

*Determinación de la curva de retención sobre muestras
desestructuradas de la Formación Pampeano*

Nicolás Tasso y Osvaldo Ledesma

tassonicolasezequiel@gmail.com; Onledesma@gmail.com

Universidad de Buenos Aires, Facultad de ingeniería

Diego Manzanal

Diego.manzanal@gmail.com

Facultad de Ingeniería +, UNPSJB – UBA - CONICET

RESUMEN: El trabajo de investigación efectuado comprende la caracterización de la Formación Pampeano en condiciones de saturación parcial. El Pampeano presenta un grado de estructuración generado por ciclos de humidificación y secado con la precipitación de cementantes en sus contactos. El trabajo estudia las propiedades de retención de agua sobre muestras totalmente desestructuradas. Se realizaron ciclos de humidificación y secado con la técnica de papel de filtro controlando la variación volumétrica de las muestras. Se estableció la relación entre la variación de la relación de vacíos y la humedad gravimétrica para determinar la curva de contracción del material. Los resultados experimentales se calibraron con diferentes modelos de retención existentes en bibliografía. Distintos modelos de predicción de la curva de retención a partir de las propiedades índice del suelo, obtenidas de ensayos de rutina, fueron comparadas con la curva obtenida en forma experimental.

Palabras clave: SWRC – Pampeano – Succión – Contracción

ABSTRACT: This paper seeks to advance with the characterization of the Pampeano Formation in conditions of partial saturation. Pampeano soil has a degree of structuring generated by wetting & drying cycles with the precipitation of cement agent on its contacts. This work studies the properties of soil water retention curve on totally undisturbed samples. Wetting & drying cycles were performed with the filter paper method plus controlling the volumetric variation of the samples. The relation between void ratio and the gravimetric water content was established to determine the contraction curve of the material. The experimental results were calibrated with different models of soil water retention curves proposed by different authors. Different prediction models of the curve based on the soil index properties, obtained from routine tests, were compared with the curve obtained.

KEY WORDS: SWRC – Pampeano – Suction - Contraction

1 INTRODUCCIÓN

2.1 Suelos no saturados. Curvas de retención y contracción

La curva de retención brinda la relación entre el contenido de agua en un suelo, sea expresada en forma de humedad gravimétrica, volumétrica o grado de saturación y la succión del mismo. A partir de esta curva se pueden estimar distintas propiedades de los suelos parcialmente saturados. Ref. [1]

Un ejemplo típico se observa en la Fig.1. Existen tres aspectos principales que definen su forma:

- El valor de entrada de aire, el cual corresponde a aquel valor de succión en donde el suelo comienza a drenar libremente. Este valor está influenciado por la distribución de poros del suelo.
- El contenido de agua residual, cuyo valor corresponde a la cantidad de agua por la cual un incremento en la succión no genera una reducción significativa de la misma.
- La pendiente de la porción cuasi-recta de la curva, la cual representa el grado decrecimiento de la cantidad de agua de un suelo bajo un incremento de la succión. Ref. [2]

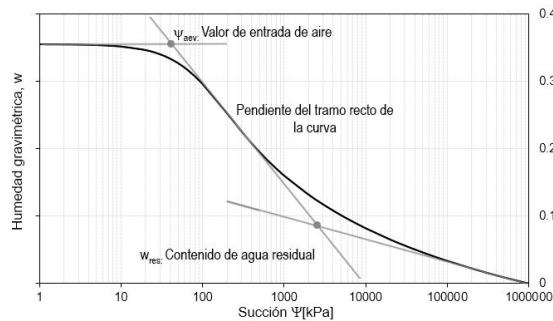


Figura 1. Curva de retención típica.

