

Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos

Rosa H. Llique Mondragón¹, Ana M. Guerrero Padilla²

¹Docente de la Universidad Nacional de Cajamarca; rosallique@hotmail.com

²Docente Principal de la Universidad Nacional de Trujillo, Docente de la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Trujillo, marleguerrero@hotmail.com

Recibido: 16.05.2014

Aceptado: 13.11.2014

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito determinar la influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos. En el estudio se utilizó muestras de suelo arcilloso de alta plasticidad y suelo arcilloso de baja plasticidad, se realizaron ensayos generales de granulometría y plasticidad para clasificar al suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, se efectuó el ensayo especial de compactación Proctor modificado para obtener la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad; para el ensayo especial de hinchamiento las muestras se compactaron con contenido de humedad óptimo, menores al óptimo en 1%, 2% y 3% y mayores al óptimo en 1%, 2% y 3%, las muestras fueron sumergidas en agua durante 96 horas y se registró las lecturas de tiempo versus hinchamiento. Los resultados experimentales muestran la variación de la expansión del suelo arcilloso de alta plasticidad CH, desde 0,25% hasta 5,52% y del suelo arcilloso de baja plasticidad CL desde 0,68% hasta 5,02%. Con el análisis estadístico se obtuvo los modelos de regresión polinomial, los coeficientes determinísticos que indican que las variables de humedad de compactación y tiempo explican el 98 % la expansión de los suelos arcillosos CH y CL, y el 2% pertenece a otras variables o al error aleatorio. Los modelos matemáticos obtenidos establecen las relaciones causa efecto entre las variables humedad de compactación y expansión, los mayores valores de expansión se obtuvieron para los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y baja plasticidad CL compactados con humedades menores a la humedad óptima.

Palabras clave: humedad de compactación, comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos.

ABSTRACT

The present research has as objective the determination of the influence of compaction moisture in the volumetric behavior of clay soils. The study used samples of high plasticity clay soil and low plasticity clay soil, granulometry and plasticity tests were performed in order to classify the soil by the Unified Soil Classification System, the special Proctor compaction test was effected to obtain maximum dry density and the optimum moisture content, for the special swelling test the specimens were compacted with optimum moisture content, less than optimum 1%, 2% and 3 %, and greater than the optimum 1% , 2% and 3 %, the samples were immersed in water for 96 hours and swelling versus time readings were recorded. The experimental results show the variation of the expansion of high plasticity clay soil CH, from 0,25 % to 5,52% and low plasticity clay soil from 0,68 % to 5,02 %. With the statistical analysis, polynomial regression models were obtained, the deterministic coefficients indicate that compaction moisture and time variables explain the 98% of the expansion of clay soils CH and CL, and 2% belong to other variables or random error. The obtained mathematical models establish cause and effect relationship between the variables: moisture compaction and expansion, expansion higher values were obtained for clay soils of high and low plasticity compacted with lower humidities than at optimum moisture.

Keywords: compaction moisture, volumetric behavior of clay soils.

I. INTRODUCCIÓN

La compactación se emplea en los suelos utilizados como material de construcción o como material de fundación para proporcionarle propiedades adecuadas. Las subrasantes de suelos arcillosos de las vías terrestres se compactan para obtener mayor resistencia a la compresión y al cortante de esta capa y en los núcleos de las presas de tierra, en los canales no revestidos, en los microreservorios, se utiliza suelos arcillosos compactados para disminuir la infiltración. La detección de fallas en los pavimentos, la excesiva infiltración del agua en los canales y en los micro reservorios conlleva a la necesidad de profundizar en el conocimiento del comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos cuando se producen variaciones en el contenido de humedad de compactación, con la finalidad de obtener información y establecer criterios para diseño y construcción de las obras de tierra, que determinen sistemas eficaces para su operación.

La compactación del suelo es el procedimiento a través del cual se aplica energía mecánica necesaria y se agrega contenido de humedad adecuado a la masa del suelo para reducir el volumen de vacíos expulsando el aire que ocupa los poros, y por ende el volumen total del mismo, aumentando así su densidad con el objetivo de mejorar las propiedades del suelo. Según Das (2002:51,52) cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, ésta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre si y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua. Cuando el contenido de agua es gradualmente incrementado y se usa el mismo esfuerzo compactador para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario crece en forma gradual, más allá de un cierto contenido de agua, cualquier incremento en el contenido de agua tiende a reducir el peso específico seco debido que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas. El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptima

El suelo involucrado en el proceso de compactación, es suelo no saturado denominado también parcialmente saturado, el cual es un sistema trifásico donde coexisten tres fases, sólida constituida por las partículas minerales, líquida por el agua y gaseosa por el aire. Barrera, et al., (2004:1) indican que los suelos compactados son suelos no saturados artificiales, por lo tanto se pueden estudiar, como suelos parcialmente saturados y aplicarles los conocimientos que de estos suelos se tienen. Alfaro (2008:471) sostiene que los conceptos de mecánica de suelos clásica han sido desarrollados, en su mayoría considerando suelo saturado debido probablemente a factores como: casi o total saturación de los suelos en los países donde esas teorías fueron concebidas (climas templados y fríos del hemisferio Norte), porque la saturación constituye la situación crítica para una diversidad de obras o debido a la simplificación de los modelos para explicar el comportamiento de esos sistemas bifásicos (partículas minerales y agua completamente ocupada en los vacíos del suelo).

Barrera, et al., (2004:17) consideran que el conocimiento de las propiedades mecánicas de los suelos compactados y de las condiciones de trabajo de los mismos para la construcción de las estructuras de tierra son indispensables para dimensionarlas y asegurar su estabilidad. Por esta razón se han desarrollado procedimientos y técnicas experimentales de laboratorio in situ que han tratado de reproducir los procesos de compactación reales. El objetivo básico de la compactación de un suelo es la obtención de un nuevo material (suelo compactado) que tenga un comportamiento adecuado para su aplicación específica. En el proceso de compactación de suelos influye la humedad de compactación, tipo de suelo, método de compactación que depende de la granulometría, volumen de suelo compactado, energía de compactación que está en función de número de golpes por capa compactada, número de capas de suelo, peso del martillo, altura de caída del martillo, Buenfil (2007:1) sostiene que para una energía dada, el resultado del proceso de compactación se refleja en la llamada curva de compactación representada en el plano densidad seca (γ_d) – humedad (w). Esta curva muestra un máximo absoluto asociado a una humedad óptima que algunas veces está acompañado de otro secundario de menor valor. La sección de la curva que presenta menores contenidos de agua que el contenido óptimo se denomina “lado seco” y la que presenta mayores valores “lado húmedo”. Pérez (2007: 3) indica que el plano (densidad seca, γ_d ; humedad, w) elegido por Proctor para representar los estados de compactación de un suelo permanece como plano de referencia para abordar el estudio de la compactación.

