

# Asentamientos No Lineales En Suelos No Saturados En Cuba

## Non-linear Settlements in Unsaturated Soils in Cuba

### Autores

**Meily de la Cruz Díaz<sup>1</sup>, Gilberto Julio Quevedo Sotolongo<sup>2</sup>, Claudia María Rodríguez Rodríguez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ingeniera civil, Máster en Ciencias, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Carretera a Camajuaní Km. 5 y 1/2, Santa Clara, Villa Clara. Cuba. E-mail: [mdelacruz@uclv.cu](mailto:mdelacruz@uclv.cu)

<sup>2</sup> Ingeniero civil, Doctor en Ciencias. (Dr. Cs.), Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Carretera a Camajuaní Km. 5 y 1/2, Santa Clara, Villa Clara. Cuba. E-mail: [quevedo@uclv.edu.cu](mailto:quevedo@uclv.edu.cu)

<sup>3</sup> Ingeniera civil, Máster en Ciencias, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Carretera a Camajuaní Km. 5 y 1/2, Santa Clara, Villa Clara. Cuba. E-mail: [claudiamrr@uclv.cu](mailto:claudiamrr@uclv.cu)

### RESUMEN

Los suelos no saturados actualmente presentan un auge en su estudio, que se encuentra dado por el desarrollo de las técnicas de laboratorio, ya sea directas o indirectas; que permiten medir la succión como parámetro que modifica el estado tenso deformacional del suelo. En las condiciones cubanas la técnica indirecta del papel de filtro brinda resultados satisfactorios, pues dentro de los métodos empleados para medir la succión, es el único que mide la succión total y matricial del suelo, además constituye un aspecto clave para estudiar el comportamiento tenso deformacional de los suelos no saturados. En la presente investigación se emplean las propiedades físico mecánicas del suelo no saturado en el diseño geotécnico de una cimentación aislada con carga vertical centrada por el método de los estados límites; con la finalidad de lograr una disminución del área de la base de la cimentación, con respecto al suelo saturado. Por otra parte, a partir de realizar un ajuste al método analítico de Malishev y Nikitina para las características de los suelos no saturados, se determinarán los asentamientos no lineales.

**Palabras claves:** Asentamientos no lineales, método analítico de Malishev y Nikitina, suelos no saturados

### ABSTRACT

Unsaturated soils are currently experiencing a boom in their study, which is due to the development of laboratory techniques, whether direct or indirect; that allow measuring suction as a parameter that modifies the tense-deformational state of the soil. In Cuban conditions, the indirect filter paper technique provides satisfactory results, since among the methods used to measure suction, it is the only one that measures the total and matrix suction of the soil, and it is also a key aspect to study the deformational stress behavior. of unsaturated soils. In the present investigation, the physical-mechanical properties of unsaturated soil are used in the geotechnical design of an isolated foundation with vertical load centered by the limit state method; with the purpose of achieving a decrease in the area of the foundation base, with respect to the saturated soil. On the other hand, by making an adjustment to the analytical method of Malishev and Nikitina for the characteristics of unsaturated soils, non-linear settlements will be determined.

**Keywords:** Nonlinear settlements, analytical method of Malishev and Nikitina, unsaturated soils

Nota Editorial: Recibido: Julio 2024 Aceptado: Septiembre 2024

## 1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica de Suelos en sus inicios presentó un mayor desarrollo en el estudio de los suelos saturados, debido a limitaciones tecnológicas que existían en aquel momento para estimar o determinar la succión, como parámetro que modifica el estado tenso deformacional del suelo no saturado. Por su parte, la Mecánica de Suelos Saturados presenta evidentes dificultades a la hora de explicar las deformaciones en suelos no saturados o estructuras apoyadas sobre estos suelos (carreteras, terraplenes, cimentaciones, entre otros) sometidos a cargas de servicio o a estados tensionales totales presentes in situ [1]. Por este motivo, la investigación de los suelos no saturados está experimentando actualmente un importante crecimiento.

Teniendo en cuenta su origen los suelos no saturados pueden ser naturales o artificiales, dentro de los suelos artificiales se encuentran los suelos compactados, extensamente utilizados en obras de tierra (presas, terraplenes, etc.) [2]. Un suelo no saturado presenta la tendencia a recibir agua y aumentar su grado de saturación, cuando ocurre esto se requiere cierta fuerza para remover el agua del espacio poroso y disminuir el grado de saturación del suelo, estos efectos se pueden explicar mediante la succión, pues se refiere a la energía de absorción [3].