La curva de contracción vincula la relación de vacíos con la humedad gravimétrica. Un ejemplo típico es presentado en la Fig.2. En ella se esquematizan dos muestras que, para distintas relaciones de vacíos iniciales, son llevadas desde la saturación hasta su secado. El comportamiento durante el secado de una muestra saturada se compone de dos partes; la primera es una reducción de humedad sin cambio aparente en la relación de vacíos y la segunda es un comportamiento regido por la curva de contracción del material. Ref. [3].

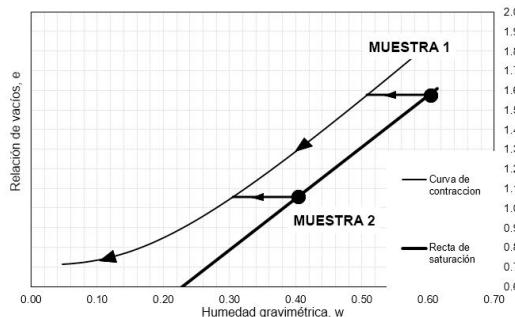


Figura 2. Curva de contracción típica.

En este artículo se indica cómo se ha determinado la curva de retención y de contracción de un suelo perteneciente a la Formación Pampeano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2 Formación Pampeano

Los suelos del centro de la ciudad de Buenos Aires (CABA) pertenecen a la denominada “Formación Pampeano”. Existe numerosa información y estudios relacionados con este tipo de suelos Ref. [6], [7] y [8]. Básicamente consiste en un loess depositado en el Pleistoceno, modificado posteriormente por acción del intemperismo. El Pampeano se compone de limos y arcillas preconsolidados por disecación y cementados con carbonato de calcio y óxido de magnesio. La variabilidad en la cementación es amplia y errática. La profundidad del estrato también presenta grandes variaciones, con un promedio estimado en 40 metros, alcanzando máximos de hasta 60 metros.

2.2 Material de estudio

Las muestras analizadas fueron extraídas en el norte de la CABA, barrio de Núñez. La profundidad de extracción se encuentra entre 5 y 10m (Pampeano superior). Las muestras poseen nódulos aislados dentro de una matriz no cementada. El tamaño de los nódulos es variado, y los más grandes llegan a rondar los 10mm. La Fig. 3 expone los nódulos presentes en las muestras. En la Tabla 1 se resumen algunas propiedades físicas de ellas.



Figura 3. Nódulos de las muestras extraídas de la Fm. Pampeano.

Tabla 1. Características principales de las muestras.

Característica	Valor
Límite líquido, w_L	35 %
Límite plástico, w_P	18 %
Índice de plasticidad, PI	17 %
Gravedad específica, G_s	2.62
Superficie específica	$43\text{m}^2/\text{g}$

2.3 Procedimiento del ensayo de contracción

Para la construcción de la curva de contracción o *Shrinkage Curve (SC)* se diseñó un método que permite medir el cambio de la relación de vacíos en función de la humedad gravimétrica. A continuación se describe el procedimiento de trabajo utilizado:

- Se tamiza el suelo por el tamiz #40 para eliminar todos los nódulos existentes.
- Se prepara el suelo con una humedad superior al w_L y se lo deja reposar 24 hs.
- Se coloca el suelo sobre un anillo previamente envaselado. Se vibra el recipiente para que se deposite correctamente el suelo y permita liberar las burbujas de aire ocluidas.
- Se coloca la muestra sobre una balanza durante todo el ensayo.

Se utilizan dos cámaras web para recolectar información cada 30 minutos. La toma de fotografías se realiza hasta que no exista una variación considerable en el peso o el diámetro. La Fig. 4 esquematiza la ubicación de las cámaras. Una vez llegado a este punto, se mide el peso seco M_D y el volumen final V_F .

