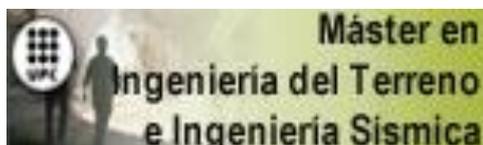


TRABAJO FINAL DE MÁSTER



TÍTULO

OBTENCIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS SATURADOS Y NO SATURADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE UN INFILTRÓMETRO DE SUCCIÓN

AUTOR

OMAR EDUARDO ACOSTA DE LA CRUZ

TUTOR

**ANTONIO LLORET
JEAN VAUNAT**

ESPECIALIDAD

INGENIERÍA GEOTÉCNICA

FECHA

23 SEPTIEMBRE 2016



Dep. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA



RESUMEN

Esta tesina presenta una investigación desarrollada para la obtención de los parámetros hidráulicos de suelos en su estado no saturado y permeabilidades saturadas en diferentes suelos.

La metodología se basa en la realización de ensayos de infiltración utilizando un infiltrómetro de minidisco con succión fijada. Los parámetros hidráulicos se obtienen del análisis de las curvas de infiltración (método de Zhang), pero también se han utilizado ensayos de medida directa de permeabilidad (carga constante y variable) y correlaciones empíricas de autores como Hazen, Terzhagi, van Genuchten y otros basadas en parámetros obtenidos en la caracterización básica del suelo. También se lleva a cabo la modelación del ensayo de infiltración a través del código de elementos finitos Code_Bright, con el fin de analizar el efecto de la succión inicial del suelo en el proceso de infiltración del agua en el suelo.

Para obtener los parámetros hidráulicos se ha desarrollado un proceso experimental en el laboratorio que consiste en la preparación de muestras a diferentes grados de saturación en recipientes cilíndricos de metacrilato.

Las observaciones del volumen de agua infiltrado a la muestra en el tiempo con una carga constante de 6 cm de succión impuesta dentro del depósito del equipo, conforman los datos experimentales analizados en esta investigación.

El análisis se realizó para una arena de grano fino y semi-redondeado con cierto contenido de limo, y el suelo arcilloso del Campus Nord. Los valores de la curva de retención para la arena se obtuvieron a través de medidas de la succión con un tensiómetro y los parámetros de la arcilla se tomaron de acuerdo a las investigaciones de Barrera (2002).

La permeabilidad saturada (k_s), obtenida utilizando el método de Zhang para ambos materiales, muestra una relación inversamente proporcional, pero no lineal, con el grado de saturación de la muestra antes de empezar el ensayo de infiltración.

La conductividad hidráulica (k_s) de $2.1E-04$ m/s fue obtenida para la arena con el método Zhang-vG, en el suelo con un grado de saturación inicial del

10% y una succión aproximada 50 kPa. Este valor es el más cercano a 1.6×10^{-4} m/s, resultante del ensayo de carga constante.

Para la arcilla del Campus Nord, la relación de Schlichter con una permeabilidad saturada de 3.3×10^{-9} m/s es la más cercana al resultado obtenido por Barrera (2002), también de un ensayo de carga constante, de 2.5×10^{-9} m/s.

ABSTRACT

This dissertation presents a research conducted for obtaining the hydraulic parameters of soils with different permeabilities at their unsaturated state using a suction infiltrometer.

The methodology is based on analysis of infiltration tests using a infiltrometer with a minidisc on a fixated suction. Hydraulic parameters were obtained from the analysis of the infiltration curves (Zhang method), but also from tests of direct measurement of permeability (constant and variable head tests) and empirical correlations from authors like Hazen, Terzhagi, van Genuchten and others, based on parameters obtained from basic characterization of the soil. A simulation of the infiltration test is also carried out on the finite element's modeling code Code_Bright, in order to analyze the effects of initial suction in the process of water infiltration into the soil.

An experimental laboratory procedure was developed for the obtention of the hydraulic parameters consisting on the preparation of soil samples at different degrees of saturation in cylindrical methacrylate vessels.

The observations of the volume of water infiltrated into the sample over time with a constant head pressure equivalent to 6 cm of suction imposed in the tank of the equipment, conform the experimental data analyzed in this research.

The analysis was performed for a fine and semi-rounded sand with some silt content, and the clay of the Campus Nord. The values of the retention curve for the sand were obtained by measuring the soil suction by means of a tensiometer. The clay parameters were taken from the Ph.D. investigations of Barrera (2002).

The saturated permeability (k_s), obtained using the Zhang method, for both materials, show an inverse relationship, nonlinear, to the degree of saturation of the sample before starting infiltration tests.

A hydraulic conductivity (k_s) of $2.1E-04$ m/s was obtained for the sand with the Zhang-vG method, at a degree of initial saturation of 10% and

approximately 50 kPa of suction. This value was the closest to the $1.6E-04$ m/s obtained from the constant head permeability test.

For the Campus Nord clay, the relationship of Schlichter with a saturated permeability coefficient of $3.3E-09$ m/s is the closest to the result obtained by Barrera (2002), also on a constant head permeability test, of $2.5E-09$ m/s.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS **I**

ÍNDICE DE FIGURAS **II**

ÍNDICE DE TABLAS **VII**

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN **1**

1.1 OBJETIVOS. **1**

1.1.1 OBJETIVO PRINCIPAL. 1

1.1.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS. 1

1.2 ANTECEDENTES. **2**

1.3 RELACIONES EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DE LA PERMEABILIDAD SATURADA. **3**

1.4 SUELOS NO SATURADOS. **5**

1.5 EL MODELO DE VAN GENUCHTEN. **8**

1.6 MÉTODO DE ZHANG-VAN GENUCHTEN. **13**

2. CAPÍTULO II: MATERIALES ENSAYADOS **15**

2.1 ARENA LAB-UPC. **15**

2.1.1 ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON CARGA CONSTANTE. 19

2.1.2 ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE 20

2.1.3 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE LA ARENA. 22

2.2 SUELO CAMPUS NORD **27**

2.2.1 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE LA ARCILLA. 29

3. CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL **32**

3.1 INFILTRÓMETRO DE TENSIÓN. **32**

3.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE INFILTRACIÓN.	33
3.2.1 TÉCNICAS PARA LA PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS CON ARENA.	34
3.2.2 TÉCNICA PARA LA PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS EN ARCILLA.	36
3.3 SIMULACIÓN MEDIANTE CODE_BRIGHT.	37
<u>4. CAPÍTULO IV: CURVAS EXPERIMENTALES</u>	<u>45</u>
4.1 CURVAS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS EN ARENA.	45
4.2 CURVAS EXPERIMENTALES EN LA ARCILLA DEL CAMPUS NORD.	49
4.3 ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN	52
<u>5. CAPÍTULO V: SIMULACIÓN EN CODE BRIGHT</u>	<u>62</u>
5.1 CURVAS DE INFILTRACIÓN MODELADAS EN CODE_BRIGHT.	70
<u>6. CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS</u>	<u>74</u>
<u>7. CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</u>	<u>85</u>
7.1 CONCLUSIONES.	85
7.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.	87
<u>8. REFERENCIAS</u>	<u>88</u>
<u>9. ANEXOS</u>	<u>90</u>

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, agradecer a Dios por permitirme la oportunidad de estudiar fuera de mis fronteras y de darme la salud y la fuerza para perseguir mis objetivos.

A mis padres y mi hermano por apoyarme en todo lo posible a pesar de la distancia.

A mi tutor y director de tesis, Antonio Lloret, por guiarme a través de todo el proceso del máster y su intención desinteresada de formar a sus estudiantes de la mejor manera posible.

A mi director de tesis y coordinador de máster, Jean Vaunat, por ser tan comprensivo y dispuesto desde el día cero hasta el último.

A mi novia, por compartir esta experiencia conmigo en tierras lejanas y su inmensa paciencia en los momentos en lo que no todo salía como planeado.

A mis compañeros de máster y de piso, internacionales y no internacionales, que conformaron mi familia más cercana durante estos dos años.

Finalmente, a todas las personas que hicieron esto posible, en especial a tía Evalina, por su preocupación y ayuda desinteresada en todo momento.

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Dinámica del fenómeno del salto de Haines. Tomado de: "Porosity and Pore Size Distribution" p.4 (Nimmo, 2004).</i>	6
<i>Figura 2 - Porosimetría de especímenes compactados de la arcilla limosa de Barcelona. (Gens, Alonso, Suriol & Lloret, 1995)</i>	8
<i>Figura 3 - Valores observados (círculos) y curvas calculadas (líneas) de las propiedades hidráulicas de la arenisca Hygiene. Izquierda: Contenido de agua volumétrico vs succión del material, derecha: Conductividad relativa vs succión del material. Fuente: van Genuchten 1980, SOIL. SCI. SOC. AM. J. VOL 44 p. 896.....</i>	11
<i>Figura 4 - Valores observados (círculos) y curvas calculadas (líneas) de las propiedades hidráulicas de la Marga Limosa Touchet. Izquierda: Contenido de agua volumétrico vs succión del material, derecha: Conductividad relativa vs succión del material. Fuente: van Genuchten 1980, SOIL. SCI. SOC. AM. J. VOL 44 p. 896.....</i>	12
<i>Figura 5 - Valores observados (círculos) y curvas calculadas (líneas) de las propiedades hidráulicas de la Marga Limosa G.E. 3. Izquierda: Contenido de agua volumétrico vs succión del material, derecha: Conductividad relativa vs succión del material. Fuente: van Genuchten 1980, SOIL. SCI. SOC. AM. J. VOL 44 p. 897.....</i>	12
<i>Figura 6 - Valores observados (círculos) y curvas calculadas (líneas) de las propiedades hidráulicas de la Arcilla Beit Neofa. Izquierda: Contenido de agua volumétrico vs succión del material, derecha: Conductividad relativa vs succión del material. Fuente: van Genuchten 1980, SOIL. SCI. SOC. AM. J. VOL 44 p. 897.....</i>	13
<i>Figura 7 - Fotografía de la arena utilizada para los ensayos de infiltración. Fuente: Propia.</i>	16
<i>Figura 8 - Distribución granulométrica de la Arena Lab-UPC utilizada para los ensayos de infiltración. Fuente: Propia.</i>	17
<i>Figura 9 - Fotografía tomada del equipo de permeabilidad de carga constante UPC. Fuente: Propia.</i>	19
<i>Figura 10 - Diagrama del equipo de permeabilidad con carga variable. Fuente: Propia.</i>	22
<i>Figura 11 - Composición del equipo de medición de succión, tensiómetro T5 (UMS) e Infield 7 (UMS). Fuente: Propia</i>	24
<i>Figura 12 - Puntos de succión medidos (kPa) en el laboratorio para la Arena Lab-UPC con el tensiómetro. Fuente: Propia.</i>	25
<i>Figura 13 - Gráfico de la solución de van Genuchten para la curva de retención medida en el laboratorio. Valores medidos (puntos), solución analítica (líneas). Fuente: Propia.</i>	27