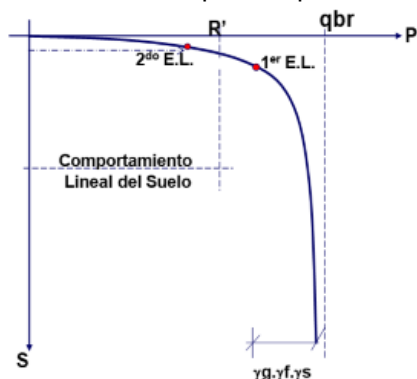
Entre los métodos de medición de succión, la técnica de papel filtro es la única donde la succión total y matricial puede inferirse. El contacto directo entre el papel y el suelo permite que el agua y materiales disueltos se intercambien libremente. La absorción del agua por parte del papel filtro por capilaridad, permite obtener la succión matricial a través de la humedad del papel. La medición de la succión total se realiza mediante la obtención de la humedad del papel que no está en contacto directo con el suelo, ocasionado por el flujo que ocurre en la transferencia de vapor incorporando las fuerzas osmóticas y capilares que retiene a la molécula de agua [4]. Como resultado del método se obtiene la curva característica de succión que representa la genuina expresión de la relación que existe entre el grado de saturación y la succión en el suelo, directamente asociada con su granulometría y estructura [5]. Adicionalmente, la curva característica no es única para un suelo, su forma y posición varían para las trayectorias de humedecimiento y secado, fenómeno denominado “histéresis” [6].

Mediante la determinación de la curva de retención de agua es posible establecer parámetros deformacionales del suelo, permitiendo aplicar los métodos de cálculo de asentamientos que se basan, fundamentalmente, en el análisis del comportamiento deformacional del suelo a través de variables como la relación de vacíos ( $e$ ), o el espesor de los estratos que van a soportar al cimiento, entre otros. Se encuentra dentro de ellos el método de la sumatoria de capas, el cual se puede emplear para la determinación del asentamiento absoluto lineal en los puntos característicos de la base de un cimiento [3].

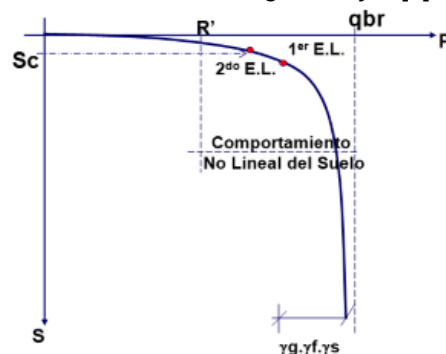
Por otra parte, se han desarrollado procedimientos de cálculo de asentamientos basados en métodos no lineales, pues de esta forma el área de la base no está limitada a tener que garantizar un comportamiento lineal del suelo, sino que alcanza dimensiones menores, siempre y cuando cumpla con las deformaciones límites permisibles. En la presente investigación se emplea el método no lineal propuesto por Malishev y Nikitina [7], el cual plantea inicialmente trabajar con un comportamiento lineal del suelo hasta que este se encuentre trabajando a la tensión límite de linealidad, y para esta tensión, calcular los asentamientos lineales que se producen en la base, considerando entonces que a partir de ese punto el suelo se va a comportar como un medio no lineal (como sucede en la realidad), a continuación se presenta su metodología con las adecuaciones para el análisis de suelos no saturados.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis del método de cálculo a emplear para determinar los asentamientos, si por métodos lineales o no lineales, resulta determinante para la metodología a seguir. Primeramente, debe conocerse que entre los suelos predominantemente cohesivos y los predominantemente friccionales existen diferencias marcadas de comportamiento, en la generalidad de los casos, en cuanto a la respuesta de los suelos ante una relación tensión- deformación, como puede apreciarse en las gráficas que se muestran en las figuras 1 y 2 [8].



**Figura 1:** Comportamiento  $P$  vs  $S$ , en suelos predominantemente cohesivos [8].



**Figura 2:** Comportamiento  $P$  vs  $S$ , en suelos predominantemente friccionales [8].

Considerar el cálculo de los asentamientos no lineales se recomienda fundamentalmente para los casos donde las bases constituidas por suelos predominantemente friccionales, presentan valores de excentricidad no considerables en la combinación de carga para el diseño por el primer estado límite. Asimismo, se puede emplear en cualquier otro tipo de suelo, cuando las combinaciones de carga empleadas en el diseño, generen un estado tensional actuante en el segundo estado límite que sobrepase la tensión límite de linealidad del suelo [9]. En los últimos años, varios autores como González Cueto-Vila [10], han investigado métodos no lineales para calcular asentamientos, lo que supone cambios elementales en la metodología del diseño por Estados Límites, además de evaluar la influencia de la Teoría de la Seguridad, como uno de los métodos de mayor eficacia y rigor científico, en la estimación del nivel de seguridad en un diseño; por su componente probabilístico y estadístico.

En la investigación se propone trabajar en la zona de comportamiento no lineal de un suelo no saturado predominantemente cohesivo, donde la succión tiene una gran influencia en sus propiedades mecánicas, estabilidad y capacidad de carga, a diferencia su comportamiento en los suelos friccionales. También es importante mencionar que se diseña para cargas verticales que permiten aprovechar el comportamiento del suelo en la zona de no linealidad, pues los valores de presiones actuantes superan la presión límite de linealidad del suelo  $R'$ , para lo cual se realizan los ajustes pertinentes al método analítico de Malishev y Nikitina [7], adaptado a las condiciones del suelo no saturado.