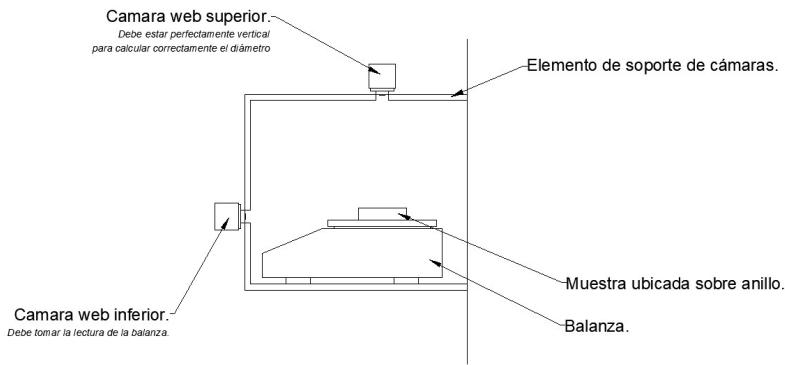


Figura 4. Disposición de los elementos en el ensayo de contracción.

La deformación volumétrica que experimenta el material ocurre en condiciones isotrópicas y puede expresarse en función de los diámetros tal como lo indica la ecuación (1).

$$\varepsilon_v = 3 \cdot \frac{D_{i+1} - D_i}{D_{i+1}} \quad (1)$$

La ecuación (2) expresa la relación de vacíos para la toma de datos del tiempo i en función de la relación de vacíos del tiempo subsecuente y la deformación volumétrica.

$$e_i = e_{i+1} + \varepsilon_v \cdot (1 + e_{i+1}) \quad (2)$$

Conociendo la relación de vacíos al final del ensayo y utilizando las expresiones (1) y (2) puede obtenerse la relación de vacíos para todas las tomas de datos. La ecuación (3) permite calcular el valor de la relación de vacíos final, siendo G_s la gravedad específica, ρ_w el peso específico del agua y M_T El peso del anillo en donde se encuentra ubicado el suelo.

$$e_{final} = \frac{G_s \cdot \rho_w \cdot V_F}{M_D - M_T} - 1 \quad (3)$$

La humedad gravimétrica para la toma de datos i puede expresarse en función de los pesos medidos, tal como lo indica la ecuación (4).

$$w_i = \frac{M_i - M_D}{M_D - M_T} \quad (4)$$

2.4 Procedimiento del ensayo de succión

Para la determinación de la curva de retención o *Soil Water Retention Curve (SWRC)*, el procedimiento consistió en obtener distintos valores de succión sobre las muestras en una etapa de secado y luego en una etapa de humidificación, para obtener así una curva de secado y una curva de humidificación respectivamente. Ref. [3].

Para la determinación de la succión en cada escalón de humedad se utilizó la técnica de papel de filtro (ASTM 5298), el cual es un método indirecto para medir la succión de un suelo. A continuación se describe el procedimiento de trabajo utilizado:

- Se tamiza el suelo por el tamiz #40.
- Se prepara el suelo con una humedad entre $1.0 w_L$ a $1.5 w_L$.
- Se ubica el suelo sobre un recipiente para moldear las muestras. El diámetro del recipiente debe ser un poco mayor que el diámetro del papel de filtro utilizado. El recipiente debe tener la particularidad de permitir el drenaje del agua por lo menos en una de sus caras.
- Se vibra el recipiente para permitir la liberación de las burbujas de aire ocluidas.
- Se aplica una carga vertical de 10kPa sobre la muestra hasta alcanzar un grado de consolidación que permita un adecuado manipuleo.

La Fig. 5 esquematiza el equipamiento utilizado. Posteriormente, la muestra se corta en dos mitades para así obtener dos pastillas con iguales características.