El contenido de humedad es importante en la compactación, ya que depende de la cantidad de agua en la masa del suelo para que las partículas y grupo de partículas minerales puedan reordenarse bajo una determinada energía de compactación, además condiciona las propiedades del suelo, Aiassa (2008: 89, 304) indica que la humedad de compactación (W_c) tiene un efecto dominante en muchas propiedades de los suelos compactados. La humedad óptima de compactación (W_{op}) provee una útil división en el comportamiento ingenieril de los suelos compactados. La división en la curva de compactación en rama seca y húmeda, para humedades de compactación inferior y superior a la humedad óptima, se corresponde con dos condiciones diferentes del suelo compactado, así mismo concluye que la humedad de compactación afecta considerablemente la infiltración en el suelo, los mayores valores de infiltración y permeabilidad se obtienen para el suelo compactado en rama seca, los menores para el suelo compactado en rama húmeda, y el suelo compactado con humedad óptima presenta un comportamiento intermedio.

Según Barrera, *et al.* (2004:18) el parámetro fundamental que gobierna la respuesta del suelo cuando se compacta es el contenido de agua de compactación (w). Un contenido de agua alto (grado de saturación creciente) implica que los poros contienen bastante agua como para que la deformabilidad no drenada del suelo sea baja, puesto que en este caso las presiones aplicadas son soportadas principalmente por la mezcla aire-agua. El fenómeno de la compactación es casi instantáneo y que todos los procesos de deformación que se desarrollan son no drenados. En el límite, cuando el suelo está completamente saturado las deformaciones volumétricas son nulas. Una humedad baja (grado de saturación decreciente) implica que en los poros hay poca agua y la succión que se desarrolla hace que el suelo sea poco deformable ya que rigidiza el esqueleto sólido, el cual, básicamente soporta las acciones externas. En las curvas de compactación en el plano Próctor, se obtiene, como consecuencia de lo anterior, un óptimo en el que es máxima la deformabilidad del suelo. Barrera y Garnica (2002:8) consideran que los fenómenos más característicos del comportamiento del suelo no saturado son los relacionados con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser positivas (colapso) o negativas (expansión). El grado de saturación del suelo compactado está en función del contenido de humedad, es la relación entre el volumen del agua y el volumen de vacíos contenidos en la masa del suelo.

Buenfil (2007:3) afirma que los suelos compactados del lado seco del óptimo muestran una fábrica abierta con una doble porosidad formada por agregados de partículas y unos interporos (poros entre agregados) que son apreciablemente mayores que los intraporos (poros dentro de los agregados). Por otra parte, los suelos compactados del lado húmedo tienen una fábrica más homogénea de tipo matricial sin evidencia de poros grandes, e indica que en general, todos los suelos no saturados, si se les agrega agua, sin modificar las cargas aplicadas, pueden presentar un cambio de volumen ya sea aumento (hinchamiento) o reducción (colapso). Varios investigadores concluyen que la fábrica de los suelos compactados está condicionada por factores tales como la humedad y la energía de compactación, debido que la fábrica es el arreglo de partículas o grupo de partículas y espacios de poros en la masa de suelo.

Según la Comisión Nacional del Agua de México (2007:10,34) los suelos expansivos son arcillas plásticas que por su alto contenido de minerales arcillosos, tales como montmorilonita y esmectita, experimentan grandes cambios de volumen al modificar su humedad; dichos suelos están caracterizados por un comportamiento cíclico de expansión y contracción al incrementar y reducir su contenido de agua, respectivamente. De modo que todos los suelos cohesivos se expanden o contraen con el cambio de humedad. Aunque es fácil visualizar el fenómeno de expansión en un suelo, su cuantificación no es tan directa. Existen numerosos factores que intervienen en el problema: condiciones iniciales del suelo incluyendo su densidad, humedad y estado de esfuerzo, el cambio de humedad y las condiciones de esfuerzos finales. En general, la expansión se estima con base en los resultados de las pruebas de laboratorio, mismos que deben interpretarse adecuadamente para poder tomar en cuenta los efectos producidos por el muestreo.

Los cambios volumétricos en los suelos compactados han ocasionado fallas en las obras de ingeniería civil, este comportamiento ha sido estudiado por algunos autores, pero es necesario continuar con la sistematización de la información para poder predecir el comportamiento volumétrico en determinadas circunstancias y realizar diseños de las obras en las cuales interviene, garantizando la

estabilidad y la vida útil, según Rico y Del Castillo (1992:78) no es fácil generalizar si el comportamiento de un suelo compactado en la rama seca es mejor o peor que el del mismo compactado en la rama húmeda. Ello depende de las características que se desee que el suelo adquiera. El suelo compactado del lado seco será menos compresible al final de la compactación y más expansivo si llega a absorber agua; obviamente, será también más rígido. Al compactar el suelo en la rama húmeda se obtendrá un material más compresible, menos expansivo y menos susceptible al agrietamiento. Buenfil (2007:2) afirma que en los últimos años se han reportado un gran número de trabajos de investigación cuyos objetivos son principalmente aportar un mejor conocimiento de los suelos compactados con base a modelos de comportamiento. Estos modelos de comportamiento permiten establecer patrones consistentes en el comportamiento de los suelos compactados, integrar resultados experimentales dentro de un esquema ordenado e identificar con mayor facilidad las tendencias existentes. Asimismo, los trabajos experimentales proporcionan la información requerida para crear, mejorar o validar modelos de comportamiento del suelo. Pérez (2007: 20) indica que una primera aproximación al comportamiento volumétrico de terraplenes es estudiar el efecto del incremento de humedad sobre suelos compactados.