<i>Figura 14 - Análisis granulométrico para la arcilla roja de Barcelona. Fuente: Barrera, 2002, Secc. 4.</i>	28
<i>Figura 15 - Curvas de succión vs el grado de saturación a diferentes densidades secas del suelo rojo de Barcelona. Fuente: Barrera, 2002, Secc. 4.</i>	30
<i>Figura 16 - Comparación de las curvas de retención obtenidas a través de la técnica psicrométrica y la solución de van Genuchten para distintos valores de densidad seca del suelo rojo de Barcelona. Fuente: Barrera, 2002, Secc. 4.</i>	31
<i>Figura 17 - Medición de la conductividad hidráulica en la fase de saturación a carga constante del suelo rojo de Barcelona en un ensayo triaxial GDS. Fuente: Barrera, 2002, Secc. 4.</i>	32
<i>Figura 18 - Fotografía del capilar y disco poroso del infiltrómetro de succión utilizado en los ensayos. Fuente: propia.</i>	33
<i>Figura 19 - Fotografía del infiltrómetro y recipiente de metacrilato utilizado para los ensayos de infiltración en la arena. Fuente: Propia</i>	35
<i>Figura 20 - Suelo rojo de Barcelona con una saturación de 51% dentro de un recipiente de metacrilato. Fuente: Propia.</i>	36
<i>Figura 21 - Geometría del recipiente con simetría axial al eje Y en GiD (Code_Bright). Fuente: Propia.</i>	39
<i>Figura 22 - Panel de ecuacionesw constitutivas de Code_Bright, selección de ecuación para balance de masa de agua. Fuente: Propia.</i>	40
<i>Figura 23 - Panel de control de parámetros analíticos para las iteraciones de Code_Bright. Fuente: Propia.</i>	41
<i>Figura 24 - Ubicación espacial en la geometría del modelo para la condición de contorno de flujo prescrito en Code_Bright (Flux B.C.). Fuente: Propia.</i>	42
<i>Figura 25 - Datos del material utilizados para la simulación de la curva de retención e infiltración en el suelo (Code_Bright). Fuente: Propia.</i>	43
<i>Figura 26 - Imagen del mallado utilizado para la simulación en Code_Bright. Tamaño general 5 mm, zona reestructurada (infiltrómetro) 2.5 mm. Fuente: Propia.</i>	45
<i>Figura 27 - Valores medidos en el laboratorio del volumen de agua (ml) que ingresa al suelo en función de la raíz cuadrada del tiempo ($s^{0.5}$) para distintos niveles de saturación de la muestra para la arena Lab-UPC. Fuente: Propia.</i>	46
<i>Figura 28 - Variación del del volumen de agua por unidad de tiempo promedio (ml/s) que ingresa a la muestra vs la succión (kPa) del material. Fuente: Propia.</i>	47
<i>Figura 29 - Evolución del caudal medio que ingresa a la muestra en el tiempo para un saturación del 1% y una succión de 100 (kPa) para la arena. Fuente: Propia</i>	48

Figura 30 - Evolución del caudal medio que ingresa a la muestra en el tiempo para un saturación del 40% y una succión de 2 (kPa) para la arena. Fuente: Propia..... 49

Figura 31 - Valores medidos en el laboratorio del volumen de agua (ml) que ingresa al suelo en función de la raíz cuadrada del tiempo ($s^{0.5}$) para distintos niveles de saturación de la muestra para la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia 50

Figura 32 - Evolución del caudal medio que ingresa a la muestra en el tiempo para un saturación del 30% y una succión de 2.5 (MPa) para la arcilla Campus Nord. Fuente: Propia..... 51

Figura 33 - Comparación del ajuste analítico (línea sólida) con los valores medidos del volumen acumulado (ml) en función de la raíz cuadrada del tiempo ($s^{0.5}$) para el ensayo 1 de la arena (Saturación 1%, 100 kPa). Fuente: Propia. 53

Figura 34 - Comparación de la derivada de la solución analítica vs la derivada directa de los valores observados en el laboratorio para el ensayo 1 de la arena. Fuente: Propia..... 54

Figura 35 - Evolución de la infiltración instantánea en el tiempo para el ensayo 2 de la arena (Saturación 10%, 50 kPa). Fuente: Propia. 55

Figura 36 - Evolución de la infiltración instantánea en el tiempo para el ensayo 5 de la arena (Saturación 40%, 2 kPa). Fuente: Propia. 55

Figura 37 - Evolución de la infiltración instantánea (cm/s) en el tiempo (s) para el ensayo 5 de la arena (Saturación 70%, 0.9 kPa). Fuente: Propia. 56

Figura 38 - Variación de la infiltración asintótica (cm/s), en función de la succión del material, observada en los ensayos 1,2,5 y 6 para la arena. Fuente: Propia. 57

Figura 39 - Varación de la infiltración asintótica (cm/s) en función del grado de saturación del suelo, para la arena. Fuente: Propia..... 58

Figura 40 - Comparación de la derivada de la solución analítica vs la derivada directa de los valores observados en el laboratorio para el ensayo 2 de la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia. 59

Figura 41 - Grafico de la evolución de la infiltración instantánea en el tiempo, a partir de la solución analítica ajustada para los ensayos en la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia. 60

Figura 42 - Coeficientes de conductividad hidráulica para los parámetros predeterminados por Carsel y Parrish (1988) utilizando el método de Zhang-vG en para materiales similares a la arena Lab-UPC. Fuente: Propia. 61

Figura 43 - Representación de la salida de datos de los nodos superficiales en la simulación de Code_Bright. Líquido advectivo en el eje Y que simula el flujo de agua por metro lineal de cada nodo en el tiempo. Fuente: Propia..... 63

Figura 44 - Variación de la saturación del material simulado en Code_Bright en función de la succión impuesta dentro de la geometría. Modelo para la arena Lab-UPC Fuente: Propia 64

Figura 45 - Variación de la saturación del material simulado en Code_Bright en función de la succión impuesta dentro de la geometría. Modelo para la arcilla del Campus Nord Fuente: Propia 65

Figura 46 - Representación de los vectores de velocidad para el fluido advectivo en el eje Y simulados en Code_Bright. Fuente: Propia..... 66

Figura 47 - Evolución de la saturación y las presiones dentro del material al 50% y 100% de la simulación del ensayo 4 de la arena en Code_Bright. (Saturación inicial 30%, succión inicial 9 kPa) Escala de presión en figura en MPa. Fuente: Propia..... 67

Figura 48 - Evolución de la saturación y las presiones dentro del material al 50% y 100% de la simulación del ensayo 3 de la arcilla en Code_Bright. (Saturación inicial 51%, succión inicial 0.45 MPa) Escala de presión en figura en MPa. Fuente: Propia. 68

Figura 49 - Evolución de la saturación de la arena en un punto a 5 cm de profundidad en el centro del recipiente para la simulación. Fuente: Propia. 69

Figura 50 - Evolución de la saturación de la arcilla en un punto a 5 cm de profundidad en el centro del recipiente para la simulación. Fuente: Propia 70

Figura 51 - Grafico de infiltración calculada para la Arena Lab-UPC. Permeabilidad saturada fija de 1.05E-4 m/s. Fuente: Propia..... 71

Figura 52 - Comparación de la solución analítica de los valores observados de infiltración con los resultados de la simulación en Code_Bright en función de la raíz cuadrada del tiempo ($s^{0.5}$) para el ensayo 1 de la arena. Fuente: Propia..... 71

Figura 53 - Representación de la dispersión de las funciones al comparar la curva real de infiltración con el resultado de la modelación en Code_Bright sin calibrar. Fuente: Propia..... 72

Figura 54 - Comparación de las soluciones analíticas de los valores de infiltración observados (marcadores) con las funciones resultantes de la calibración de la simulación en Code_Bright para la arena. Fuente: Propia. 73

Figura 55 - Variación de la conductividad relativa k_r en la arena, calculada a partir de la relación de van Genuchten (ec. X). Fuente: Propia. 77

Figura 56 - Comparación de las conductividades hidráulicas obtenidas para la arena con los distintos métodos analizados. Fuente: Propia. 78

Figura 57 - Comparación de las conductividades hidráulicas obtenidas para la arcilla del campus Nord) con los distintos métodos analizados en la tesina. Fuente: Propia. 79

Figura 58 - Resultados de la conductividad hidráulica saturada (cm/s) mediante el método Zhang-vG, donde $A=0.667$ (arena), $A=2.026$ (arena limosa) por Carsel & Parrish (1988) y $A=0.861$ (Curva de retención medida en laboratorio). Fuente: Propia. 79

Figura 59 - Resultados de la conductividad hidráulica saturada (cm/s) utilizando el método de Zhang-vG, donde $A=10.38$ (arcilla) Carsel & Parrish (1988) y $A=8.71$ (Curva de retención medida en el laboratorio). Fuente: Propia. 80

Figura 60 - Comparación de la permeabilidad saturada y no saturada (cm/s) de la arena para los diferentes ensayos en función del grado de saturación. 20% para el ensayo número 3 no representa la saturación real del mismo. Fuente: Propia 81*

Figura 61 - Comparación de la permeabilidad saturada y no saturada (cm/s) de la arcilla del Campus Nord para los diferentes ensayos en función del grado de saturación. Fuente: Propia..... 82

Figura 62 - Representación del error cuadrático de los valores calculados con relación al resultado de $1.6E-02$ (cm/s) obtenido del ensayo de permeabilidad de carga constante para la arena. Fuente: Propia. 83

Figura 63 - Representación del error cuadrático de los valores calculados con relación al resultado de $2.5E-07$ (cm/s) obtenido del ensayo de permeabilidad de carga constante para la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia. 84

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Parámetros C_0 para ecuación 3 en función de la forma del grano del suelo granular. (Terzaghi, 1973)</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 2 - Coeficiente C para la ec. 4 de Schlichter en función del grado de compacidad del suelo. (Schlichter, 1975)</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 3 - Material pasante en porcentaje y tamices utilizados para la Arena Lab-UPC.</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4 - Valores de succión medidos para diferentes niveles de saturación, dentro del mismo rango de densidad seca para la arena utilizando un tensiómetro T5. Fuente: Propia.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 5 - Parámetros de van Genuchten obtenidos para la arena a partir de los valores de succión medidos y resueltos en el vG-Solver. Fuente: Propia.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 6 - Distribución granulométrica para el suelo rojo de Barcelona realizada a partir de tamices y ensayo de sedimentación para la porción fina de la muestra. Fuente: Barrera, 2002.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 7 - Clasificación de las partículas del suelo rojo de Barcelona. Fuente: Barrera, 2002.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 8 - Parámetros del modelo de van Genuchten para el suelo rojo de Barcelona a diferentes índices de poros y densidades secas. Fuente: Barrera, 2002.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 9 - Valores de succión correspondientes a los niveles de saturación de los ensayos de infiltración en el laboratorio, a partir de la curva de retención medida para la arena. Fuente: Propia.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 10 Valores de saturación y succión para Arcilla de Barcelona.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 11 - Parámetros iniciales utilizados para la modelación en Code_Bright para la arena Lab-UPC.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 12 - Parámetros iniciales utilizados para la modelación de la arcilla del Campus Nord.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 13 - Valores del caudal medio medido a partir de las observaciones realizadas en el laboratorio con diferentes niveles de saturación para la arena. Fuente: Propia.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 14 - Valores del caudal medio medido a partir de las observaciones realizadas en el laboratorio con diferentes niveles de saturación para la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 15 - Pendientes de infiltración obtenidas a partir de las soluciones analíticas de las curvas de infiltración observadas para ambos materiales. Fuente: Propia.</i>	<i>52</i>

<i>Tabla 16 - Valores de infiltración obtenidos en la sección lineal asintótica de los gráficos de infiltración instantánea de la arena. Fuente: Propia.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 17 - Valores de conductividad hidráulica utilizando parámetros predeterminados por Carsel & Parrish (1988) a partir de las pendientes de las curvas de infiltración ajustadas para los ensayos en la arena. Fuente: Propia.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 18 - Parámetros calibrados para la modelación del ensayo de infiltración en Code_Bright para ambos materiales.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 19 - Valores de permeabilidad intrínseca (m²) utilizados para calibrar las curvas de infiltración en el modelo de Code_Bright para la arena.</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 20 - Conductividades hidráulicas resultantes utilizando las relaciones empíricas planteadas en el apartado 1.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 21 - Resultados experimentales de las conductividades hidráulicas para ambos materiales.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 22 - Cálculo de la conductividad hidráulica utilizando el método de Zhang-vG y los parámetros de la curva de retención medida en el laboratorio para la arena y por Barrera (2002) para la arcilla.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 23 - Cálculo de la conductividad hidráulica utilizando el método de Zhang-vG y los parámetros de la curva de retención predeterminados por los estudios de Carsel & Parrish (1988).</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 24 - Permeabilidad no saturada calculada utilizando la ecuación de vG (Ec. 8) para la conductividad relativa tomando como referencia la permeabilidad saturada calibrada en Code_Bright para la arena. Fuente: Propia.</i>	<i>77</i>

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos.

La interacción agua-suelo es de suma importancia para el entendimiento del comportamiento del medio geológico. Este proyecto de tesina se enfocará en la determinación y comparación de dichas propiedades mediante diferentes métodos empíricos y experimentales.

1.1.1 Objetivo principal.

- Determinación de los parámetros hidráulicos saturados y no saturados de dos tipos de suelo mediante un infiltrómetro de succión constante.