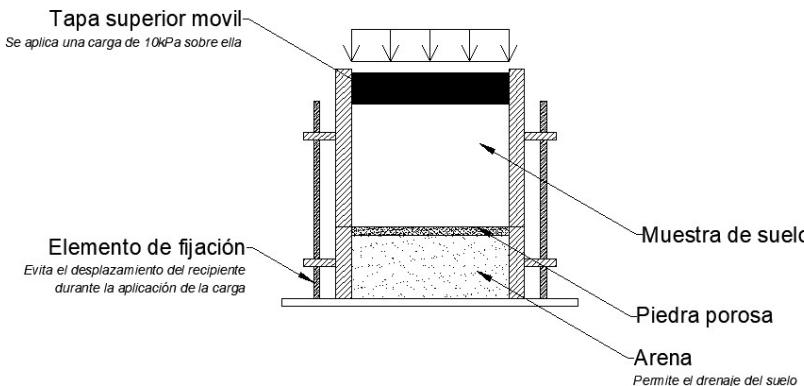


Figura 5. Esquema del procedimiento de preparación de las muestras.

El ciclo de secado consistió en dejar secar al aire las pastillas, evitando el contacto directo con el sol hasta obtener la humedad objetivo del escalón. Para el ciclo de humidificación, la humedad fue aumentada hasta el valor inicial incorporándole agua destilada con una jeringa sobre un papel de filtro. Durante los dos ciclos se realizaron distintas etapas de mediciones en donde se obtuvo el valor de la succión, el peso húmedo y su volumen. Ref. [4].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Curva de contracción

Se efectuaron dos ensayos mediante el procedimiento anteriormente descripto. La Fig. 6 muestra el estado inicial y final de una muestra. El cambio en la relación de vacíos se debe a la variación volumétrica observada.

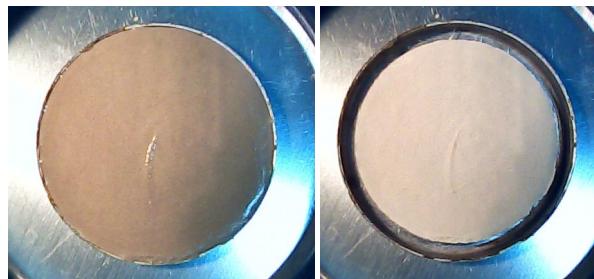


Figura 6. Fotografía inicial y final de la muestra del ensayo de contracción.

La Fig. 7 muestra los resultados experimentales y el ajuste analítico. El gráfico muestra adicionalmente la recta de saturación, que puede expresarse con la ecuación (5) y el límite de contracción, que se estima con la intersección de las tangentes extremas de la curva de contracción.

$$w_{sat}(e) = \frac{e}{G_s} \quad (5)$$

Las muestras de los ensayos parten de la recta de saturación con una humedad inicial de 60% y la reducen sin modificar prácticamente la relación de vacíos hasta la curva de saturación. Una vez alcanzada la curva de saturación, el fenómeno de secado sigue un comportamiento que puede ser modelado por la ecuación (6).

$$e(w) = a_{sh} \cdot \left[\frac{w^{c_{sh}}}{b_{sh}^{c_{sh}}} + 1 \right]^{\frac{1}{c_{sh}}} \quad (6)$$

Siendo a_{sh} , b_{sh} y c_{sh} parámetros de ajuste cuyos valores fueron 0.71, 2.69 y 0.24 respectivamente.

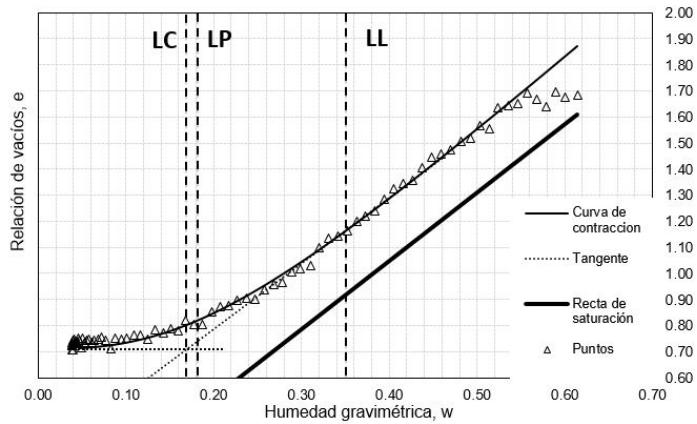


Figura 7. Gráfico de contracción.