El suelo arcilloso compactado utilizado como material de construcción, ha dado lugar a diversas investigaciones destinadas a caracterizar su comportamiento. En particular, interesa el comportamiento volumétrico de este material compactado a diferentes contenidos de humedad, con la finalidad de establecer criterios constructivos. Los resultados obtenidos en investigaciones realizadas en diferentes regiones, sirven de antecedente para los estudios locales porque debido a las características particulares que presentan los suelos en cada territorio, estos no pueden trasladarse de manera directa, por lo que el objetivo de la presente investigación fue evaluar la influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Objeto de estudio

El objeto de estudio fue el suelo arcilloso compactado con contenidos de humedad mayores, menores e igual al contenido óptimo de humedad.

La población estuvo conformada por suelos arcillosos de alta plasticidad y suelos arcillosos de baja plasticidad de la localidad de Lucmacucho distrito, provincia y departamento de Cajamarca.

La muestra estuvo constituida por:

- a) Siete porciones representativas de suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) de las cuales una se compactó con el óptimo contenido de humedad, tres con contenidos de humedad mayores al óptimo y tres con contenidos de humedad menores al óptimo.
- b) Siete porciones representativas de muestras suelo arcilloso de baja plasticidad (CL) de las cuales una se compactó con el óptimo contenido de humedad, tres con contenidos de humedad mayores al óptimo y tres con contenidos de humedad menores al óptimo.

2.2 Medios

Los datos se obtuvieron realizando ensayos generales y especiales en laboratorio de mecánica de suelos utilizándose los siguientes equipos:

- a) Para ensayos generales
 - Equipo de granulometría: juego de tamices 1 /4", n° 4, n° 10, n°20, n°40, n°60, n°100, n°200
 - Equipo de límite líquido: copa de Casagrande, ranurador, espátula, cápsula de porcelana
 - Equipo de límite plástico: placa de límite plástico, cápsula de porcelana
- b) Para ensayos especiales:
 - Equipo de compactación Próctor modificado: molde cilíndrico con placa de base y collarín de extensión, barra de acero y martillo de 4,5 kg de peso.

- Equipo de CBR para expansión: molde CBR con placa de base perforada y collarín de extensión, disco espaciador, placa de aumento de volumen, trípode, pesas de sobrecarga, martillo de 4,5 kg de peso y cuadrante indicador.
- c) Para mezclado, pesado y secado de muestras
 - Bandeja de mezclado y cucharón de fondo redondo
 - Probeta de plástico de 1000 ml
 - Balanza electrónica de 30 kg de capacidad y 0,1 de legibilidad
 - Balanza electrónica de 2 100 g de capacidad y 0,01 de legibilidad
 - Horno de laboratorio controlado termostáticamente a 110 ° C de temperatura.

2.2. Métodos y técnicas

Se excavaron calcatas de 2 m de profundidad y se obtuvo muestras representativas de suelo arcilloso en estado suelto, cada una se colocó en bolsas plásticas y se identificó para trasladar al laboratorio (NTP 339.151, ASTM D4220) donde se realizó los ensayos generales para determinar las propiedades físicas y clasificar el suelo; y los especiales para determinar la expansión del suelo.

Se realizaron los ensayos generales: análisis granulométrico por lavado (NPT 339.128, ASTM D422) y sedimentación con densímetro; límite líquido y límite plástico (NTP 339.129, ASTM D4328) Con los resultados y utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se clasificó a los suelos arcillosos de alta y de baja plasticidad (NTP 339.134, ASTM D 2487)

Se realizaron los ensayos especiales de compactación Proctor modificado método A (NTP 339.141, ASTM D-1557) y expansión volumétrica (hinchamiento) a partir de incremento de volumen de un espécimen compactado y sumergido en agua (ASTM D1883- prueba de hinchamiento para CBR). Con el ensayo de compactación se determinó el contenido óptimo de humedad (Wop) y el peso máximo de suelo por unidad de volumen (Dsmax).

Para el ensayo de hinchamiento las muestras se compactaron con contenidos de humedad menores al óptimo en 1%, 2% y 3%, y mayores que el óptimo en 1%, 2% y 3%, también se compactó con contenido óptimo de humedad, las muestras fueron sumergidas durante 96 horas y se registró las lecturas de tiempo versus hinchamiento, con lo cual se determinó la expansión del suelo.

Para el análisis estadístico de la expansión del suelo arcilloso de alta plasticidad CH y del suelo arcilloso de baja plasticidad CL se utilizó el software estadístico Minitab 15 y se obtuvo los modelos de regresión polinomial con las variables: expansión del suelo Dh, humedad de compactación W, tiempo de expansión T, expansión anterior def -1, los cuales fueron sometidos a la prueba de validez y se determinó el coeficiente de determinación; al análisis de varianza y la prueba de confiabilidad determinándose el nivel de significación.

Con el software de aplicación Excel se obtuvo los modelos matemáticos de la expansión del suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) y del suelo arcilloso de baja plasticidad (CL), estableciendo las relaciones entre las variables contenido de humedad de compactación y expansión de los suelos.

III. RESULTADOS

Los suelos estudiados se clasifican como arcilla de alta plasticidad CH y arcilla de baja plasticidad CL, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Tabla 1)

Tabla 1. Clasificación de los suelos según SUCS

Muestra	% pasa malla N° 200	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice plástico (%)	Clasificación SUCS
M1	85,33	52,00	26,00	26,00	CH
M2	94,90	38,00	22,00	16,00	CL

Con el ensayo de compactación Proctor modificado se determinó que el suelo CH presenta 22,5 % de contenido óptimo de humedad y 1,62 g/cm³ de densidad seca máxima; el suelo CL presenta 14,0 % de contenido óptimo de humedad y 1,86 g/cm³ de densidad seca máxima (Tabla 2 y Fig. 1).