1.1.2 Objetivos secundarios.

- Análisis del efecto de la succión en la curva infiltración vs tiempo.
- Modelación del ensayo de infiltrómetro de minidisco utilizando parámetros experimentales y empíricos.
- Estudio de la factibilidad del ensayo de infiltración en suelos con diferentes niveles de saturación
- Estudio de la factibilidad del ensayo de infiltración en suelos de permeabilidades de diferentes órdenes de magnitud.
- Comparación de parámetros obtenidos a través de métodos empíricos y experimentales.

1.2 Antecedentes.

El conocimiento de la conductividad hidráulica de un determinado material beneficia a los ingenieros, agricultores y dueños de terrenos, ya que la velocidad en la que el agua se infiltra en el terreno determina el comportamiento del mismo y ulteriormente afecta todo lo que se produce y construye tanto en su superficie como debajo de la misma.

En las últimas décadas se ha utilizado este parámetro en estudio de transportes de contaminantes y diseño para depósitos de desechos peligrosos.

La conductividad hidráulica está asociada la velocidad con la que el agua se mueve a través de un determinado suelo, esto sucede tanto en condiciones saturadas como no saturadas y bajo un cierto número de condiciones físicas y químicas.

Los canales por donde circula el agua son de sección transversal muy variable e irregular, por ende, la velocidad de circulación cambia constantemente. De igual manera, la velocidad media se rige por las mismas reglas que determinan el escurrimiento del fluido en los tubos capilares rectos de una sección constante.

En suelos no saturados, el trayecto del agua es mucho más complicado, debido a que los macroporos se llenan de aire y esto define un trayecto más tortuoso del fluido dentro del medio

La gran mayoría de los autores en el ámbito geotécnico se refieren a este parámetro como la conductividad hidráulica no saturada o la permeabilidad relativa del material, la cual está directamente relacionada con las propiedades físicas del material como fundamentalmente el tamaño de grano.

Una forma tradicional de obtener la permeabilidad no saturada es a partir de datos obtenidos en infiltrómetros de succión carga constante utilizando la solución analítica de Wooding. Sin embargo, recientemente se están utilizando soluciones de modelos numéricos con flujo variable y optimización

de parámetros no lineales, cuya precisión depende altamente del tipo de suelo estudiado (D. Ventrella, et. al., 2004)

El infiltrómetro de tensión, es un equipo compacto y de uso relativamente sencillo en campo. Debido a las limitaciones mecánicas de los tamaños regulares de discos utilizados en el dispositivo, solo es posible la medición de una pequeña área y de manera superficial.

A diferencia de otros dispositivos que solo miden el flujo en condiciones saturadas, el infiltrómetro de tensión es funcional en suelos no saturados ya que permite obtener los parámetros hidráulicos saturados y no saturados a partir de su estado natural.

1.3 Relaciones empíricas para el cálculo de la permeabilidad saturada.

Numerosos estudios se han realizado para explicar la gran variabilidad de la conductividad hidráulica saturada con relación a la composición espacial del medio (Regalado, et. al., 2003)

Las relaciones empíricas son bastante utilizadas para obtener de manera rápida y aproximada la conductividad hidráulica saturada, utilizando como parámetro de referencia el diámetro medio de las partículas que conforman un porcentaje determinado del material.

Poiseuille (1840), plantea que si la sección del tubo es circular, la velocidad aumenta con el cuadrado del diámetro del tubo. El diámetro medio de los vacíos en un suelo con una porosidad determinada es directamente proporcional al tamaño de las partículas, tomando como base la siguiente Ley.

$$k_s = C * D^2 \quad (Ec. 1)$$

Poiseuille calcula la permeabilidad saturada (k_s) de un suelo cuya clasificación de tamaño de grano es conocida. Varios autores, Hazen (1909), Terzaghi (1973), Schlichter (1975), entre otros, crearon formulaciones para la determinación de las propiedades hidráulicas a partir de la relaciones físicas de las partículas en el suelo.

1.3.1.1 Fórmula de Hazen.

Es una de las ecuaciones empíricas más utilizadas para la determinación de la permeabilidad saturada de un suelo. Es principalmente empleada para casos de arenas sueltas con coeficientes de uniformidad menor o igual que 2.

$$k_s = C * D_{10}^2 \quad (Ec. 2)$$

Dónde:

C oscila entre valores de 100 a 150, para unidades de k en cm/s.

D₁₀ es el tamaño efectivo de las partículas en cm, donde se retiene el 90% del material que compone el suelo estudiado.

1.3.1.2 Fórmula de Terzaghi.

Terzaghi en su derivación de la fórmula de Hazen, modifica la constante C (Ec. 3) para que tome en cuenta la porosidad del material y el tipo de suelo.

$$C_1 = C_0 \left(\frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \quad (Ec. 3)$$

Dónde:

n, es la porosidad del material.

C₀ es un coeficiente que depende del suelo (tabla 1)

Tabla 1 Parámetros C₀ para ecuación 3 en función de la forma del grano del suelo granular. (Terzaghi, 1973)

Tipo de suelo	C ₀
Arena grano redondeado	800
Arena grano anguloso	460
Arena con finos	<400

De igual manera la proposición de Terzaghi se limita a suelos granulares y/o con algún porcentaje pequeño de finos.

1.3.1.3 Fórmula de Schlichter.

Por otro lado, Schlichter propone una corrección por compacidad de la función Allen Hazen (Ec 4) en función de la porosidad n (tabla 2).

$$k_s = 771 * \frac{D_{10}^2}{C} \quad (Ec. 4)$$

Tabla 2 - Coeficiente C para la ec. 4 de Schlichter en función del grado de compacidad del suelo. (Schlichter, 1975)

<i>n</i>	0.26	0.38	0.46
c	83.4	24.1	12.8

El valor de la permeabilidad es inversamente proporcional a la constante C, la cual esta relacionada con la permeabilidad. Una porosidad alta corresponde a un valor de C pequeño y por ende una mayor conductividad.

1.4 Suelos no saturados.

Los suelos cuyo volumen de poros no se encuentra completamente lleno de líquido, se consideran parcialmente saturados. Las características hidráulicas de estos materiales y su comportamiento ante los esfuerzos y deformaciones a los que pueden estar sometidos, en la naturaleza y/o condiciones controladas, difiere drásticamente de aquellos con una saturación cercana a/o del 100 %.

En un suelo saturado al cual se le aplique una sobrecarga no habrá consolidación, asumiendo la no compresibilidad de las partículas sólidas y del agua como fluido, hasta que se empiecen a disipar las presiones de agua en el medio.

Para un suelo parcialmente saturado este tipo de comportamiento no sucede, ya que los poros del material están llenos de una combinación deformable de aire y agua.

La distribución espacial del tamaño de poros es vital debido a que explica la heterogeneidad del suelo en una manera mucho más detallada que la porosidad y por ende su comportamiento. La magnitud de la porosidad difícilmente indica la complejidad de la estructura, siendo más inexacta a mayor grado de variabilidad.

Por ejemplo, la variación espacial de tamaño de poro es fundamental en el análisis de agregados para la construcción, permitiendo conocer los valores

máximos y mínimos para lograr un mejor efecto aglutinante con el material cementante.

Es bueno visualizar el espacio de los poros como una colección de canales a través del cual el líquido puede fluir. El ancho efectivo del canal varía a todo el largo del mismo, El "cuerpo" del poro son las porciones relativamente grandes y las "aperturas" son las pequeñas.

En un medio como la arena, los cuerpos de poros están dominados por el espacio intergranular de dimensiones un poco menores que los diámetros de las partículas adyacentes. En otro extremo, un agujero de gusano, es esencialmente uniforme en diámetro en todo su largo, puede ser considerado como un solo poro, siendo los límites de dicho poro; (1) interface con el sólido; (2) constricción - un plano a través de la porción más angosta del agujero; (3) la interfaz con otro poro o una región hidráulicamente distinta (Nimmo, 2004).

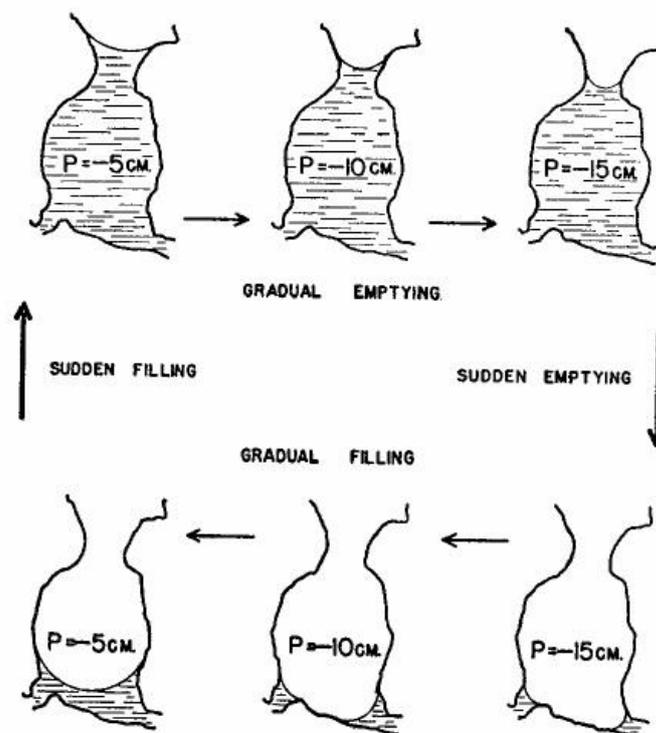


Figura 1 - Dinámica del fenómeno del salto de Haines. Tomado de: "Porosity and Pore Size Distribution" p.4 (Nimmo, 2004).

La equivalencia de la capilaridad de los poros es especialmente relevante para el comportamiento hidráulico y es utilizada para explicar el fenómeno básico de histéresis capilar conocido como "Haines Jumps" o saltos de Haines (figura 1). Las aperturas de los poros, que son menores que los cuerpos principales de las cavidades, controlan la presión matricial a la que los espacios pierden el fluido y los grandes la presión de entrada de líquido.

En la figura se observa que a medida que el medio se seca, la presión disminuye, el agua se retira gradualmente y la interface aire-líquido se vuelve más curva. En la parte más angosta de la apertura del poro, esta interface no puede aumentar de curvatura por lo que se retira a un canal diferente.

En el proceso de mojado se produce un comportamiento análogo, cuando la interface de curvatura no soporta el radio máximo del poro, este se llena drásticamente, pero a diferencia que su proceso contrario, esto solo afecta de esta manera a poros individuales, es decir que dicho efecto no se produce simultáneamente.

El tamaño de poro se relaciona directamente a un radio efectivo dado por la apertura o por el cuerpo del mismo. Este radio controla las presiones en las que los saltos de Haines ocurren. La distribución de los tamaños de poro es la abundancia de cada tamaño de poro en un volumen representativo de suelo, la cual puede ser representada en función de este radio efectivo.

En suelos no saturados, una de las consecuencias más comunes de la influencia de esta distribución es en la curva de retención de un material. Un punto de inflexión en un rango observado representa un efecto de Haines, es decir, un punto de valor de entrada de aire en los poros. Estos fenómenos están definidos por picos en la distribución de los poros siempre y cuando los demás segmentos de la curva estén bien definidos. Esto es muy común en muestras compactadas donde los poros con un radio mayor han sido eliminados.

En la figura 2, se muestra un ensayo con un porosímetro de mercurio en muestras compactadas por la rama húmeda y seca a una misma energía de

Proctor. Los picos indican una mayor cantidad de poros del tamaño representado en el eje de las x.

Tanto en la rama húmeda (WW) como en la rama seca (DD), el tamaño de microporos es del orden de 10 nanómetros. Esto indica que en un proceso de secado del espécimen el valor de presión necesario para la salida del agua de los mismos, está controlado por la interfaz aire-agua creada en los radios de las aperturas de estos poros predominantes.

De manera análoga, los valores de 1 μm y 10 μm , para la rama húmeda y seca respectivamente, corresponden al radio efectivo de los macroporos.