## 2.1. Metodología Para El Cálculo De Asentamientos No Lineales A Partir De Ajustes Al Método De Malishev Y Nikitina [7] En Suelos No Saturados

### 1. Cálculo del valor límite inferior $P_1$ , determinado por la tensión límite de linealidad ( $R'$ )

Para los suelos no saturados  $R'$ :

$$R' = \frac{\gamma_{c1} \times \gamma_{c2}}{K} \left( M'_{\gamma} \times K_Z \times b \times \gamma_{2k} + M'_q \times (\gamma_{1k} \times D_f + q_{sc}) + M'_c \times (c'_{sat} + (u_a - u_{\omega})_b \times (\tan \varphi_{sat} - S_r \Psi \times \tan \varphi_{sat}^*) + (u_a - u_{\omega})_{AVR} \times S_r \Psi \tan \varphi_{sat}^*) \right) \quad (1)$$

Donde:  $\gamma_{c1}$  y  $\gamma_{c2}$  son los coeficientes que dependen de las condiciones de trabajo del suelo y tipo de estructura;  $K$  es el coeficiente de fiabilidad;  $K_Z$  es el coeficiente que toma en cuenta el ancho  $b$  de la cimentación;  $\gamma_{2k}$  es el peso específico húmedo por debajo del nivel de cimentación;  $k$  es el valor característico;  $M'_{\gamma}, M'_q, M'_c$  son los coeficientes adimensionales que dependen del ángulo de fricción interno  $\varphi^*$  (afectado por la succión) del terreno que yace bajo la cimentación, obtenidos con la corrección por excentricidad;  $\gamma_{1k}$  es el peso específico húmedo por encima del nivel de cimentación;  $D_f$  es la profundidad de cimentación;  $q_{sc}$  es la sobrecarga circundante alrededor del cimiento en la superficie del terreno;  $c'_{sat}$  es la cohesión efectiva y minorada según la condición del estado límite de deformación;  $(u_a - u_{\omega})_b$  es el valor de la entrada de aire de la curva de retención de agua del suelo;  $(u_a - u_{\omega})_{AVR}$  es la succión del intervalo a analizar;  $\varphi_{sat}^*$  es el ángulo de fricción efectiva, que representa la máxima inclinación de la envolvente de falla cuando las tensiones son efectivas;  $S_r$  es el grado de saturación y  $\Psi$  es el parámetro de ajuste del modelo [11].

### 2. Determinar $P'_1$ , que está dado por

$$P'_1 = P_1 - \gamma_1 \times D_f \quad (2)$$

Donde:  $P_1$  es el valor de la presión crítica inferior, puede estar dada por  $R'; 1,2R'$  o por otro valor predeterminado, que prefija un límite de comportamiento lineal del suelo;  $\gamma_1$  es el peso específico en estado natural del suelo por encima del nivel de cimentación y  $D_f$  es la profundidad de cimentación.

### 3. Calcular el asentamiento lineal que se produce cuando está actuando una presión $P_1$

Para lo cual se emplea el método lineal de sumatoria de capas, según plantea la norma NC-1321, 2019 para el cálculo de los asentamientos lineales [9].

### 4. Obtener el valor de la profundidad media en la que se considera se desarrollarán los asentamientos $h_{media}$

$$h_{media} = \frac{S_{lineal} \times E_0 (1 - \mu)}{P'_1 (1 + \mu) (1 - 2\mu)} \quad (3)$$

Donde:  $S_{lineal}$  es el asentamiento lineal del suelo;  $E_0$  es el módulo general de deformación del suelo y  $\mu$  es el coeficiente de Poisson del suelo.

Para determinar el módulo general de deformación del suelo  $E_0$  en la condición no saturada se parte de la curva de compresibilidad resultado del ensayo de consolidación para el suelo saturado, posteriormente se emplea el modelo de comportamiento volumétrico planteado por Alanís y Rojas [12], [13] donde se obtienen los valores de  $\kappa$  y  $\lambda$  para la zona de comportamiento elástico y plástico del suelo, con el objetivo de trazar la curva de compresibilidad para cada grado de saturación que se analiza. A partir de dichas curvas se calculan las propiedades deformacionales del suelo ( $a_v$  coeficiente de compresibilidad y  $m_v$  coeficiente de variación volumétrica) y de esa forma el módulo de deformación para cada grado de saturación objeto de estudio.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_f} = \frac{e_0 - e_f}{\sigma'_f - \sigma'_0} \quad (4)$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (5)$$

$$E_0 = \frac{1}{m_v} \quad (6)$$

Donde:  $a_v$  es el coeficiente de compresibilidad;  $\Delta e$  es la variación del índice de poros del suelo no saturado;  $\Delta \sigma'_f$  es la variación de las tensiones efectivas;  $e_0$  es el índice de poros inicial;  $e_f$  es el índice de poros final;  $\sigma'_0$  es la tensión efectiva inicial;  $\sigma'_f$  es la tensión efectiva final;  $m_v$  es el coeficiente de variación volumétrica y  $E_0$  es el módulo general de deformación del suelo.