Tabla 2. Parámetros de compactación de las muestras de los suelos CH y CL

Muestra suelo	Wop (%)	Ds max (g/cm ³)
M1 (CH)	22,5	1,62
M2 (CL)	14,0	1,86

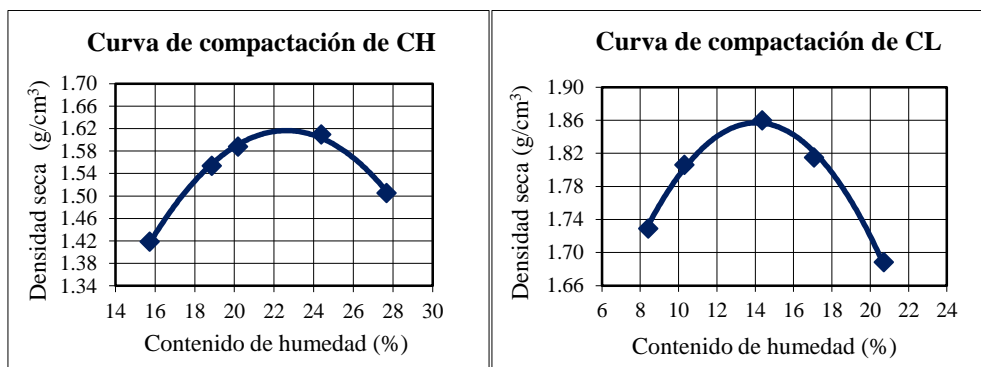


Fig. 1. Curvas de compactación de las muestras M1 (CH) y M2 (CL)

Tabla 3. Expansión de las muestras M1(CH) compactadas con humedad óptima y mayor a la óptima

Descripción	Wop	1 % mayor al Wop	2 % mayor al Wop	3 % mayor al Wop
W (%)	22,5	23,5	24,5	25,5
Expansión (mm)	2,546	1,365	0,305	0,292

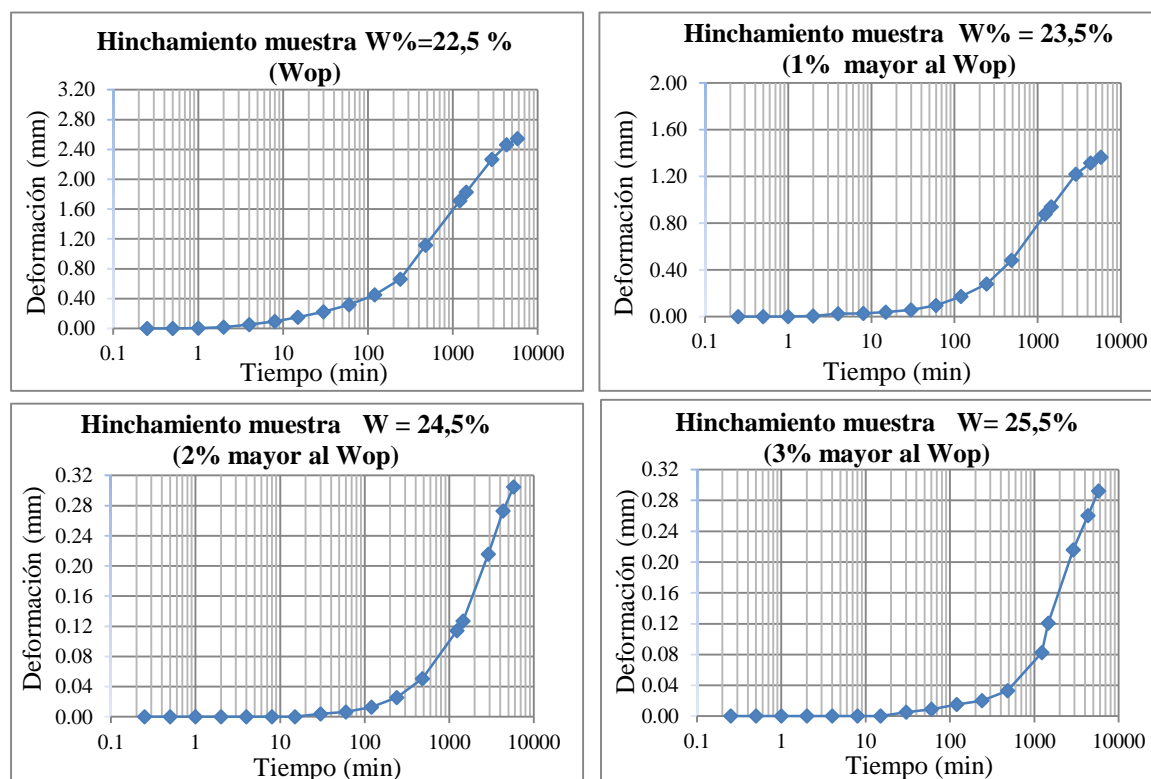


Fig. 2. Curvas de expansión muestras M1 (CH) compactadas con humedad óptima y mayor a la óptima.

Mediante el ensayo de hinchamiento de suelo arcilloso CH compactado se observa, que la muestra compactada con humedad óptima se hinchó 2,546 mm, las muestras compactadas con 1%, 2% y 3% de humedad mayor a la óptima el hinchamiento fue menor (Tabla 3 y Fig. 2), En la Tabla 4 y Fig. 3 se observa que las muestras compactadas con 1%, 2% y 3% de humedad menor a la óptima el hinchamiento fue mayor.