3.2 Curva de retención

En la Fig. 8, se muestran los resultados obtenidos para tres muestras en ciclo de humidificación (puntos negros) y secado (puntos blancos). Se puede observar que los puntos experimentales obtenidos en el ciclo de secado se encuentran por encima del ciclo de humidificación.

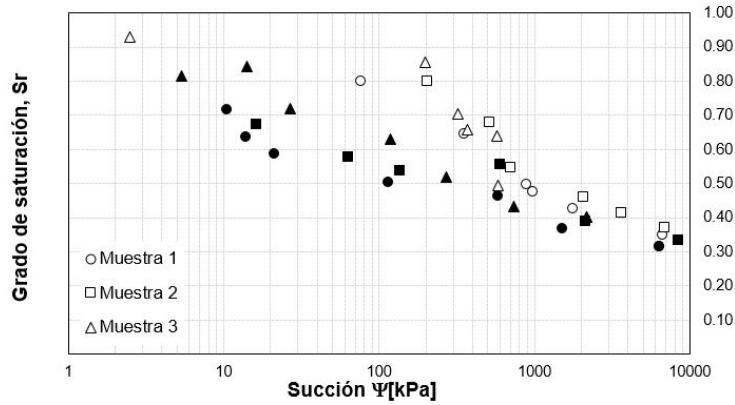


Figura 8. Valores de succión obtenidos mediante el método de papel de filtro.

3.2.1 Modelos de curvas de retención

La curva de retención fue modelada utilizando los valores de succión del ciclo de secado mediante distintas expresiones ofrecidas por distintos autores. La Fig. 9 muestra todos los modelos que fueron analizados. Ref. [10], [11], [12], [13] y [14]. Estos modelos trabajan con los parámetros de humedad volumétrica residual y de saturación, θ_r y θ_s . En general, se observa un correcto ajuste con todos los modelos.

Se pueden mencionar otros modelos predictivos de curvas de retención, como por ejemplo Saxton (1986) Ref. [15], Aubertin (2003) Ref. [16], Perera (2005) Ref. [17], Zapata (2000) Ref. [18] y Ghanbarian (2010) Ref. [19], los cuales se presentan en la Fig. 10.

Entre los distintos modelos predictivos, el que mejor ajusta es el de Zapata, el cual fue creado en base a la recolección de datos de 190 tipos de suelo Ref. [19]

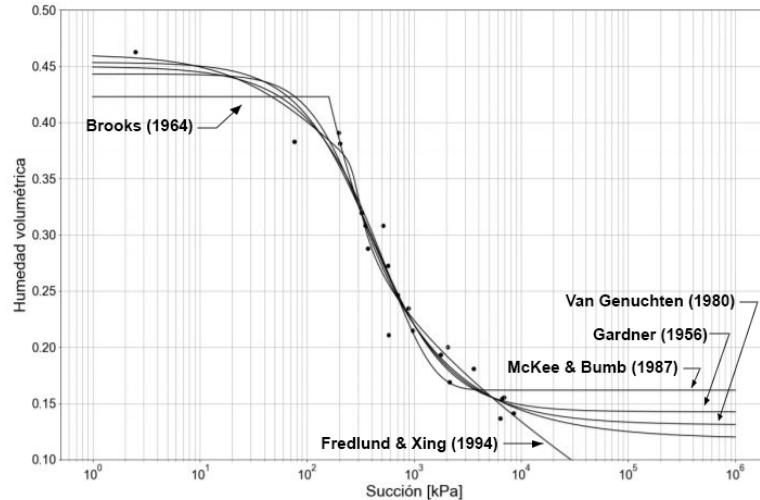


Figura 9. Modelos de curvas de retención a partir de humedad volumétrica residual y de saturación.