**5. Determinar el valor de  $q_1$ , que representa el estado de reposo del suelo, por la siguiente expresión**

$$q_1 = \frac{\mu}{1 - \mu} \times P_1 \quad (7)$$

**6. Calcular el valor del límite superior de tensiones  $P_2$**

Determinado por el valor de  $q_{br}^*$  en función de las características físico mecánicas medias del suelo.

$$P_2 = q_{br}^*(\varphi, \gamma)$$

Para los suelos no saturados  $q_{br}^*$  se calcula como

- Para suelos  $c - \varphi$

$$q_u = [c' + (u_a - u_w)_b (\tan \varphi_{sat}^* - S_r^\Psi \times \tan \varphi_{sat}^*) + (u_a - u_w)_{AVR} \times S_r^\Psi \tan \varphi_{sat}^*] N_c S_c i_c d_c g_c + \gamma_1^* D_f N_q S_q i_q d_q g_q + 0,5 \gamma_2^* B N_\gamma S_\gamma i_\gamma d_\gamma g_\gamma \quad (8)$$

$$\Psi_d = 1 + 0,34(IP) - 0,0031(IP^2) \quad (9)$$

$$\varphi_{unsat} = \varphi_{sat} + \Psi_d \quad (10)$$

Donde:  $c'$  es la cohesión efectiva;  $(u_a - u_w)_b$  es el valor de la entrada de aire de la curva de retención de agua del suelo;  $\varphi_{sat}^*$  es el ángulo de fricción interna efectiva del suelo saturado;  $S_r$  es el grado de saturación;  $\Psi$  es el parámetro de ajuste del modelo;  $(u_a - u_w)_{AVR}$  es la succión del intervalo a analizar;  $\gamma_1^*$  es el peso específico húmedo por encima del nivel de cimentación;  $\gamma_2^*$  es el peso específico húmedo por debajo del nivel de cimentación;  $D_f$  es la profundidad de cimentación;  $B$  es el ancho del cimiento;  $N_c, N_q, N_\gamma$  son los factores de capacidad de carga;  $S_c, S_q, S_\gamma$  son los factores de forma;  $i_c, i_q, i_\gamma$  son los factores de inclinación de la carga;  $d_c, d_q, d_\gamma$  son los factores que valoran el efecto de la profundidad del cimiento dentro del estrato resistente  $D$ ;  $g_c, g_q, g_\gamma$  son los factores de inclinación del terreno;  $\Psi_d$  es el parámetro de ajuste del modelo que depende del índice de plasticidad del suelo;  $IP$  es el índice de plasticidad del suelo;  $\varphi_{unsat}$  es el ángulo de fricción interna del suelo no saturado [11].

- Para los suelos cohesivos puros ( $\varphi = 0$ )

En el caso de los suelos cohesivos puros se emplea la formulación planteada por Brinch – Hansen, que utiliza la norma NC-1321,2019 [9], con modificaciones a los parámetros de resistencia del suelo no saturado, según los ajustes propuestos por Vanapalli [11].

$$q_u = 5,14 c_{u(unsat)} (1 + S'_c + d'_c - i'_c - g'_c) + q' \quad (11)$$

$$q' = \gamma_1^* \times D_f + q_{sc}^* \quad (12)$$

Donde:  $c_u(unsat)$  es la cohesión para el suelo no saturado;  $S'$  es el factor de forma;  $d'$  es el factor que valora el efecto de la profundidad del cimient dentro del estrato resistente  $D$ ;  $i'$  es el factor de inclinación de la carga;  $g'$  es el factor de inclinación del terreno;  $\gamma l^*$  es el peso específico de cálculo por encima del nivel de cimentación,  $Df$  es la profundidad del cimient,  $q_{sc}^*$  es la sobrecarga circundante alrededor del cimient en la superficie del terreno.

Vanapalli lleva a cabo un modelo para predecir la variación de la resistencia al corte en un suelo no saturado cohesivo puro para cinco valores diferentes de succión matricial usando la resistencia al corte derivada de resultados de la prueba de compresión no confinada para suelos saturados [14], resultando:

$$c_{u(unsat)} = \frac{q_{u(unsat)}}{2} \quad (13)$$

$$c_{u(unsat)} = c_{u(sat)} \left[ 1 + \frac{u_a - u_w(S_r)^v}{P_a / 100^\mu} \right] \quad (14)$$

Donde:  $c_{u(unsat)}$  y  $c_{u(sat)}$  son la resistencia a compresión bajo la condición no saturada y saturada, respectivamente;  $P_a$  es la presión atmosférica siendo igual a 101,3kPa;  $S_r$  es el grado de saturación y  $v, \mu$  son parámetros de ajustes.

$$v = 2$$

$$\mu = 9 \text{ para } 8 \leq IP(\%) \leq 15,5$$

$$\mu = 2,10880e^{0,0903(IP)} \text{ para } 15,5 < IP(\%) < 60$$

Donde:  $IP$  es el índice de plasticidad del suelo.

### 7. Determinar la tensión máxima de confinamiento actuando lateralmente $q_2$

$$q_2 = \frac{1 - \sen \varphi}{1 + \sen \varphi} \times P_2 - \frac{2 \times c_{u(unsat)} \times \cos \varphi}{1 + \sen \varphi} \quad (15)$$

Donde:  $q_2$  es la tensión máxima de confinamiento actuando lateralmente;  $\varphi$  es el ángulo de fricción interna del suelo;  $P_2$  es el valor de la presión crítica superior, y va a estar dada por la expresión de capacidad de carga  $q_{br}^*$  evaluada para los valores medios de las características físico mecánicas del suelo y  $c_{u(unsat)}$  es la cohesión del suelo en estado no saturado.