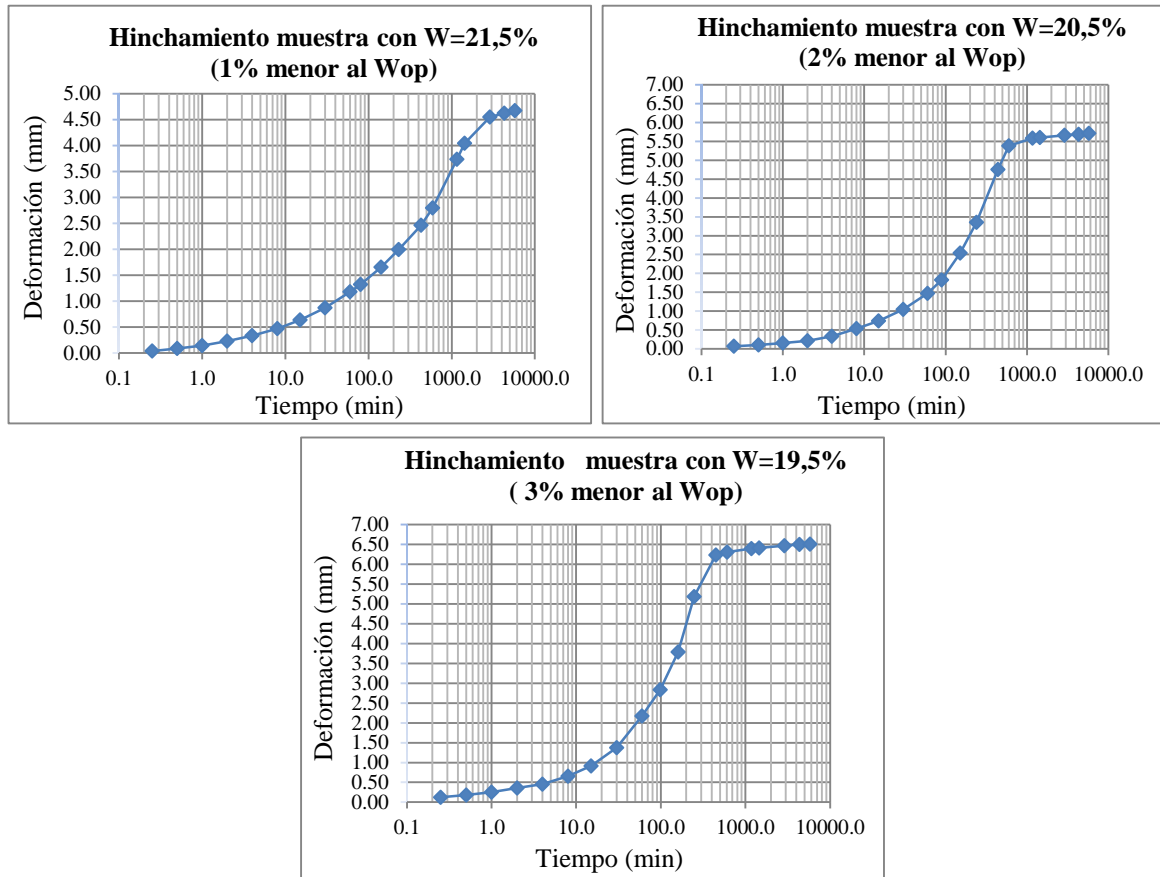


Fig. 3. Curvas de hinchamiento muestras M1 (CH) compactadas con humedad menor a la óptima

Tabla 4. Expansión de las muestras M1 (CH) compactadas con humedad menor a la óptima

Descripción	1 % menor al Wop	2 % menor al Wop	3 % menor al Wop
W (%)	21,5	20,5	19,5
Expansión (mm)	4,674	5,715	6,508

Con el ensayo de hinchamiento de suelo arcilloso CL compactado, la muestra compactada con humedad óptima se hinchó 4,083 mm, las muestras compactadas con 1%, 2% y 3% de humedad mayor a la óptima el hinchamiento fue menor (Tabla 5 y Fig.4), según la Tabla 6 y Fig. 5 las muestras compactadas con 1%, 2% y 3% de humedad menor a la óptima el hinchamiento fue mayor.

Tabla 5. Expansión de la muestra M2 (CL) compactada con humedad mayor a la óptima

Descripción	Wop	1 % mayor al Wop	2 % mayor al Wop	3 % mayor al Wop
W (%)	14	15	16	17
Expansión (mm)	4,083	1,476	1,016	0,800

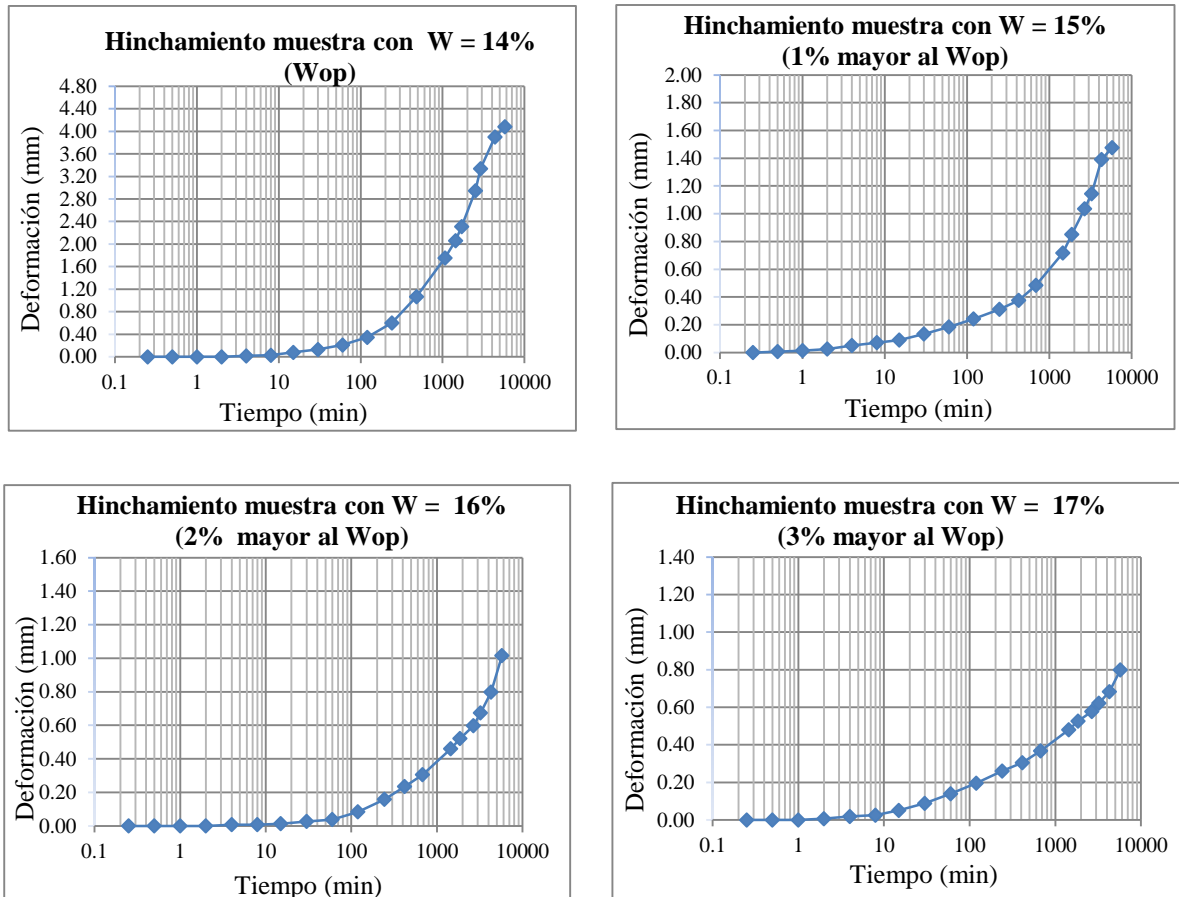


Fig. 4. Curvas de hinchamiento muestras M2 (CL) compactadas con humedad mayor a la óptima