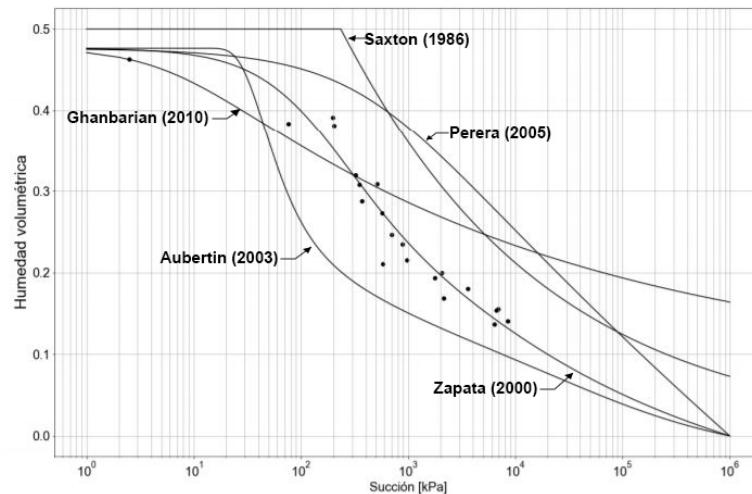


Figura 10. Modelos de predicción de la curva de retención a partir de distintas propiedades índice.

2.3.2 Curva de retención en función de otras variables

La curva de retención también puede expresarse en función de la humedad gravimétrica. La expresión de Fredlund & Xing puede modificarse para relacionar la humedad gravimétrica en función de la succión, la cual corresponde a la ecuación (7). La Fig. 11 representa la curva de retención en función de la humedad gravimétrica, en donde a_f , b_f y m_f son parámetros de ajuste y $C(\psi)$ un factor de corrección para valores de succión mayores a $10^6 kPa$.

$$w(\psi) = \frac{C(\psi) \cdot w_s}{\left[\ln \left[e^1 + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right]^{m_f}} \quad (7)$$

Otra forma de expresar la curva de retención es en función del grado de saturación. La relación entre el grado de saturación y la succión está dada por la ecuación (8). Utilizando las expresiones (6), (7) y (8) y realizando un nuevo ajuste de las variables a_f , b_f y m_f puede obtenerse el grado de saturación en función de la succión y se representa en la Fig. 12.

$$Sr(\psi) = \frac{G_s \cdot w(\psi)}{e(w(\psi))} \quad (8)$$

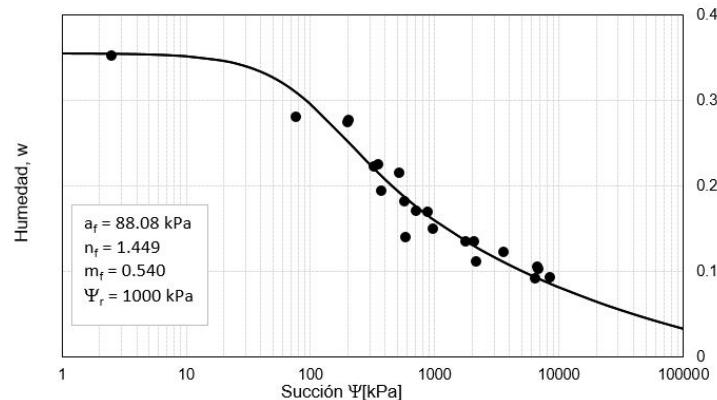


Figura 11. Curva de retención en función de la humedad gravimétrica.