### 8. Calcular el valor de $K$ que está expresada como

$$K = \frac{E_0}{1 - 2\mu} \quad (16)$$

Donde:  $E_0$  es el módulo general de deformación del suelo, determinado para los suelos no saturados a través de la curva de índice de poros para cada grado de saturación del suelo y  $\mu$  es el coeficiente de Poisson del suelo.

### 9. Comprobar la siguiente condición $P_1 \leq P \leq P_2$

Es importante que el valor de  $P$ , referente a la presión media real actuante en el suelo, para la cual se determinan los asentamientos no lineales se encuentre entre los valores de  $P_1$ , considerado como la presión crítica inferior, la cual prefija un límite de comportamiento lineal del suelo y  $P_2$ , determinado por el valor de la presión crítica superior de falla del suelo, que se toma como la capacidad de carga, de no ser así no se está trabajando en la zona de comportamiento no lineal del suelo y no sería válido aplicar el método. Es preciso señalar que si por ejemplo  $P \leq P_1$ , el suelo se encuentra en la zona de comportamiento lineal para lo cual es necesario aplicar un método lineal en la determinación de los asentamientos, además nunca  $P > P_2$  pues eso significa que el suelo se encuentra en inminente falla ya que la presión actuante sobrepasa la resistencia de rotura del suelo.

### 10. Cálculo del asentamiento no lineal para la presión media real actuante del suelo $P$

$$S_{no \text{ lineal}} = h_{media} \times \frac{P - P_1}{3E_0} \left\{ \frac{2(1 + \mu)}{P_2 - P} [P_2 - P_1 - (q_2 - q_1)] + \frac{1 - 2\mu}{P_2 - P_1} [P_2 - P_1 + 2(q_2 - q_1)] \right\} + S_{lineal} \quad (17)$$

Ecuación simplificada

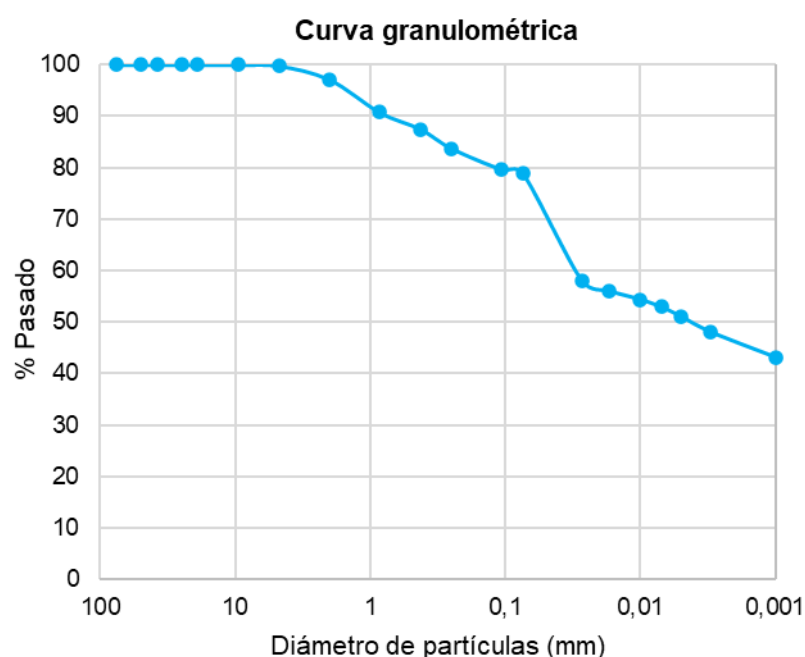
$$S_{no \text{ lineal}} = S_{lineal} \frac{P(P_2 - P_1) - (P - P_1)P_1}{P_1(P_2 - P_1)} \quad (18)$$

## 2.2. Caracterización Físico-Mecánica. Suelo De Ciego De Ávila

El estudio experimental corresponde a muestras de suelo pertenecientes al poblado Venezuela en la provincia de Ciego de Ávila. Para la caracterización físico mecánica del suelo se procede a realizar los ensayos de granulometría [15], peso específico [16], límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad [17], compactación con la energía del ensayo Proctor estándar [18], y el ensayo de corte directo [19], todos ellos a partir de las orientaciones de las normas actualmente vigentes, además se clasificó el suelo por los sistemas: (SUCS) Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos y (AASHTO) American Association of State Highway and Transportation Officials, respectivamente. Por otra parte, se obtiene la curva de retención de agua del suelo ( $S_r$  vs  $S_u$ ) mediante la técnica indirecta del papel de filtro para la medición de la succión del suelo, a partir de la norma ASTM vigente [20]. Los resultados de los ensayos físicos y mecánicos fueron extraídos de Rodríguez [21] y se muestran a continuación.

- **Granulometría, límite de consistencia, peso específico, compactación y parámetros de resistencia del suelo**

En la figura 3 se aprecia la curva granulométrica promedio de las muestras de suelo analizadas [15].



**Figura 3:** Curva granulométrica promedio del suelo en el poblado Venezuela, Ciego de Ávila [21].

El ensayo de corte directo se realizó con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia del suelo ( $c$  y  $\phi$ ), teniendo en cuenta la norma NC-325,2004 correspondiente a: "Geotecnia. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño)" [19]. Para la realización de este ensayo se utilizó muestras compactadas, con la energía del Proctor estándar, a cada una de ellas se le aplicó una carga vertical de 50, 100, 200 y 400 kPa respectivamente [18].

