muestras típicas de loess pampeano. A partir de las curvas de compresibilidad de la Figura 5, se observa que a mayor tiempo de almacenamiento, mayor rigidez adquiere la muestra. Para tiempos de almacenamiento de 28 días, el comportamiento se aproxima a las muestras inalteradas con presiones de fluencia cercanas a 250 kPa y deformaciones del orden de 11%. Estos resultados parecen confirmar una vez más que con el paso del tiempo se desarrolla la reacción puzolánica, formándose cementantes que modifican la estructura remoldeada inicial. Por ello la presión de preconsolidación aumenta con el avance de la reacción y se expande el campo elástico. Una vez superada dicha presión, los vínculos cementantes se quiebran abruptamente y las deformaciones aumentan rápidamente.

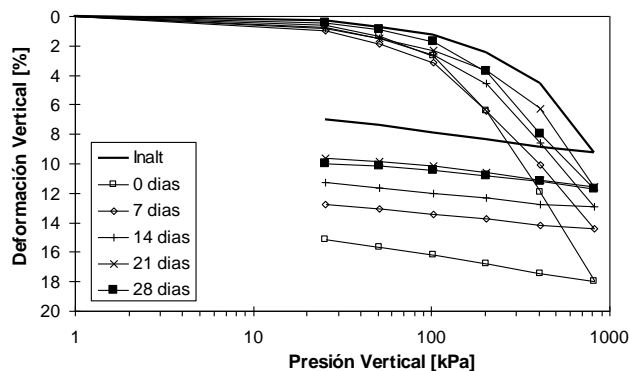


Figura 5. Curvas de compresibilidad de la muestra M11 para diferentes tiempos de almacenamiento.

4.7 Determinación de Velocidad de Onda de Corte

La velocidad de ondas de corte en un suelo esta relacionada con la rigidez de la muestra a través de la relación elástica:

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad, V_s es la velocidad de onda de corte y G es el módulo de rigidez del suelo,

La técnica del edómetro modificado con bender elements resulta simple y económica de construir Ref. [20] y los resultados obtenidos son comparables con los obtenidos mediante el equipo de columna resonante Ref. [21]. El tratamiento de las señales recibidas para la determinación del tiempo de arribo de la onda de corte se discute en la Ref. [22]. En la presente investigación se determinó la velocidad de onda de corte V_s para muestras inalteradas y compactadas con diferentes tiempos de almacenamiento. Al realizar el ensayo de compresión confinada, para cada salto de carga aplicado se obtiene la señal emitida y la onda de corte recibida en el otro extremo de la probeta. Con la diferencia de tiempo de viaje y la distancia entre bender elements se calcula la velocidad de onda de corte.

Se ensayaron muestras compactadas y reposadas durante períodos de 0, 3, 7 y 14 días. Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 6, donde puede observarse el incremento en la velocidad inicial (para una tensión vertical de 98 kPa) con el tiempo de reposo. Se determinó una velocidad promedio de 70 m/s para las muestras ensayadas en el momento de remoldeo. La velocidad tiende a aumentar hasta 90 m/s promedio, para muestras con tiempos de reposo de 14 días. Los resultados muestran una tendencia a recuperar los valores iniciales de las muestras inalteradas, que en todos los casos resultó de 150 m/s.

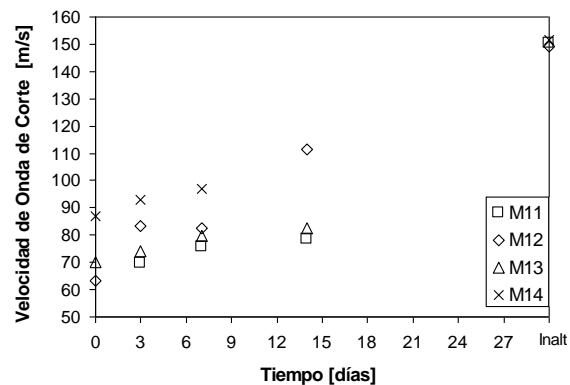


Figura 6. Variación de la Velocidad de Onda de Corte para una tensión vertical de 98 kPa, para las diferentes muestras con diversos tiempos de reposo.

5 CONCLUSIONES

En base a los ensayos realizados y la bibliografía consultada, se pueden resumir las siguientes conclusiones:

- Los ensayos clásicos de identificación de suelos resultan convenientes para clasificar la mayoría de los materiales geotécnicos. Pero existe una minoría cuyas propiedades escapan a los parámetros típicos de plasticidad y granulometría. Un avance en la caracterización químico-física permite conocer procesos de formación o componentes presentes en el suelo que permiten interpretar el funcionamiento estructural del suelo.