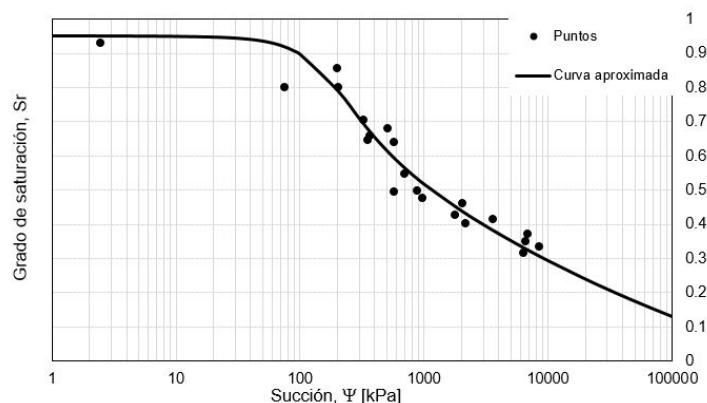


Figura 12. Curva de retención en función del grado de saturación.

Durante todo el ensayo de succión, se midió la altura y el diámetro de las muestras para calcular su volumen. Esto permitió observar la relación entre la humedad y la relación de vacíos y se detalla en la Fig. 13. Las muestras tienen el mismo comportamiento que las destinadas a obtener la curva de contracción, desplazándose quasi-horizontalmente desde la recta de saturación hasta la misma curva de contracción. Los puntos presentan una distorsión mayor debido a la dificultad en la medición del volumen, ya que durante el manipuleo de las mismas sufrieron una modificación de la forma cilíndrica inicial.

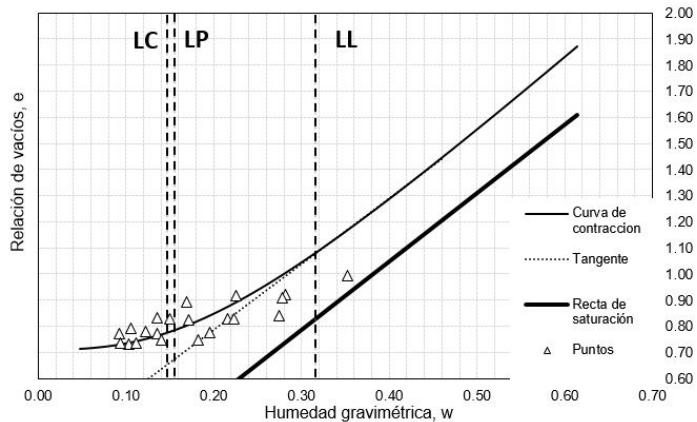


Figura 13. Relación de vacíos y humedad gravimétrica de las muestras de succión en cada escalón del ciclo de secado.

2.3.3 Ciclo de histéresis

En la Fig. 14 se muestra el ciclo de histéresis de la curva de retención obtenida experimentalmente. Se observa que los puntos de secado se encuentran por encima de los puntos de humedecimiento. Este fenómeno se debe a que el ángulo de avance entre el suelo y el menisco de agua es mayor que el ángulo de retroceso, conforme a la Ley de Jurin.

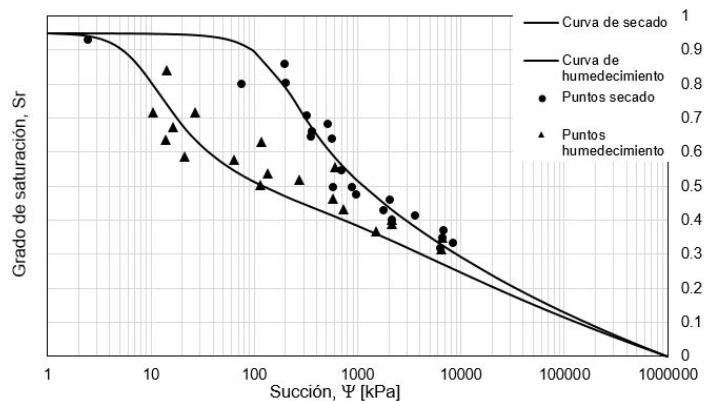


Figura 14. Curva de secado y curva de humidificación.

3. CONCLUSIONES

Se presentaron resultados obtenidos en forma experimental de curvas de retención y contracción sobre muestras desestructuradas de suelos de la Fm. Pampeano.