Es necesario señalar que en suelos no saturados la obtención de los parámetros de resistencia se pueden alcanzar de forma experimental o mediante el empleo de formulaciones empíricas. De forma experimental se pueden obtener los mismos del ensayo Triaxial Bajo Succión Controlada para distintos valores de succión fijados por el proyectista o investigador según corresponda, utilizando dicho ensayo en condiciones muy específicas y para obras de marcada importancia. Por otra parte, es válido trabajar con ecuaciones empíricas, por ello se emplean en la investigación las planteadas por Vanapalli descritas anteriormente, que parten de considerar dentro de su formulación los parámetros de resistencia del suelo en su condición saturada [11]. A continuación, se resumen en la tabla 1 los resultados correspondientes a los límites de consistencia, el peso específico relativo a los sólidos, el ensayo de compactación, los parámetros de resistencia del suelo y su clasificación por los sistemas empleados.

**Tabla 1:** Propiedades del suelo en el poblado Venezuela, Ciego de Ávila [21].

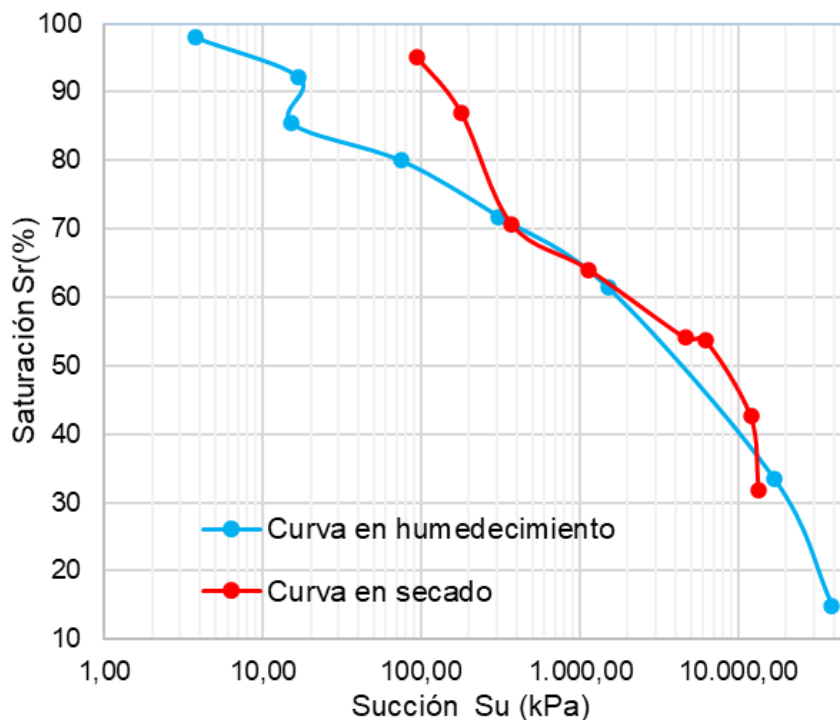
| Parámetros |        |        |                |                                          |                         |         |       | Métodos de clasificación             |           |
|------------|--------|--------|----------------|------------------------------------------|-------------------------|---------|-------|--------------------------------------|-----------|
| LL (%)     | LP (%) | IP (%) | G <sub>s</sub> | Y' <sub>d máx</sub> (kN/m <sup>3</sup> ) | ω <sub>óptima</sub> (%) | c (kPa) | φ (°) | (SUCS)                               | (AASHTO)  |
| 51,8       | 25,3   | 26,4   | 2,82           | 15,64                                    | 24,7                    | 49,56   | 14,53 | CH (Arcilla de alta compresibilidad) | A-7-6(22) |

LL-Límite líquido; LP-Límite plástico; IP-Índice de plasticidad; G<sub>s</sub>-Peso específico relativo a los sólidos; Y'<sub>d máx</sub> -Peso específico seco máximo; ω<sub>óptima</sub> - Humedad óptima; c-cohesión; φ-ángulo de fricción interna; SUCS- Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos; AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials.

Como se aprecia en la tabla 1 el suelo objeto de estudio es predominantemente cohesivo, específicamente una arcilla de alta compresibilidad. En estos suelos la forma y el tamaño de las partículas provoca que se unan entre sí influyendo significativamente en la variación de la succión, contrario a los suelos friccionales que presentan una composición y estructura diferentes lo cual genera una menor sensibilidad a la succión. Es válido destacar que es posible aplicar el método no lineal propuesto por Malishev y Nikitina [7] con los ajustes para los suelos no saturados que se describen anteriormente, porque el estado tensional actuante en el segundo estado límite sobrepasa la tensión límite de linealidad del suelo.

### 2.3. Curva Característica Del Suelo Estudiado

Se implementó la técnica indirecta del papel de filtro para la determinación de la curva de retención de agua del suelo, pues dentro de los métodos empleados para obtener la succión es el único que mide la succión total y matricial, además, dado su sencillo proceder es posible realizarlo en las condiciones de los laboratorios cubanos. Para medir la succión se tomó como base la norma ASTM-D5298, 2010 del correspondiente a: "Determinación de la succión en los suelos", en la figura 4, se presentan los resultados experimentales obtenidos [20].