Tabla 6. Expansión de la muestra M2 (CL) compactada con humedad menor a la óptima

Descripción	1 % menor al Wop	2 % menor al Wop	3 % menor al Wop
W (%)	13	12	11
Expansión (mm)	4,940	5,899	5,912

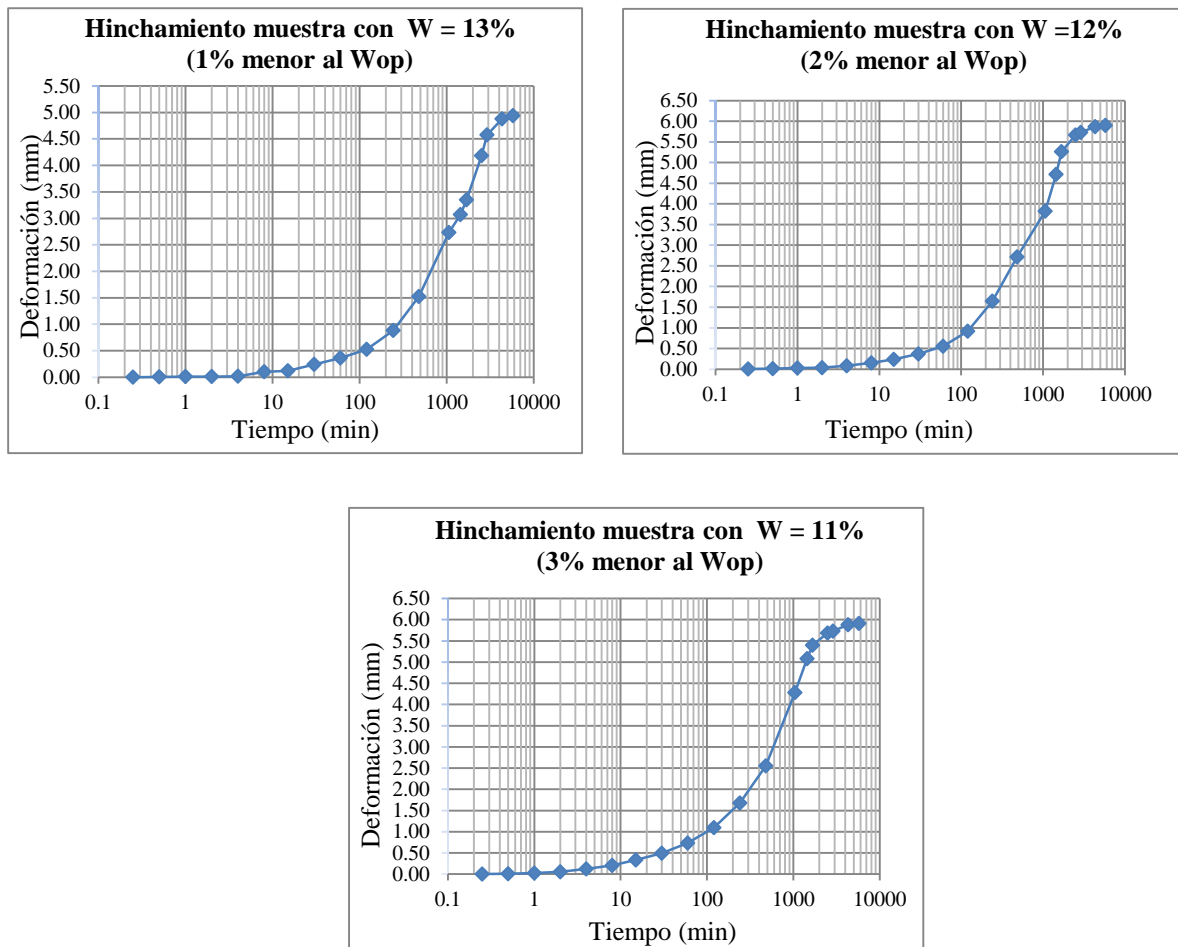


Fig. 5. Curvas de hinchamiento muestras M2 (CL) compactadas con humedad menor a la óptima

Mediante el análisis estadístico se obtuvo los modelos de regresión, los coeficientes de determinación y niveles de significación.

Tabla 7. Modelos de regresión polinomial de los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y baja plasticidad CL

Suelo	Modelo de regresión	R ² (%)	P (%)
CH	$Dh_{(CH)} = 10,2 - 92,1 W + 0,00922 T - 0,0397 W*T + 206 W*W + 0,00000023 T*T + 0,705 Def_1$	98,0	< 5,0
CL	$Dh_{(CL)} = 0,716 - 4,54 W + 0,000506 T + 0,000161 W*T + 0,0682 W*W - 0,000000 T*T + 0,262 Def_1$	98,0	< 5,0

Con los resultados experimentales de la expansión del suelo CH y del suelo CL se obtuvo las ecuaciones que constituyen los modelos matemáticos de la expansión de los suelos arcillosos compactados a humedades mayores, menores e iguales a la óptima (Tablas 8 y 9).

Tabla 8. Modelo matemático de la expansión del suelo arcilloso de alta plasticidad CH compactado con humedad menor, igual y mayor a la óptima.