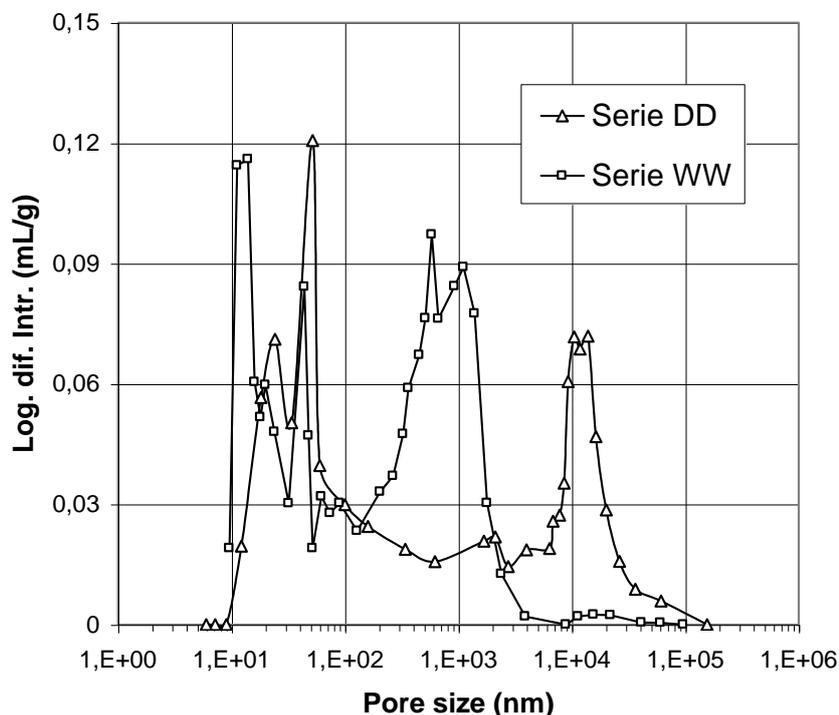


Figura 2 - Porosimetría de especímenes compactados de la arcilla limosa de Barcelona. (Gens, Alonso, Suriol & Lloret, 1995)

1.5 El modelo de van Genuchten.

La formulación de van Genuchten es una de las más populares y de uso común para describir el modelo de la curva de retención de un medio no

saturado. Este modelo determina el comportamiento físico del suelo en cualquier proceso hidrogeológico donde se utilice. En un medio saturado el agua fluye a través del suelo a una velocidad definida por la conductividad hidráulica.

Si el contenido de agua y la conductividad son medidos para una determinada succión, los parámetros de van Genuchten pueden ser determinados. Esto puede ser llevado a cabo mediante cualquier código o programa utilizado para resolver problemas no lineales. (Chou T.K., 2016).

Este modelo fue propuesto por van Genuchten (1980) utilizando la siguiente expresión:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad (Ec. 5)$$

Donde θ es el contenido de agua del suelo (cm^3/cm^3),

θ_r es el contenido de agua residual del suelo (cm^3/cm^3),

θ_s es el contenido de agua del suelo saturado,

h es el potencial (kPa),

α es un parámetro de escala inversamente proporcional a la medio del diámetro de poros,

n y m son parámetros de forma de la curva de retención del suelo.

Obtener estimados confiables de la conductividad hidráulica no saturada es especialmente difícil de lograr, en gran parte debido a la gran variabilidad de este parámetro y debido a que toma mucho tiempo y es bastante costoso.

En 1976, Mualem derivó un modelo para predecir la conductividad hidráulica no saturada a partir del conocimiento de la curva de retención y la conductividad a nivel saturado.

$$K_r = \theta^{0.5} \left[\frac{\int_0^\theta \frac{1}{h(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx} \right]^2 \quad (Ec. 6)$$

Siendo θ el contenido volumétrico de agua con relación a los vacíos de la muestra. Maulem plantea en la ecuación 6 que la permeabilidad relativa es un cociente que depende de una función del potencial presente en la muestra tanto en su estado no saturado ($0 \leq \theta < 1$) como en el saturado ($\theta=1$).

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (Ec. 7)$$

Van Genuchten en su trabajo científico de 1980 utilizando una ecuación general (Ec. 7) que relaciona el contenido volumétrico de agua con el potencial de la muestra, plantea la creación de un modelo, a partir de la derivación de Maulem, que pueda predecir la conductividad hidráulica utilizando solo parámetros de su curva de retención.

Resolviendo la ecuación 6 y sustituyendo el contenido volumétrico de agua (Ec. 7) obtenemos una ecuación para la conductividad relativa en función del potencial de la muestra. En esta tesina, se utiliza esta ecuación como referencia para el cálculo de conductividad hidráulica de los materiales ensayados.

$$K_r = \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (Ec. 8)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Van Genuchten, realizó comparaciones de los resultados obtenidos de su modelo ante datos experimentales para diferentes materiales cuyos valores de curva de retención y conductividad hidráulica eran conocidos.

Entre estos están, "arenisca Hygiene (3), de Northern Colorado y marga limosa de Touchet (4) (Brooks y Corey 1964); Arcilla Beit Netofa (5) (Rawitz, 1965); Marga limosa G.E.3.(6) (Reisenauer, 1963)" van Genuchten 1980.

En las figuras 3 a 6 se muestran los valores predichos contra los valores de la curva de retención ajustada con el modelo de van Genuchten.

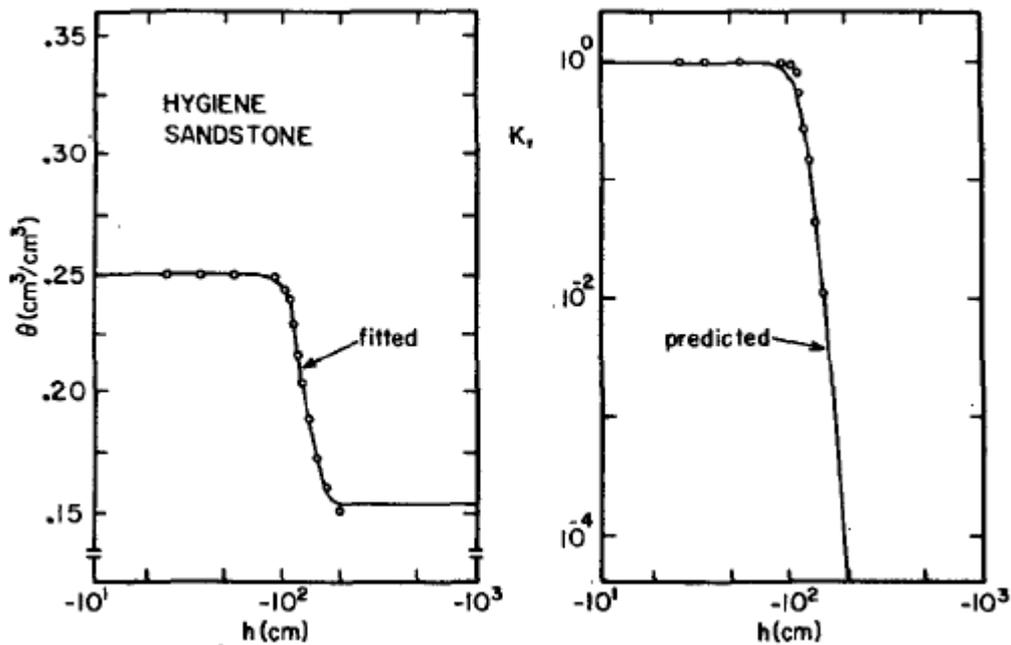


Figura 3 - Valores observados (círculos) y curvas calculadas (líneas) de las propiedades hidráulicas de la arenisca Hygiene. Izquierda: Contenido de agua volumétrico vs succión del material, derecha: Conductividad relativa vs succión del material. Fuente: van Genuchten 1980, SOIL. SCI. SOC. AM. J. VOL 44 p. 896

La arenisca y la marga limosa ensayadas por Brooks y Corey muestran zonas centrales de la curva de retención muy inclinada (figuras 3a y 3b), esto se relaciona directamente con altos valores del parámetro n del modelo de van Genuchten.

En materiales donde la distribución de tamaño de poros se encuentra mayormente concentrada en un tamaño específico, al humedecer la muestra se produce una caída repentina, salto de Haines, de la succión al alcanzar el valor de presión de entrada de los poros dominantes.

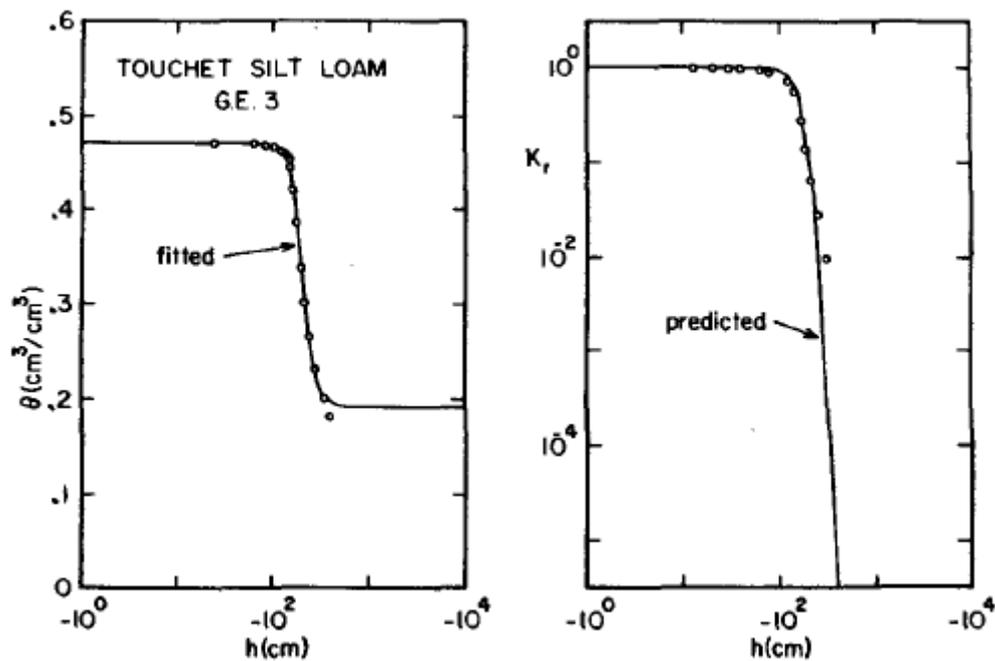


Figura 4 - Valores observados (círculos) y curvas calculadas (lineas) de las propiedades hidráulicas de la Marga Limosa Touchet. Izquierda: Contenido de agua volumétrico vs succión del material, derecha: Conductividad relativa vs succión del material. Fuente: van Genuchten 1980, SOIL. SCI. SOC. AM. J. VOL 44 p. 896

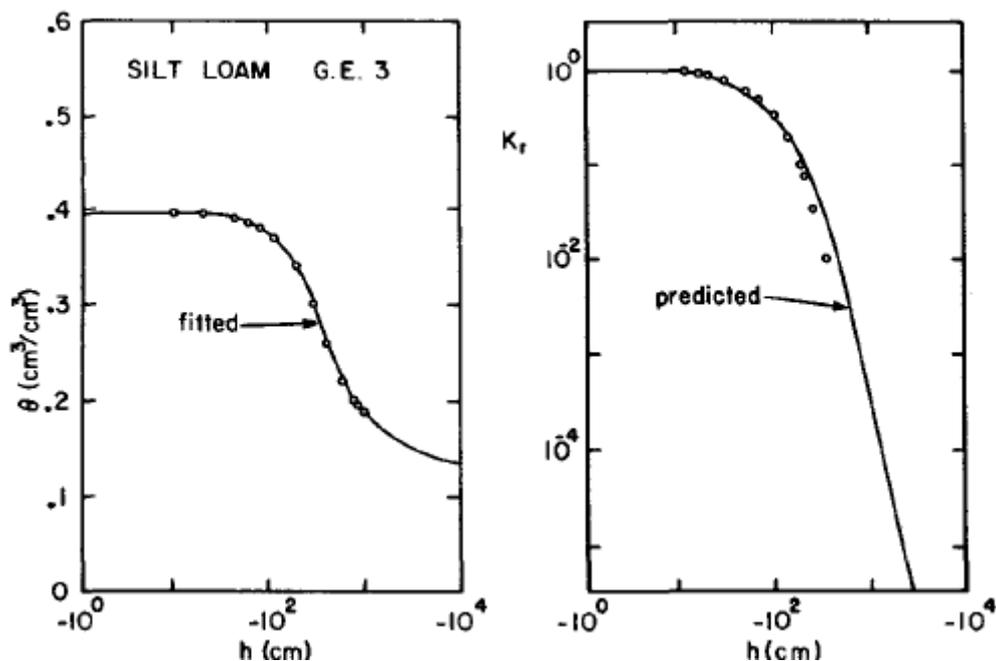


Figura 5 - Valores observados (círculos) y curvas calculadas (lineas) de las propiedades hidráulicas de la Marga Limosa G.E. 3. Izquierda: Contenido de agua volumétrico vs succión del material, derecha: Conductividad relativa vs succión del material. Fuente: van Genuchten 1980, SOIL. SCI. SOC. AM. J. VOL 44 p. 897

Sin embargo, los materiales de marga limosa en las figuras 4 y 5, muestra una curva mucho menos inclinada debido a un valor más pequeño de n . Esto indica una distribución de poros más homogénea y por lo tanto diferentes puntos de presión de entrada.