**Figura 4:** Curvas características del suelo en el poblado Venezuela, Ciego de Ávila [21].

### 3. RESULTADOS

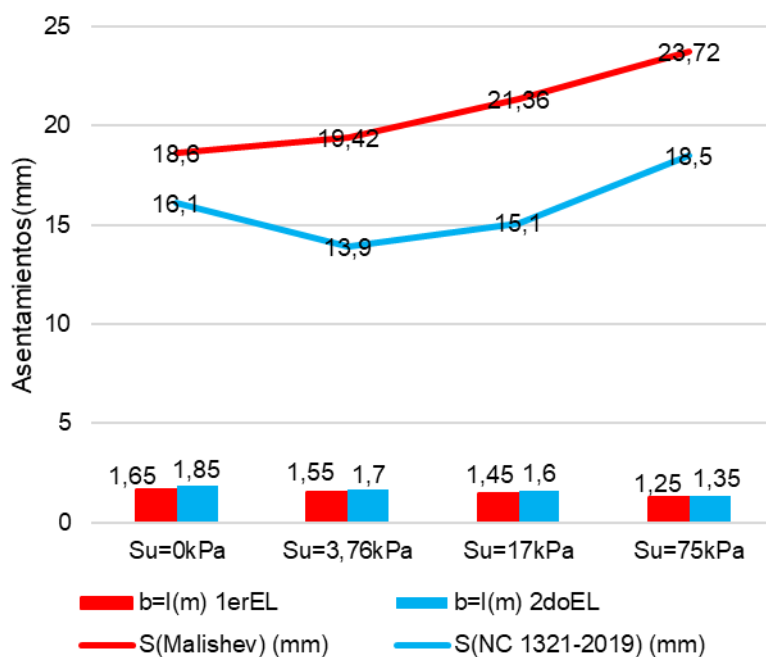
El caso de estudio corresponde a una cimentación superficial cuadrada, de un edificio de varias plantas con pórticos de hormigón sin arriostramiento. Es importante señalar que el cimiento no presenta profundidad dentro del estrato que le sirve de apoyo  $D=0\text{m}$  y tiene 1,5m de profundidad de cimentación. Se encuentra sometido a una carga vertical centrada, la cual está apoyada sobre el suelo en el poblado Venezuela, provincia de Ciego de Ávila. Inicialmente se procede a realizar el diseño geotécnico según las especificaciones que plantea la norma NC-1321,2019 cuyas áreas de la base se pueden apreciar en la tabla 2 [9].

**Tabla 2:** Áreas de la base de las cimentaciones por el Método de los Estados Límites.

| Saturado                              |                                       | No saturado                           |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| $S_u=0\text{kPa}$ , $S_r=100\%$       |                                       | $S_u=3,76\text{ kPa}$ , $S_r=98\%$    |                                       | $S_u=17\text{ kPa}$ , $S_r=92\%$      |                                       | $S_u=75\text{ kPa}$ , $S_r=85\%$      |                                       |
| $b=l(\text{m})$<br>1 <sup>er</sup> EL | $b=l(\text{m})$<br>2 <sup>do</sup> EL | $b=l(\text{m})$<br>1 <sup>er</sup> EL | $b=l(\text{m})$<br>2 <sup>do</sup> EL | $b=l(\text{m})$<br>1 <sup>er</sup> EL | $b=l(\text{m})$<br>2 <sup>do</sup> EL | $b=l(\text{m})$<br>1 <sup>er</sup> EL | $b=l(\text{m})$<br>2 <sup>do</sup> EL |
| 1,65                                  | 1,85                                  | 1,55                                  | 1,7                                   | 1,45                                  | 1,6                                   | 1,25                                  | 1,35                                  |

**$S_u$ -Succión;  $S_r$ -Grado de saturación;  $b=l$ - lados de la cimentación**

A partir de las áreas obtenidas por el Método de los Estados Límites, se procede a la determinación de los asentamientos no lineales del suelo al ocurrir variaciones en el grado de saturación. Mediante el método analítico de Malishev y Nikitina [7] según los ajustes referidos inicialmente para las condiciones del suelo no saturado.



**Figura 5:** Comparación de asentamientos.

En la figura 5 se observa como a medida que aumenta la succión del suelo se produce una disminución del área de la base de la cimentación para un mismo valor de carga aplicada, predominando en el diseño geotécnico el segundo estado límite. Para proponer un diseño racional se consideró el área de la base del primer estado límite con el propósito de aprovechar la zona de comportamiento no lineal de suelo pues como se aprecia los valores de asentamientos lineales según el método de sumatoria de capas son menores a 2cm, valor que se encuentra alejado del límite permisible ( $S_{\text{permisible}} = 8\text{cm}$ ) según la NC-1321,2019 [9], para este tipo de cimentación, según el tipo de estructura. Los asentamientos absolutos obtenidos por el método de Malishev y Nikitina presentan una diferencia menor de 7mm con respecto a los alcanzados por el método de sumatoria de capas, lo que se considera insignificante desde el punto de vista ingenieril.