Condición de humedad	Humedad (X) (%)	Expansión (Y) (mm)	Expansión (%)	Ecuación	r ² (%)
Inferior al óptimo	19,5	6,508	5,52	$Y = 0,337 X^2 + 12,725X + 114,76$	99,60
	20,5	5,715	4,85		
	21,5	4,674	3,97		
óptimo	22,5	2,546	2,16		
Superior al óptimo	23,5	1,365	1,16	$Y = 0,292 X^2 - 14,798X + 187,73$	98,75
	24,5	0,305	0,26		
	25,5	0,292	0,25		

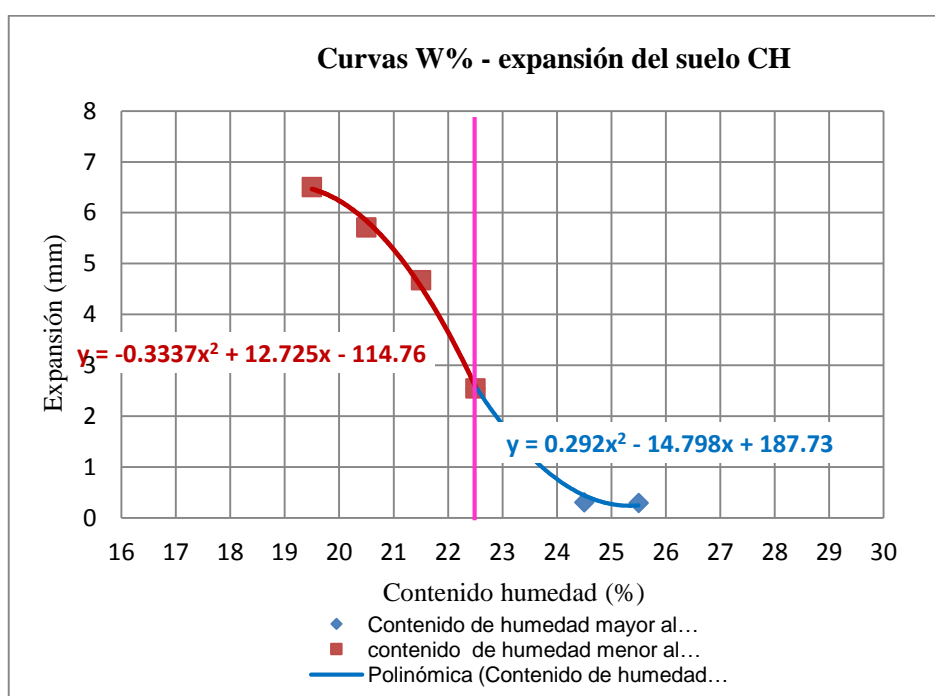


Fig. 6. Curvas de relación: humedad vs expansión de suelo de alta plasticidad CH compactado con contenido de humedad menor, igual y mayor al óptimo

Tabla 9. Modelo matemático de la expansión del suelo arcilloso de baja plasticidad CL compactado con humedad menor, igual y mayor a la óptima

Condición de humedad	Humedad (X) (%)	Expansión (Y) (mm)	Expansión (%)	Ecuación	r ² (%)
Inferior al óptimo	11,0	5,912	5,02	$Y = -0,211 X^2 + 4,6304X - 19,439$	97,62
	12,0	5,899	5,01		
	13,0	4,940	4,19		
óptimo	14,0	4,083	3,47		
Superior al óptimo	15,0	1,476	1,25	$Y = 0,5978 X^2 - 19,561X + 160,68$	97,38
	16,0	1,016	0,86		
	17,0	0,800	0,68		

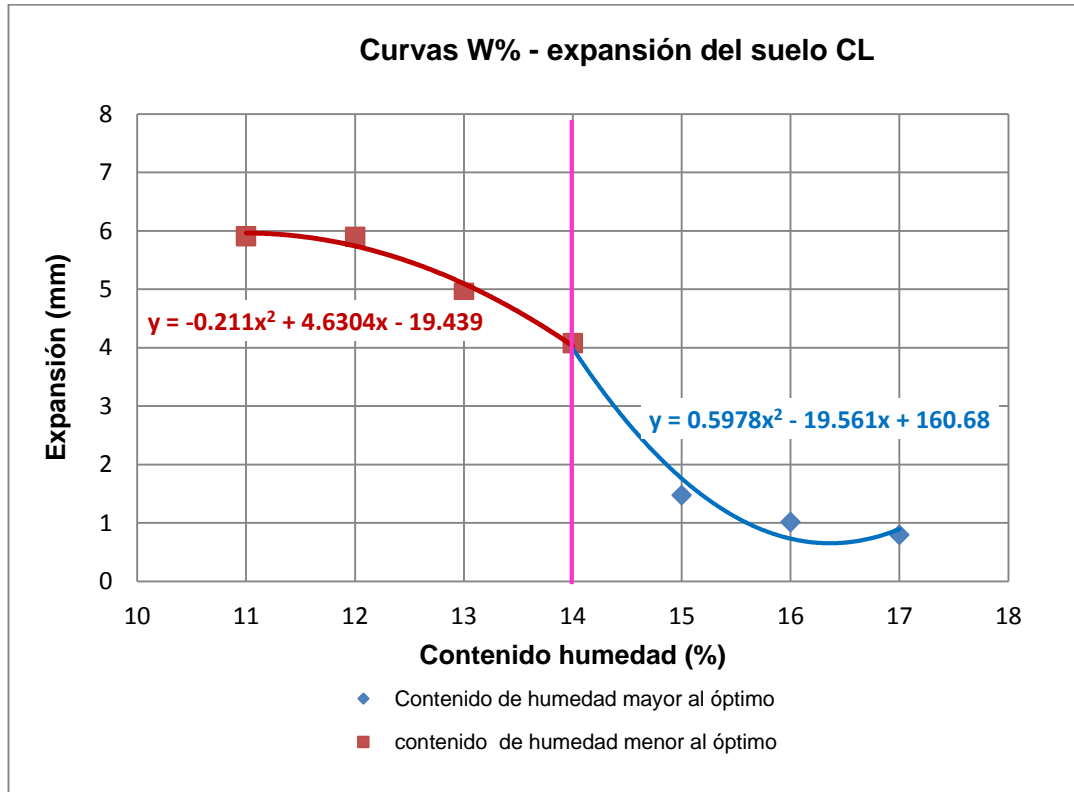


Fig. 7. Curvas de relación: humedad vs expansión de suelo de baja plasticidad CL compactado con contenido de humedad menor, igual y mayor al óptimo

IV. DISCUSIÓN

Con los resultados de la Tabla 1, y según los requisitos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el suelo de la muestra M1 se clasificó como arcilloso de alta plasticidad (CH), por la malla N°200 pasa más del 50 % de partículas y el límite líquido es mayor que 50 %; el suelo de la muestra M2 como arcilloso de baja plasticidad, por la malla N° 200 pasa más del 50 % de partículas y el límite líquido de menor de 50%.