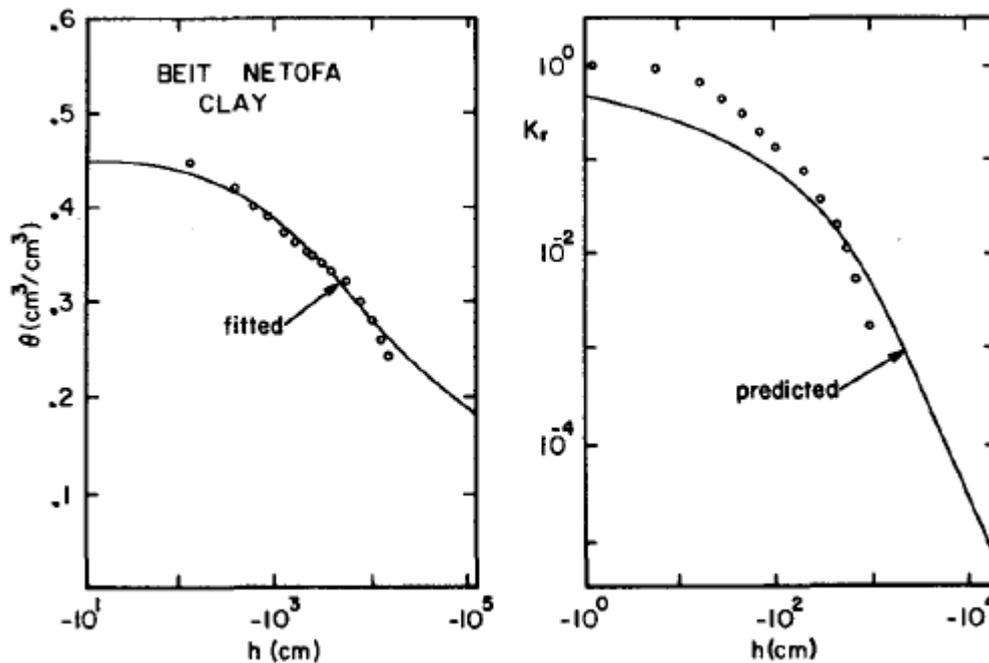


Figura 6 - Valores observados (círculos) y curvas calculadas (líneas) de las propiedades hidráulicas de la Arcilla Beit Neofa. Izquierda: Contenido de agua volumétrico vs succión del material, derecha: Conductividad relativa vs succión del material. Fuente: van Genuchten 1980, SOIL. SCI. SOC. AM. J. VOL 44 p. 897

Por otro lado, van Genuchten resaltó una anomalía en las comparaciones de la arcilla (figura 6). Los valores de contenido volumétrico de agua residual θ_r resultaron en 0 utilizando su modelo, lo que es poco probable para una material de arcilla que generalmente posee un valor mucho más alto que los suelos de grano grueso. Se puede apreciar que las conductividades relativas se encuentran dentro del mismo rango, para valores de succión similares, independientemente de la conductividad saturada.

1.6 Método de Zhang-van Genuchten.

El fabricante del equipo utilizado en el ensayo de infiltración, pone a disposición del usuario una hoja de Excel pre-programada que permite el

cálculo de la conductividad hidráulica del material a partir de los datos obtenidos de lectura acumulada del volumen y el tiempo.

Para esto se emplea un método desarrollado por Zhang (1997) a partir de los parámetros del modelo de van Genuchten. La ecuación de la infiltración plantea que el volumen de agua que atraviesa una superficie de suelo es una función que depende de la permeabilidad del mismo y el potencial de sortividad del suelo (Ec. 9).

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde C_1 está relacionado con la conductividad hidráulica (k_s) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) y C_2 con la sortividad del material (p) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-0.5}$).

$$k = \frac{C_1}{A}$$

C_1 es la pendiente de la curva de la infiltración acumulada contra la raíz cuadrada del tiempo y A es el valor que relaciona los parámetros de van Genuchten con la succión aplicada y el radio del disco poroso del infiltrómetro.

El valor de A puede ser determinado con las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp[2.92(n - 1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad n \geq 1.9 \quad (\text{Ec. 10})$$

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp[7.5(n - 1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad n < 1.9 \quad (\text{Ec. 11})$$

Dónde:

n y α son los parámetros del modelo de vG.

r_0 es el radio del disco poroso.

h_0 es la succión aplicada con el infiltrómetro.

Los parámetros de van Genuchten utilizados para el cálculo de los diferentes valores de A empleados en la hoja de cálculo del infiltrómetro fueron tomados de Carsel y Parrish (1988).

Estos valores de A se encuentran tabulados en 2 tablas para diferentes radios de disco en anexos.

Para suelos con un parámetro n menor a 1.35, Dohnal (et. al. 2010) propone un cambio a la ecuación de Zhang (Ec. 11).

$$K = \frac{C_1 (\alpha r_0)^{0.6}}{11.65(n^{0.82} - 1)\exp[34.65(n - 1.19)\alpha h_0]} \quad (\text{Ec. 12})$$

2. CAPÍTULO II: MATERIALES ENSAYADOS

En esta tesis se realizan ensayos a dos tipos de suelo distintos; el primero, una arena de grano medio a fino con algunas partículas de limo, y el suelo rojo del Campus Nord, el cual ya ha sido bastante ensayado por la facultad de ingeniería, por lo que se conocen gran parte de las características del material.

2.1 Arena LAB-UPC.

La arena utilizada (figura 7) en los ensayos fue tomada del laboratorio de geotecnia de Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). A simple vista es una arena fina con un cierto porcentaje de finos, presencia de materia orgánica, vegetación y trozos pequeños de conchas marinas, indicando un origen de alguna de las zonas de playa de Barcelona.



Figura 7 - Fotografía de la arena utilizada para los ensayos de infiltración. Fuente: Propia.

Como uno de los objetivos de esta tesina consiste en el uso del infiltrómetro en materiales de diferentes espectros de tamaño de partículas, se procedió a eliminar gran parte del material con un diámetro de partícula pasante del tamiz no.100 (0.1mm).

Se realizó un ensayo de clasificación de tamaño de grano, granulometría (ASTM D 6913), para obtener la distribución de partículas del material luego de lavado. La distribución se muestra en la tabla y gráfico a continuación.

La figura 8 muestra la distribución granulométrica del material y la tabla 3 presenta los valores del porcentaje en peso del material que pasa los tamices.

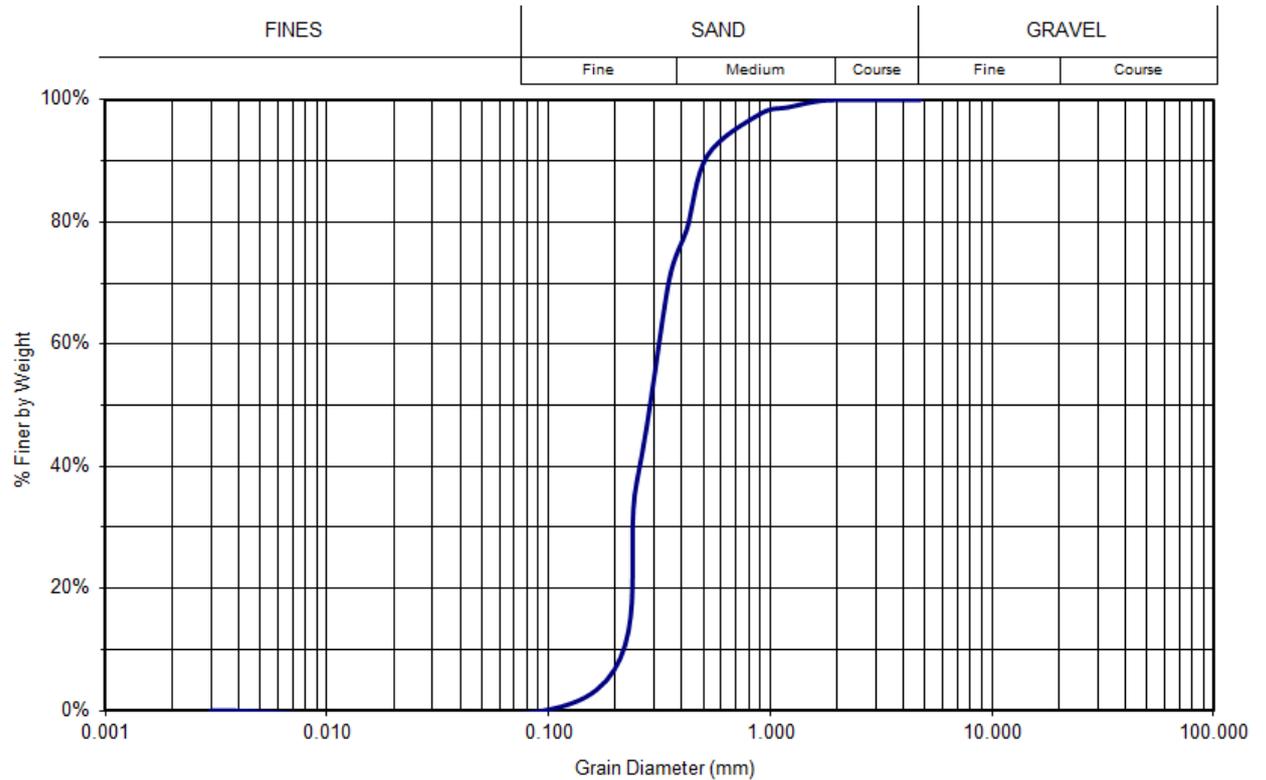


Figura 8 - Distribución granulométrica de la Arena Lab-UPC utilizada para los ensayos de infiltración. Fuente: Propia.

Tabla 3 - Material pasante en porcentaje y tamices utilizados para la Arena Lab-UPC.

No. de tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	Material que pasa (%)
4	4.55	100.00%
10	2	99.98%
13	1.6	99.73%
16	1.2	98.79%
20	0.9	97.70%
-	0.52	90.86%
40	0.42	78.74%
-	0.35	70.51%
60	0.25	37.44%
100	0.1	2.09%
Pan	0.00295	0.01%

Gráficamente obtenemos que los diámetros D_{60} , D_{30} , y D_{10} , son de 0.29, 0.20 y 0.16 mm respectivamente. Utilizando las relaciones para el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c) obtenemos un $C_c = 1.12$ y

un $C_u = 2.38$. Estos valores corresponden a un tipo de suelo mal graduado según la clasificación AASHTO.

Con el objetivo de determinar la densidad de partículas del material, se siguió el procedimiento acorde con la norma ASTM D 854, con el picnómetro de alcohol, para la obtención de la densidad de las partículas sólidas o gravedad específica de un suelo granular pasante del tamiz No. 4 (4.75 mm).

La gravedad específica de un suelo, G_s , es usada para calcular la relación entre las fases del suelo, tales como, la relación de vacío y la saturación. Este valor comprende las partículas minerales naturales que no son solubles en agua.

El picnómetro utilizado, es un frasco volumétrico con capacidad de 500 ml. El peso del recipiente lleno de alcohol, es tomado luego de un período de 24 horas de haber estado sumergido a una temperatura constante para evitar variaciones de densidad.

Posteriormente se introduce un peso conocido de material y se equilibra la temperatura nuevamente, el cociente de la diferencia de peso sobre el volumen de líquido desplazado corresponde a la densidad de las partículas sólidas de la arena. El valor resultante de la densidad de las partículas fue de 2.61 g/cm^3 .