Los valores obtenidos en las curvas de succión presentaron pequeñas distorsiones. Esto muestra que, si bien el método de papel de filtro es un método sencillo y económico, comparado con otros más precisos no brinda resultados exactos. El modelo de predicción de curva de retención a partir de las propiedades índice también presenta dispersión de resultados.

La curva de contracción permite conocer el comportamiento frente al secado de un determinado suelo desde su saturación. Además es una función importante para determinar la curva de retención si el suelo presenta cambios importantes de volumen.

El fenómeno de histéresis fue comprobado experimentalmente en las pruebas de secado – humedecimiento.

4. REFERENCIAS

- [1] Zhou Jian, Yu Jian-lin (2004), *Influences affecting the soil-water characteristic curve*, Journal of Zhejiang University Science, Vol. 6, No. 8 p.797-804.
- [2] Ghada Ellithy (2017), *A spreadsheet for estimating Soil Water Characteristic Curve*, ERDC/GSL TN-17-1.
- [3] D. Fredlund (2017), *Role of the Soil-Water Characteristic Curve in Unsaturated Soil Mechanics*, Proceedings XIX ICSMGE, p.59-81.
- [4] J. A. Muñoz-Castelblanco, J. M. Pereira, P. Delage, Y. J. Cui (2012), *The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France*, Géotechnique Vol. 62, No. 2 p.95-106.
- [5] Mamert Mbonimpa, Bruno Bussiere, Robert P. Chapuis (2003), *A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties*, Canadian Geotechnical Journal Vol. 40, No. 6 p.1104-1122.
- [6] A. Bolognesi, O. Moretto (1957), *Properties and behaviour of silty soils originated from loess formations*, 4th ICSMFE, Vol. 1 p.9-12.
- [7] Eduardo Nuñez (1986), *Panel report: Geotechnical conditions in Buenos Aires City*, Proceedings V ICIAEG Vol. 4 p.2623-2630.
- [8] M. Codevilla, A. Sfriso (2011), *Actualización de la información geotécnica de los suelos de la ciudad de Buenos Aires*, Pan-Am CGS Geotechnical Conference.
- [9] J. Burland (1990), *On the compressibility and shear strength of natural clays*, Géotechnique Vol. 40, No.3, p.329-378.
- [10] R. van Genuchten (1978), *Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model*, Department of civil engineering Princeton University 78-WR-08.
- [11] R. Brooks, A. Corey (1964), *Hydraulic Properties of Porous Media*, Hidrology papers 3, Colorado State University, Fort Collins, p.27.
- [12] D. Fredlund, A. Xing (1994), *Equations for the soil-water characteristic curve*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No.3 p.521-532.
- [13] W. Gardner (1958), *Mathematics of isothermal Water condition in Unsaturated Soils*, Highway Research Board Special Report 40 International Symposium on Physico-Chemical Phenomenon in Soils. p.78-87.
- [14] C. McKee, A. Bumb (1984), *Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas*, SPE Formation Evaluaton, Vol.2, No.4 p.599-608.
- [15] K. Saxton (1986), *Estimating Generalized Soil-Water Characteristics from Texture*, Soil Science Society of America Journal, Vol. 50, No.4 p.1031-1036.

- [16] M. Aubertin (2003), *A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, No. 6 p.1104-1122.
- [17] Y. Perera, C. Zapata (2005), *Prediction of the soil-water characteristic curve based on grain-size-distribution and index properties*, ASCE Geotechnical Special Publication, 130-142 ed., p.49-60.
- [18] C. Zapata (2000), *Soil-Water Characteristic Curve Variability*, Geotechnical Special Publication, Vol. 287, No.99 p.84-124.
- [19] A. Ghanbarian (2010), *Estimation of the Van Genuchten soil water retention properties from soil textural data*, Soil Science Society of China. Vol.20, No. 4 p.456-465.