Se estableció la correlación entre humedad y densidad seca del suelo compactado, obteniéndose la máxima densidad seca de 1,62 g/cm³ correspondiente al contenido óptimo de humedad de 22,5 % para el suelo arcilloso de alta plasticidad; y densidad seca máxima de 1,86 g/cm³ correspondiente al contenido óptimo de humedad de 14,0% para el suelo arcilloso de baja plasticidad (Tabla 2 y Fig. 1). En la rama seca el agua que se agrega al suelo desplaza el aire atrapado, actuando además como lubricante entre partículas sólidas, ocasionando mejor reacomodo de éstas que pasan a ocupar los vacíos que antes ocupaba el aire, incrementándose el peso específico de la masa del suelo y el peso específico seco, debido que el peso específico de sólidos de las partículas minerales es mayor al peso específico del agua. En la rama húmeda el agua que se agrega no puede desplazar más aire porque el suelo tiende a la condición saturada, y el espacio que ocupa impide que las partículas sólidas se unan y las desplaza, disminuyendo la fase sólida y como consecuencia el peso específico de la masa del suelo.

Con el análisis de la influencia del contenido de humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos de alta plasticidad y de baja plasticidad se determinó que a mayor humedad de compactación utilizando la misma energía, la expansión del suelo disminuyó cuando fue sumergido (Tabla 3 y Tabla 5, Fig. 2 y Fig. 4), similar a lo indicado por Rico y Del Castillo (1992), debido que en la rama húmeda si se incrementa la humedad de compactación el suelo tiende

a tener un grado de saturación de 100% porque los poros son ocupados por el agua que desplaza al aire entrampado entonces la infiltración en el suelo es menor como lo afirma Aiassa (2008).

De acuerdo a los resultados de la Tabla 4 y Tabla 6, Fig. 3 y Fig. 5 a menor humedad de compactación utilizando la misma energía, la expansión del suelo aumenta en contacto con agua, esto concuerda con lo indicado por Rico y Del Castillo (1992), debido que si la humedad de compactación es menor entonces los poros del suelo están ocupados por mayor cantidad de aire exponiéndose mayor área a la infiltración la cual aumenta, similar a lo encontrado por Aiassa (2008).

Según la Tabla 3, Tabla 5, Fig.2 y Fig.4 en el suelo arcilloso compactado con humedad óptima y mayor a la óptima la expansión del suelo empieza después de cierto tiempo, debido que el volumen de agua es mayor al volumen de aire lo que dificulta el ingreso del agua; y de acuerdo a la Tabla 4, Tabla 6, Fig. 3 y Fig. 5 el suelo compactado con humedad menor a la óptima la expansión empieza inmediatamente después de ser sumergido debido que el volumen de aire es mayor que el volumen de agua, lo que facilita la infiltración porque existe mayor porosidad.

En la Tabla 7, los resultados de los coeficientes determinísticos $R^2 = 98,0\%$ indican que las variables de humedad de compactación y tiempo explican el 98 % la expansión de los suelos arcillosos CH y CL, dejando solo un 2% a las demás variables o error aleatorio. Y los valores de P menores al 5% consideran que los modelos de regresión propuestos se aceptan con un nivel de significación de 5 %

La Fig. 6 y Fig.7 muestran la correlación entre las variables de humedad de compactación y expansión del suelo, en cada incremento de humedad de compactación, el volumen de la fase gaseosa disminuye entonces la expansión disminuye progresivamente porque existe menor área de porosidad.

V. CONCLUSIONES

- Los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y de baja plasticidad CL compactados con humedades menores a la humedad óptima (rama seca de la curva de compactación) presentaron mayor expansión que los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y de baja plasticidad CL compactados con humedades mayores a la humedad óptima (rama húmeda de la curva de compactación), porque el suelo con humedad menor a la óptima presenta mayor volumen de fase gaseosa y por ende mayor porcentaje de porosidad.
- La expansión de los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y de baja plasticidad CL compactados, se incrementa en el tiempo debido que la infiltración del agua depende de la relación de vacíos, esta disminuye en el proceso de compactación.
- Los modelos matemáticos de los suelos de alta plasticidad CH y de baja plasticidad CL compactados con humedades menores y mayores a la óptima establecieron las relaciones causa efecto entre las variables humedad de compactación y comportamiento volumétrico, a mayor humedad menor expansión porque el grado de saturación tiende a 100 % y la fase gaseosa tiende a eliminarse.

AGRADECIMIENTO

A LA ESCUELA DE POST GRADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO por permitirme realizar los estudios de doctorado y formarme como investigadora.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, por apoyarme con parte del financiamiento para realizar mis estudios de Doctorado.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIASSA, G. 2008. **Caracterización de procesos de infiltración en estado no saturado sobre suelos limosos compactados**. Tesis doctoral presentada en Córdoba- Argentina, 379 pág.
- ALFARO, M. 2008. **Geotecnia en Suelos no Saturados**. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 32(125): 471-481, 2008. ISSN 0370-3908. Colombia, 481 pág.
- BARRERA, M. Y P. GARNICA. 2002. **Introducción a la Mecánica de suelos no Saturados en Vías Terrestres**. Publicación Técnica No. 198 Sanfandila, Qro. México, 155 pág.
- BARRERA, M., P. GARNICA Y F. MARTÍNEZ. 2004. **Influencia de la Succión en los Cambios Volumétricos de un Suelo Compactado**. Instituto Mexicano del Transporte. México, 141 pág.
- BUENFIL, C. 2007. **Caracterización Experimental del Comportamiento Hidromecánico de una Arcilla Compactada**. Tesis Doctoral presentada en Barcelona. 475 pág.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA 2007. **Manual de Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento**. México, 189 pag.
- DAS, B. 2002. **Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica**. Thomson Learning. México, 594 pág.
- PÉREZ, E. 2007. **Suelos compactados en la teoría y en la práctica**. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779573409891/SuelosCompTeoPrat.pdf>, consultado el 20 de junio del 2012
- RICO, A. Y H. DEL CASTILLO. 1992. **Compactación de Suelos en Obras de Infraestructura de Transporte**. Documento Técnico No. 7. Sanfandila, Qro, México, 137 pág.