Para los ensayos, se eligió el valor de densidad seca γ_d de 1.55 g/cm^3 , siendo este el rango en el cual se obtuvo la curva de retención del material. Mediante la relación mostrada en la ecuación 13, se calculó la relación de vacíos necesaria para la determinación del porcentaje de saturación de la muestra.

$$e = \left[\frac{G_s \rho_w (1 + w)}{\rho} \right] - 1 \quad (\text{Ec. 13})$$

Dónde:

e es la relación de vacío (cm^3/cm^3).

ρ_w es la densidad del agua (g/cm^3).

w es la humedad de la muestra.

ρ_w Es la densidad húmeda de la muestra.

El valor resultante es una relación de vacíos $e=0.60$ el cual corresponde a un material mal gradado y de granos relativamente uniformes.

2.1.1 Ensayo de permeabilidad con carga constante.

Se realizaron varios ensayos para la determinación en laboratorio de la conductividad hidráulica del material arenoso. Entre estos, ensayo de carga variable y carga constante.

El ensayo de carga constante (ASTM D 2434) cubre la determinación del coeficiente de permeabilidad bajo un método de potencial constante para flujo laminar de agua a través de suelos granulares, aunque está limitado a suelos que no contengan más de un 10 % de material pasante del tamiz #200 (75- μm).

Se utilizó el equipo de carga constante del laboratorio de la UPC, el mismo consta de un depósito de agua cuyo nivel se gradúa a una altura específica para proporcionar un flujo fijo hacia un cilindro donde se encuentra el material figura 9.



Figura 9 - Fotografía tomada del equipo de permeabilidad de carga constante UPC.
Fuente: Propia.

Como se observa en la figura 9, este potencial es aplicado en una distancia de 15 cm mediante las 3 tuberías ensambladas en el cilindro, lo que crea un gradiente hidráulico posible de calcular. Teniendo la información sobre las dimensiones del cilindro donde se encuentra el material conocido y midiendo un caudal de agua, se puede aplicar la Ley de Darcy (Ec. 14) para obtener la permeabilidad saturada del suelo.

$$\frac{Q}{A} = -ki \quad (\text{Ec. 14})$$

Despejando la conductividad hidráulica obtenemos que:

$$k = -\frac{Q}{iA}$$

Dónde:

A es el área de la sección transversal donde se produce el flujo laminar (L²).

Q es el volumen de fluido registrado en un lapso de tiempo determinado (L³T⁻¹).

i es el gradiente hidráulico dado por la diferencia de potencial que se produce en el recorrido del fluido (L.L⁻¹)

El valor promedio resultante es de 1.68x10⁻⁴ m/s, el cual es común en arenas finas. Tabla de resumen de resultados en anexos

2.1.2 Ensayo de permeabilidad con carga variable

Para el ensayo de carga variable se empleó un recipiente cilíndrico de metal de dimensiones de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura. Mediante una tubería vertical llena de fluido en la parte superior del recipiente, controlada con una válvula de cierre, se tomó el tiempo que le tomaba el agua llegar a diferentes niveles de la tubería atravesando la arena dentro del recipiente. En la figura 10, se puede observar un diagrama con las partes del equipo y variables utilizadas.

Derivando la ecuación de Darcy (Ec. 14) para flujo variable en el tiempo se determinó la permeabilidad saturada de la arena dentro del recipiente.

$$\ln \frac{y_0}{y(t)} * \frac{La}{At} = k \quad (Ec. 15)$$

Dónde:

K es la permeabilidad saturada del suelo en cm/s

d es el diámetro del tubo del fluido en cm.

D es el diámetro del recipiente con el suelo en cm.

L es la altura del recipiente en cm.

y(0) es el altura inicial del fluido.

y(t) es la altura del fluido en el tiempo t.

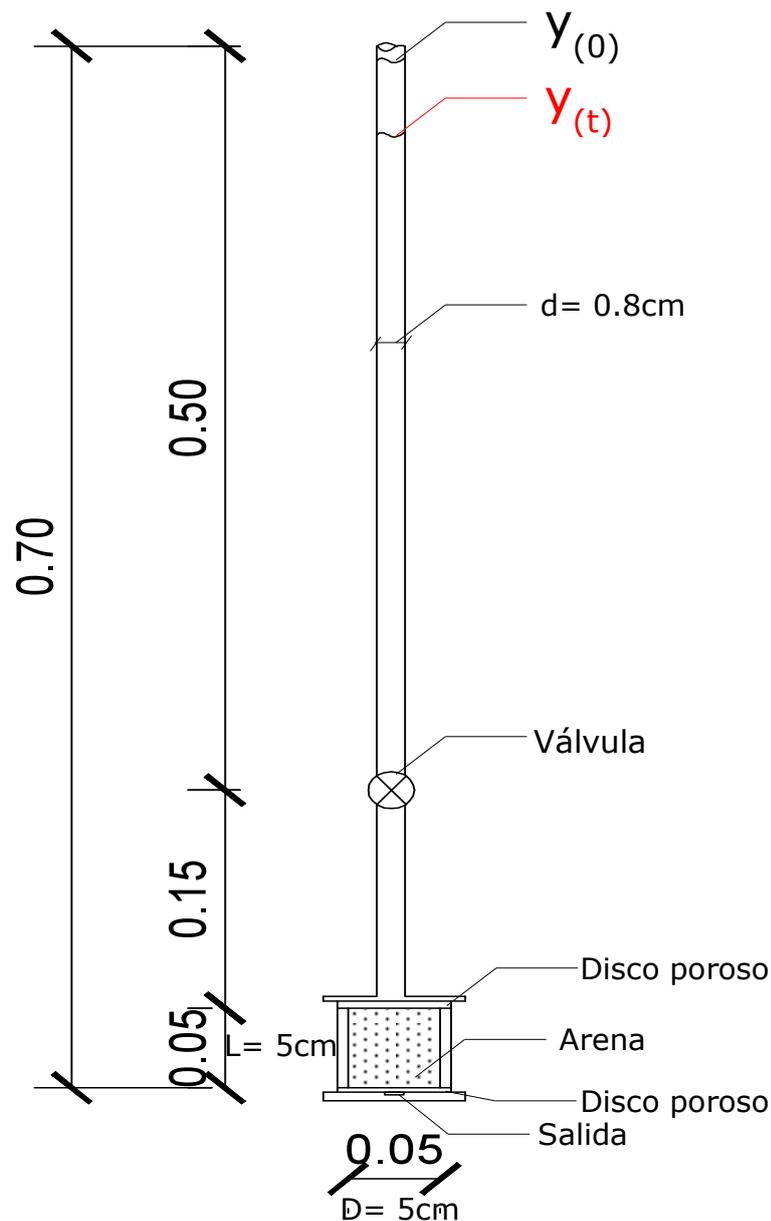


Figura 10 - Diagrama del equipo de permeabilidad con carga variable. Fuente: Propia.

En anexos se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos de la cantidad de ensayos realizados cuyo valor promedio es de 7×10^{-5} m/s.

2.1.3 Obtención de las curvas de retención de la arena.

Todo el movimiento del agua en suelos depende directamente de la tensión del fluido, tanto dentro del medio como en la superficie, dado que el flujo sucede desde un punto con mayor potencial a uno de menor magnitud.

Para la obtención de la curva de retención de la arena, se dispuso de un tensiómetro transductor de presión T5 manufacturado por UMS. El tensiómetro miniatura T5 está específicamente diseñado para mediciones puntuales, como en columnas de suelo o puntos de interés pequeños.

El dispositivo posee una superficie activa de 0.5 cm² y un diámetro de 5 mm en la punta de cerámica que permite una rápida respuesta y una baja alteración de la zona de medida.

El cuerpo del sensor está compuesto por cristal acrílico donde está contenido el transductor de presión. Este recipiente se encuentra sellado con resina para asegurar un seguro hermético a prueba de agua.

El transductor es un sensor de presión piezoeléctrico que compara la tensión del agua del suelo a la presión atmosférica. Esta presión de referencia es tomada del ambiente a través de un diafragma de membrana de teflón a prueba de agua, de 2 cm de largo, en la parte superior del cuerpo del sensor.

Finalmente, para transferir la tensión del agua del suelo como una presión negativa dentro del tensiómetro, es necesario un diafragma semi-permeable. La punta de cerámica antes mencionada consiste en una copa porosa de un material sintético a base de Al₂O₃ (Manual T5, UMS, V12-2009).

En el momento de la toma de medidas, el transductor de presión muestra la tensión del fluido como una señal eléctrica lineal de salida, donde 1mV equivale a 1 kPa. Para la visualización de los resultados es necesario el uso de un dispositivo de adquisición de datos, data logger, o una consola portátil, como la utilizada en este caso, el INFIELD 7(figura 11), también fabricado por UMS.



Figura 11 - Composición del equipo de medición de succión, tensiómetro T5 (UMS) e Infield 7 (UMS). Fuente: Propia

El material se colocó en un recipiente de metacrilato de dimensiones conocidas y se compactó a una densidad seca constante de 1.55 g/cm^3 en diferentes porcentajes de saturación. Este se realiza para obtener el mismo comportamiento de la curva de la succión a medida que el contenido de agua en el suelo cambia.

La tabla 4 muestra las densidades en las cuales se tomaron las medidas y los valores de succión correspondientes a los diferentes niveles de contenido de humedad.

Tabla 4 - Valores de succión medidos para diferentes niveles de saturación, dentro del mismo rango de densidad seca para la arena utilizando un tensiómetro T5.
Fuente: Propia.

Succión		Saturación	P_d
(kPa)	(m.c.a.)	%	g/cm^3
0.10	0.010	90%	1.51
1.40	0.143	80%	1.51
3.50	0.357	65%	1.55
4.00	0.408	57%	1.55
4.00	0.408	44%	1.54
4.00	0.408	36%	1.54
5.25	0.535	22%	1.55
7.00	0.714	16%	1.54
100	10.24	5%	1.56

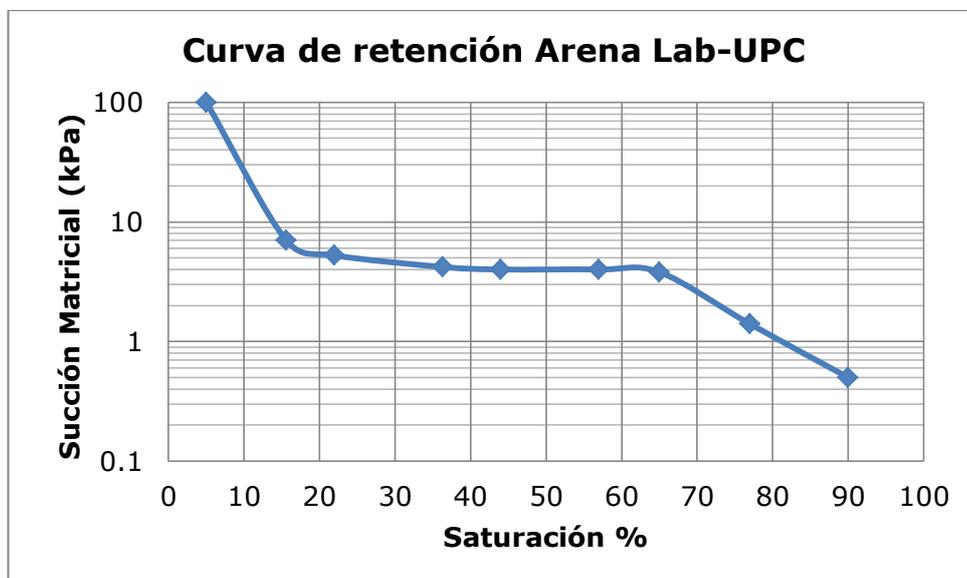


Figura 12 - Puntos de succión medidos (kPa) en el laboratorio para la Arena Lab-UPC con el tensiómetro. Fuente: Propia.

Para la determinación de los parámetros de van Genuchten de la curva de retención se empleó un código para resolución de problemas no lineales adaptado a una interface gráfica y compilado por T.K. Chou (2016).