- b) Los diferentes ensayos propuestos permitieron identificar las características puzolánicas de las muestras de limo arcilloso. Los resultados obtenidos nos permiten predecir el potencial puzolánico, la velocidad con que se suceden las reacciones de hidratación y la posibilidad de recuperar una estructura similar a las muestras inalteradas en el lapso de 28 días.
- c) La estructura rígida y estable de las muestras analizadas responde a reacciones del tipo puzolánicas. Dichas reacciones químico-físicas, que se producen durante la hidratación y el posterior reposo, son reversibles, indicando el comportamiento tixotrópico del suelo.
- d) La variación de rigidez con el tiempo de curado fue evidenciado con ensayos de compresión simple, compresión confinada y medición de velocidad de ondas de corte. Todos los resultados obtenidos indican una tendencia clara de rigidización de las muestras bajo condiciones de humedad y temperatura constante.

6 REFERENCIAS

Ref [1] ASTM D653-11. *Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids*. Vol. 04.08 2011.

Ref [2] Diaz-Rodriguez J. Abraham, Santamarina J. Carlos. *Thixotropy: The Case of Mexico City Soils*. XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 441-448, 1999.

Ref [3] Locat Jacques, Bérubé Marc-André, Choquette Marc. Laboratory Investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 294-304, 1990.

Ref [4] Schmertmann H. John. The Mechanical Aging of Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, N° 9, pp. 1288-1330, 1991.

Ref [5] Long, L. G. Comparison of field and laboratory dynamic soil properties. Thesis presented to the University of Texas, at Austin, Tex., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 1980.

Ref [6] Troncosos J. H., Garcés E. *Aging Effects in the Shear Modulus of Soils*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 19, pp. 595-601, 2000.

Ref [7] Nakagawa K., Soga K., Mitchell J. K. y Sadek S. *Soil Structure Changes During and After Consolidation as Indicated by Shear Wave Velocity and Electrical Conductivity Measurements*. *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Yoshicuri & Kusakabe (eds), Balkema, Rotterdam, 1995.

Ref [8] Shibuya Satoru. *Assessing Structure of Aged Natural Sedimentary Clays*. *Japanese Geotechnical Society*, Vol. 40, N° 3, pp. 1-16, 2000.

[9] Mitchell J. K. *Fundamental Aspects of Thixotropy in Soils*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 86, SM 3, pp. 19 – 52, 1960.

[10] Osipov V. I., Nikolaeva S. K., Sokolov V. N. *Microstructural Changes Associated With Thixotropic Phenomena in Clay Soils*. *Geotechnique* Vol 34, No. 2, pp. 293 – 303, 1984.

[11] ASTM C 618-78. *Specification for fly ash and Raw or Calcium Natural Pozzolona for use as a material admixture in Portland Cement Concrete*. American Standard for Testing Materials. 1978.

- [12] Quintana Crespo Enrique. Relación entre las Propiedades Geotécnicas y los Componentes Puzolánicos de los Sedimentos Pampeanos. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2005.
- [13] Metha, P. K. *Pozzolanic and Cementitious By-Products in Concrete - Another Look*. In Proceedings of the Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Trondheim, Norway. Vol. 1. pp. 1-43. V.M. Malhotra (Ed.). Ameritan Concrete Institute, Detroit, 1989.
- [14] Lorenzo García M. Paz. *Influencia de dos tipos de Cenizas Volantes Españolas en la Microestructura y Durabilidad de la Pasta de Cemento Portland Hidratado*. Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 1993.
- [15] Caputo D., Liguori B., Colella C. *Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure*. Cement and Concrete Composites 30, pp. 455-462, 2008.
- [16] Largent R. *Estimation de l'activité pouzzolanique . Recherche d'un essai*. Bull Liasion Labo. Pont et Chaussées N° 93, 1978.
- [17] Santamarina J. C., Klein K. A., Wang Y. H., Prencke E. *Specific Surface: determination and relevance*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, pp. 233-241, 2002.
- [18] Luxán M., Madruga F., Saavedra J. *Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurements*. Cement and Concrete Research, Vol. 19, pp. 63-69, Pergamon Press, 1989.
- [19] McCarter W., Tran D. *Monitoring Pozzolanic Activity by Direct Activation with Calcium Hydroxide*. Construction and Building Materials, Vol.10, N° 3, pp. 179-184, Elsevier Science, Great Britain, 1996.
- [20] Remzi Oguz Deniz. *Bender elements and Bending Disks for Measurement of Shear and Compressional Wave Velocities in Large Sand Specimens*. Tesis de Maestría, Northeastern University, Boston Massachusetts, 2008.
- [21] Claria J. J. *Caracterización y Comportamiento del Módulo de Elasticidad Dinámico de Loess en Estado Natural y Compactado*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2003.
- [22] Lee Jong-Sub, Santamarina J. Carlos. *Bender Elements: Performance and Signal Interpretation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 9, September 1, 2005 © ASCE.