El suelo estudiado se clasificó como una arcilla de alta compresibilidad mediante la evaluación de sus propiedades físico-mecánicas. Se consideró la succión y su efecto en la capacidad de carga y la tensión límite de linealidad del suelo para el diseño geotécnico de la cimentación.

Se empleó el método no lineal propuesto por Malishev y Nikitina, que ha sido demostrado internacionalmente, presentando adecuados resultados en suelos saturados, ajustado a las características de los suelos no saturados, a partir de la modificación de los parámetros de resistencia y deformación por el método de Vanapalli, con el objetivo de determinar los asentamientos en un suelo predominantemente cohesivo, esto permitió obtener un diseño racional del área de la base de las cimentaciones.

Los resultados muestran una disminución del 32% de las áreas de la base de las cimentaciones cuando se considera las características del suelo no saturado y la zona de comportamiento no lineal en comparación con su estado saturado y comportamiento lineal, bajo la misma carga aplicada.

1. I. Flores Berenguer, B. Burgos Perodín, J. García Tristá y Y. González Haramboure, «Estabilidad de taludes en Presas de tierra bajo diversas condiciones de carga con suelos no saturados,» *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 1, pp. 34-43, 2020.
2. I. Flores Berenguer, J. García Tristá y Y. González Haramboure, «Relación entre la compactación y la succión en presas de tierra con suelos tipo CH,» *Obras y proyectos*, pp. 15-25, 2020.
3. J. García Tristá, W. D. Cobelo Cristía, G. J. Quevedo Sotolongo, I. Flores Berenguer y C. M. Rodríguez Rodríguez, «Análisis del comportamiento tenso-deformacional de un suelo parcialmente saturado para un cimiento circular bajo carga axial,» *Ingeniería y desarrollo*, 2020.
4. I. Méndez-Herrada y M. d. I. L. Pérez-Rea, «Metodología para encontrar la deformación volumétrica de un suelo expansivo y parcialmente saturado con la menor cantidad de ensayos posible,» *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 23, nº 2, 2022.
5. I. Flores Berenguer, I. Castro Martínez, J. García Tristá y Y. González Haramboure, «Influencia de la permeabilidad del suelo no saturado en los taludes de presas de tierra,» *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, pp. 86-100, 2019.
6. I. Flores Berenguer, J. García Tristá y Y. González Haramboure, «Estabilidad de taludes durante un desembalse rápido en presas de tierra con suelos parcialmente saturados,» *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, nº 1, pp. 13-31, 2020.
7. M. Malishev y N. Nikitina, «Cálculo de asentamientos de cimentaciones para condiciones no lineales entre las tensiones y las deformaciones del suelo,» *Revista Trabajos NI Bases y Construcciones Subterráneas*, vol. 2, pp. 21-25.
8. A. V. González Cueto-Vila, G. J. Quevedo Sotolongo, E. Fleite González y Y. Barceló, «Análisis y propuesta de métodos para el cálculo de los asentamientos en los suelos de Cuba,» de *II Convención Científica Internacional UCLV. XII Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia, Vías y Obras Hidráulicas*. Cuba, 2019. <https://www.researchgate.net/publication/334373173>
9. NC-1321, Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales., Oficina Nacional de Normalización, 2019.
10. A. V. González Cueto-Vila, *Diseño de cimentaciones superficiales en arenas*.(Tesis de Doctorado;Universidad Central Marta Abreu de las Villas). 2000.
11. J. García Tristá, *Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba*.(Tesis de Doctorado;Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.) 2015. <http://tesis.cujae.edu.cu:8080/xmlui/handle/123456789/5336>
12. A. O. Alanis Araiza, *Deformación volumétrica en suelos no saturados*(Tesis de Maestría,Universidad de Querétano). 2012. <https://ri-ng.uaq.mx/xmlui/handle/123456789/231>
13. E. Rojas González, «La última pieza del rompecabezas: el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados,» *Ciencia@ UAQ*, pp. 1-16, 2013.
14. W. T. Oh y S. K. Vanapalli, «A simple method to estimate the bearing capacity of unsaturated fine-grained soils,» de *Proc., 62nd Canadian Geotechnical Conf*, 2009.
15. NC-20, *Determinación de la granulometría de los suelos*., Oficina Nacional de Normalización, 1999, pp. 1-16.
16. NC-19, *Determinación del peso específico de los suelos*., Oficina Nacional de Normalización, 1999, pp. 1-11.
17. NC-58, *Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos*, Oficina Nacional de Normalización, 2000, pp. 1-12.
18. NC-54-142, *Compactación estática*, Oficina Nacional de Normalización, 1985.
19. NC-325, *Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño)*, Oficina Nacional de Normalización, 2004, pp. 1-41.
20. ASTM-D 5298, *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (suction) using Filter Paper*.American Society for Testing and Materials, vol. 11, Barr Harbor, 2010, pp. 1-6.
21. C. M. Rodríguez Rodríguez, *Evaluación del comportamiento tenso-deformacional en suelos parcialmente saturados con problemas de inestabilidad volumétrica*.(Tesis de Maestría;Universidad Central Marta Abreu de Las Villas). 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.31751.61606