Para calcular los valores del modelo de vG, se resuelven las ecuaciones 16 y 17, y se verifican mediante una operación de mínimos cuadrados para comprobar la calidad del arreglo obtenido.

$$Se = \begin{cases} [1 + |\alpha H_p|^n]^{-m} & H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (Ec. 16)$$

$$k_r = Se^l [1 - (1 - Se^{-m})^m]^2 \quad (Ec. 17)$$

La ecuación 16 es una equivalencia en función de la succión de la muestra de la mostrada en el apartado de van Genuchten, dónde:

α está relacionado al inverso de la succión (m^{-1}).

n y m son parámetros de forma de la curva de van Genuchten.

H_p es la succión en m.c.a..

k_r es la conductividad relativa del suelo.

K_s es la conductividad hidráulica saturada.

K es la conductividad intrínseca del suelo.

La curva de retención resultante se muestra en la imagen 13 y los parámetros obtenidos en la tabla 5. Como se puede observar, el valor de n es bajo por lo que se muestra una curva bastante suavizada y por consiguiente denota una distribución con poca dispersión en los tamaños de poros en la muestra compactada.

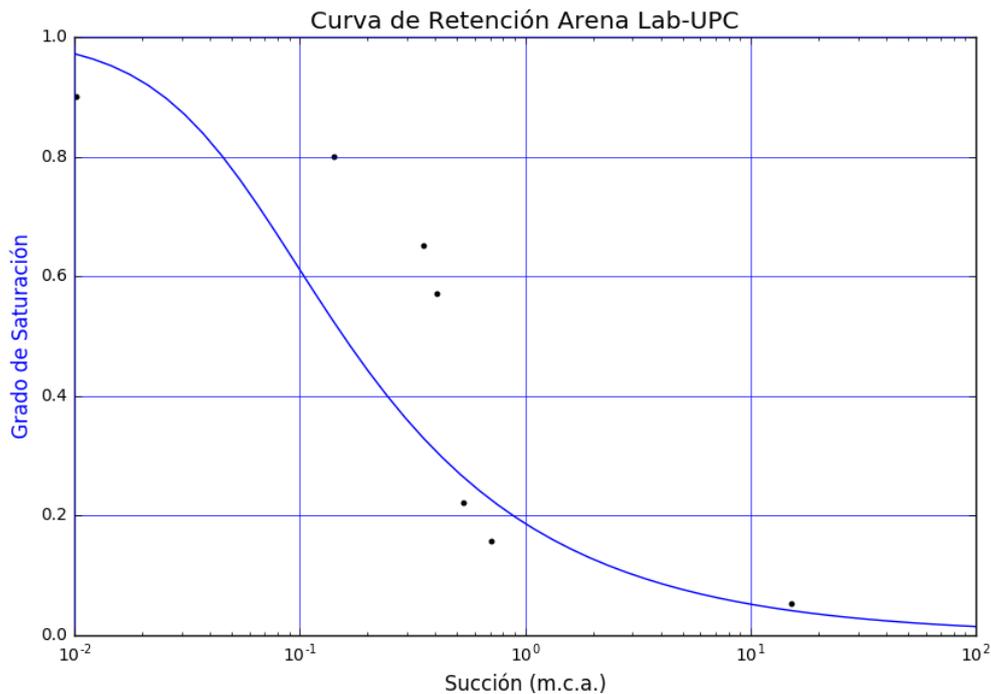


Figura 13 - Gráfico de la solución de van Genuchten para la curva de retención medida en el laboratorio. Valores medidos (puntos), solución analítica (líneas). Fuente: Propia.

La succión más alta medida en la muestra fue de alrededor de 100 kPa o 10.24 m.c.a., debido a que es la succión máxima medida por el tensiómetro sin permitir la entrada de aire en la copa de cerámica.

Tabla 5 - Parámetros de van Genuchten obtenidos para la arena a partir de los valores de succión medidos y resueltos en el vG-Solver. Fuente: Propia.

Parámetros curva de retención		
ρ_d	1.55	g/cm ³
α	16.638	m ⁻¹
n	1.58	
m	0.367	
RMS	3.2873x10 ⁻¹	

2.2 Suelo Campus Nord

El suelo del Campus Nord es el tipo de suelo más abundante de la zona de Barcelona. Los elementos que lo componen datan del período Cuaternario y están constituidos por arcilla roja, limo de color marrón con espesores de cementación calcárea de hasta un metro.

Las tablas 6 y 7 muestran la distribución granulométrica mediante tamizado y sedimentación realizada por Barrera (2002) acorde con la norma ASTM D 854.

Tabla 6 - Distribución granulométrica para el suelo rojo de Barcelona realizada a partir de tamices y ensayo de sedimentación para la porción fina de la muestra. Fuente: Barrera, 2002.

No. de tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	Material que pasa (%)
16	1.18	100
40	0.425	83.31
100	0.15	67.99
200	0.075	60.59
Sedimentación	0.04	50.62
	0.02	38.33
	0.005	22.87
	0.002	16.13

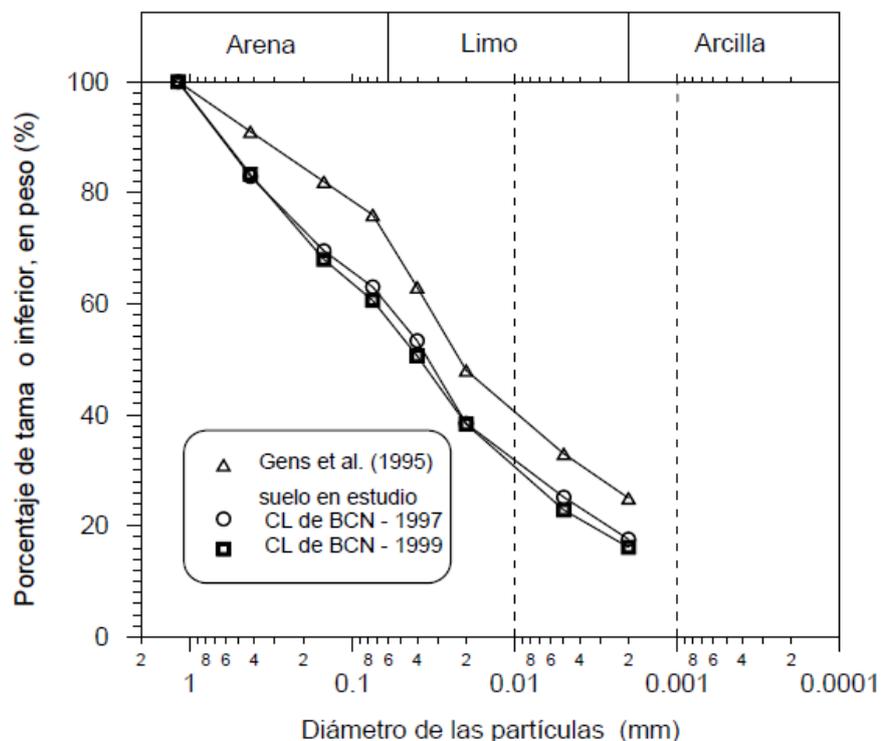


Figura 14 - Análisis granulométrico para la arcilla roja de Barcelona. Fuente: Barrera, 2002, Secc. 4.

En la figura 14 se puede observar la curva granulométrica del material estudiado (1997 y 1999). Extrapolando la curva del tamaño de grano a un

porcentaje de material pasante del 10%, obtenemos un diámetro de partícula de aproximadamente 0.0009 mm.

Utilizando la formula empírica de Hazen (Ec 2) obtenemos una conductividad hidráulica saturada del orden de 8.1×10^{-9} m/s.

Tabla 7 - Clasificación de las partículas del suelo rojo de Barcelona. Fuente: Barrera, 2002.

Definición	Datos de laboratorio
Tipo de partícula:	
Arena	39.40%
Limo	44.50%
Arcilla*	16.10%
Características:	
ps	2.71 g/cm ³

2.2.1 Obtención de las curvas de retención de la arcilla.

La succión total fue medida por Barrera (2002) luego de ensayos de compactación a diferentes contenidos de agua y densidades secas. Cada curva (figura 15) representa la trayectoria de la succión a diferentes puntos de saturación para una misma densidad seca. Estos valores de succión fueron tomados usando un psicrómetro de transistor (Woodburn *et al.*, 1993).

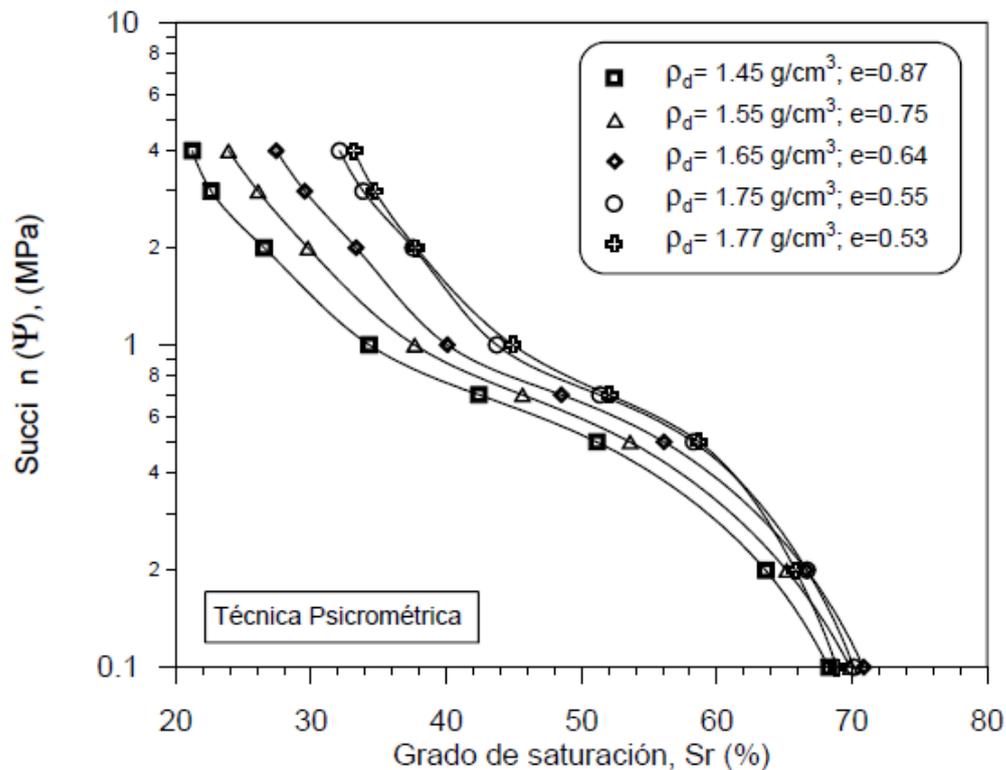


Figura 15 - Curvas de succión vs el grado de saturación a diferentes densidades secas del suelo rojo de Barcelona. Fuente: Barrera, 2002, Secc. 4.

En esta investigación se tomó en cuenta una densidad seca del material arcilloso de 1.63 g/cm^3 para todos los ensayos de infiltración y se tomaron como referencia los valores de succión obtenidos para dicha densidad seca mostrados en la tabla 8.

Tabla 8 - Parámetros del modelo de van Genuchten para el suelo rojo de Barcelona a diferentes índices de poros y densidades secas. Fuente: Barrera, 2002

e	ρ_d (g/cm^3)	α (MPa^{-1})	m	n
0.87	1.45	15.25	0.27	1.38
0.75	1.55	15.95	0.25	1.34
0.64	1.65	17.6	0.23	1.3
0.55	1.75	23.8	0.2	1.24
0.53	1.77	27.8	0.19	1.23

Los parámetros de van Genuchten calculados por Barrera (2002) para la densidad de 1.65 g/cm^3 se utilizaron para la modelación de la curva de retención en CODE_BRIGHT.

Barrera, comparó las curvas experimentales con las obtenidas mediante del modelo de van Genuchten. Se observa una buena representación de los cambios de succión a medida que aumenta la saturación de la muestra (figura 16).

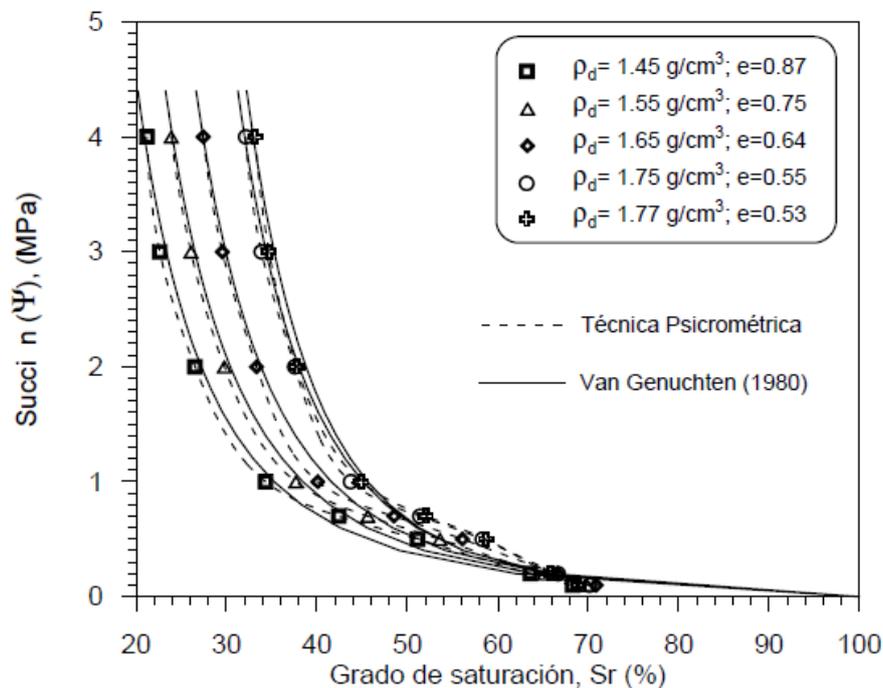


Figura 16 - Comparación de las curvas de retención obtenidas a través de la técnica psicrométrica y la solución de van Genuchten para distintos valores de densidad seca del suelo rojo de Barcelona. Fuente: Barrera, 2002, Secc. 4.

Para la obtención de la conductividad hidráulica saturada, durante el proceso de saturación de la muestra en un ensayo utilizando un equipo triaxial automatizado GDS, Barrera (2002), midió el volumen de agua que atravesaba la muestra durante un período de tiempo determinado.

La confirmación de la saturación completa de la muestra se logra mediante la medición del volumen de la misma. Al ser consolidada isotrópicamente, disminuyen los tamaños de poros del material hasta que se observa un aumento de las presiones de agua igual al aumento de presión en la cámara (figura 17).

El valor resultante de conductividad hidráulica es de 2.54×10^{-9} m/s.

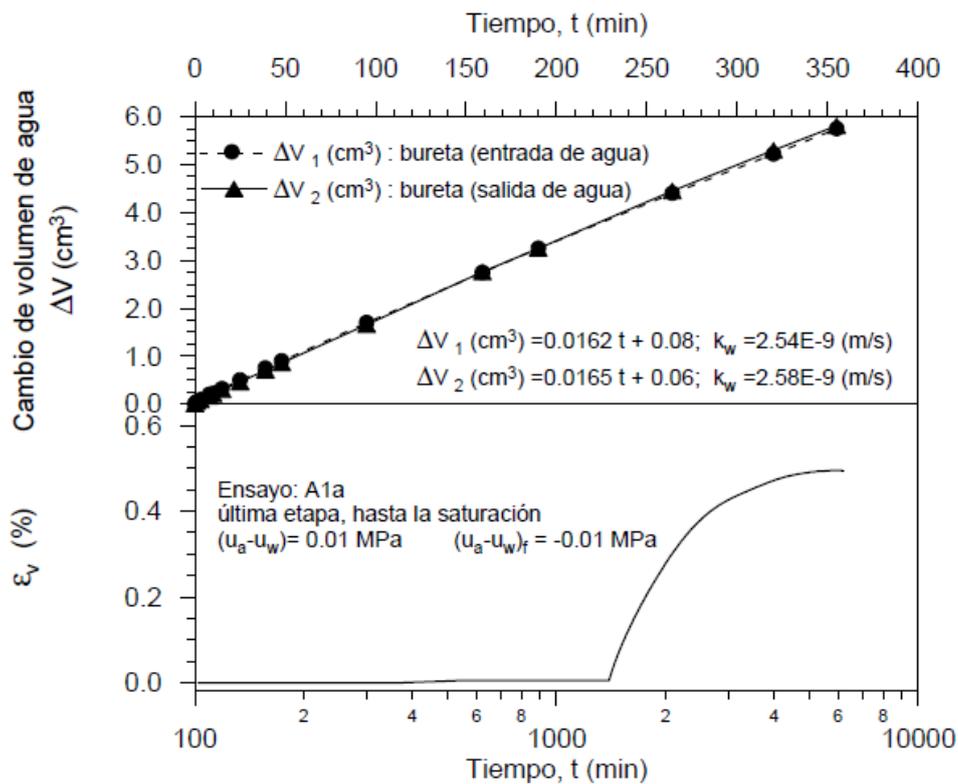


Figura 17 – Medición de la conductividad hidráulica en la fase de saturación a carga constante del suelo rojo de Barcelona en un ensayo triaxial GDS. Fuente: Barrera, 2002, Secc. 4.

3. CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este trabajo se divide en varios procesos experimentales con el fin de analizar la gran cantidad de teorías e hipótesis que a lo largo de los años se han desarrollado para el cálculo de los parámetros hidráulicos que tanto influyen en el comportamiento de los suelos.

Todas las fases se realizan de manera paralela una de otra, empleando parámetros obtenidos de manera empírica y experimental. Cada uno de los procesos es descrito individualmente en los acápites siguientes.

3.1 Infiltrómetro de tensión.

Este ensayo constituye la parte principal de esta investigación, consiste en el empleo de un infiltrómetro de tensión para determinar el volumen de agua que se infiltra sobre la superficie de un material en un tiempo determinado.

El infiltrómetro mejor conocido por su nombre en inglés "Mini Disk Infiltrometer" manufacturado por DECAGON DEVICES, Inc. es un modelo renovado del permeámetro de disco utilizado por Perroux y White (1981).

El modelo original consiste en un tubo cilíndrico de nylon de hasta 5 centímetros de diámetro con un depósito de agua y una torre de burbuja. La torre de burbuja es una columna de agua y gas que regula la entrada de aire al depósito y controla el potencial aplicado sobre el disco poroso, este potencial puede ser ajustado mediante la variación de la altura de agua en la torre.

3.2 Descripción del ensayo de infiltración.

El dispositivo utilizado en este trabajo es el modelo MI3 que posee una succión fija de 6 cm impuesta por un capilar (figura 18) justo sobre disco poroso en la parte inferior del cilindro. Dicho infiltrómetro consta con una altura de 25 cm, diámetro de 3.5 cm y el disco poroso de 0.5 cm y 3 cm respectivamente.



Figura 18 - Fotografía del capilar y disco poroso del infiltrómetro de succión utilizado en los ensayos. Fuente: propia.

Mediante el uso de un tapón de caucho en la parte superior, el infiltrómetro no permite la salida del fluido del recipiente. Al colocar el dispositivo sobre

una superficie con un potencial mayor al necesario de entrada el líquido sale a una velocidad constante controlado por el potencial ejercido por el capilar igual a 6 cm.

El infiltrómetro con una capacidad de 100 ml se coloca en la superficie del material, a partir de ese momento se realizan medidas a intervalos regulares de tiempo para registrar el volumen de agua que infiltra hacia la muestra durante el ensayo.

Al finalizar cada etapa de infiltración, se pesa el recipiente con la muestra de suelo, se sella herméticamente y se deja reposar la muestra un período aproximado de 24 horas para evitar la pérdida de humedad.

Previo a la realización del siguiente ensayo, se remezcla el material con el fin de homogeneizar la humedad en la muestra, ya que la cantidad de agua utilizada no se distribuye equitativamente en la misma. Posteriormente se compacta y pesa nuevamente, para calcular el nuevo nivel de saturación y confirmar que todos los ensayos se realicen en el mismo rango de densidad seca.

Este proceso se repite análogamente para cada ensayo hasta obtener una cantidad de puntos de saturación suficientes con niveles de succión inicial relativamente distintos.

3.2.1 Técnicas para la preparación de los ensayos con arena.

En la realización del ensayo, se utilizó un envase de metacrilato de 15 cm de diámetro interno y 17 cm de altura (figura 19), donde el material se compactó a una densidad seca de 1.55 g/cm^3 y se enrasó su superficie para asegurar una nivelación adecuada en el contacto del infiltrómetro.



Figura 19 - Fotografía del infiltrómetro y recipiente de metacrilato utilizado para los ensayos de infiltración en la arena. Fuente: Propia

Para asegurar una densidad homogénea en cada una de los puntos realizados, se calculó la cantidad de material seco necesario dentro del recipiente para lograr una buena aproximación al valor objetivo.

Conociendo el volumen del recipiente de $3,004.16 \text{ cm}^3$ tenemos que para una densidad de 1.55 g/cm^3 , es necesario un peso de $4,656.45 \text{ g}$ de material seco. Es necesaria la obtención de una densidad homogénea en todas las etapas para poder garantizar el mismo comportamiento de la curva de retención conforme cambia saturación de la muestra.

La humedad inicial tomada como referencia fue la higroscópica presente en el ambiente del laboratorio, la cual corresponde a un 0.15% de humedad y a un 0.65% de saturación de la muestra.

La tabla 9 muestra los valores de saturación correspondiente a cada uno de los ensayos realizados en la arena.

Tabla 9 - Valores de succión correspondientes a los niveles de saturación de los ensayos de infiltración en el laboratorio, a partir de la curva de retención medida para la arena. Fuente: Propia.

Ensayo	Humedad	Saturación	Succión (kPa)
1	0.0015	0.7%	100
2	0.0227	9.9%	50
3	0.0494	21.5%	9
4	0.0685	29.8%	4.40
5	0.0863	37.5%	2
6	0.1613	70.2%	0.9

3.2.2 Técnica para la preparación de los ensayos en arcilla.

Para la arcilla de Barcelona se realizó un proceso equivalente al empleado con la arena del laboratorio.

El molde para este ensayo consta con unas dimensiones de 10.75 cm de altura y 14.30 cm de diámetro interno, para un volumen de 1,733.76 cm³ (figura 20).



Figura 20 - Suelo rojo de Barcelona con una saturación de 51% dentro de un recipiente de metacrilato. Fuente: Propia.

La humedad inicial del material fue la obtenida en el laboratorio mediante el secado en horno de 1.72%.

Análogamente al ensayo de la arena, luego de cada ensayo se permitía reposar el material por un lapso de 24 horas previo a la realización de un nuevo ensayo. En este caso, se establecieron valores objetivos de saturación para obtener puntos equidistantes de comparación en los ensayos. Los puntos de saturación elegidos fueron del 30% y 50%.

A diferencia de los materiales gruesos, las arcillas tienen una permeabilidad mucho más baja, por lo que se consideró la toma de medidas en intervalos fijos. En el primer ensayo con un porcentaje muy bajo de saturación se realizó de cada 3 a 7 minutos y en los ensayos posteriores cada 30 minutos en los primeros puntos para efectuar observaciones cada 12 a 24 horas.

La tabla 10 muestra los valores de humedad, saturación y succión para una densidad seca de 1.63 g/cm^3 y una relación de vacíos $e=0.70$.

Tabla 10 Valores de saturación y succión para Arcilla de Barcelona.

***Este valor es una extrapolación de la curva de retención para 1.65 g/cm^3 obtenida por Barrera (2002)**

Ensayo	w	Saturación	Succión (MPa)
2	7.68%	29.73%	2.5
3	13.25%	51.31%	0.45

3.3 Simulación mediante CODE_BRIGTH.

Uno de los objetivos de este trabajo de investigación es la simulación del ensayo de infiltración con la finalidad de poder predecir las propiedades hidráulicas saturadas de un suelo, a partir de su estado no saturado. Para ello, se realizaron simulaciones numéricas utilizando diferentes valores para los parámetros más significativos (valores obtenidos en el laboratorio, estimados empíricamente y los obtenidos en ajustes a los datos medidos en los ensayos de infiltración)

CODE_BRIGTH es un código de resolución mediante el método de elementos finitos capaz de realizar análisis acoplados termo-hidro-mecánicos en medios geológicos. Fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geo-Ciencias de la Universidad Politécnica de Cataluña y trabaja en conjunto

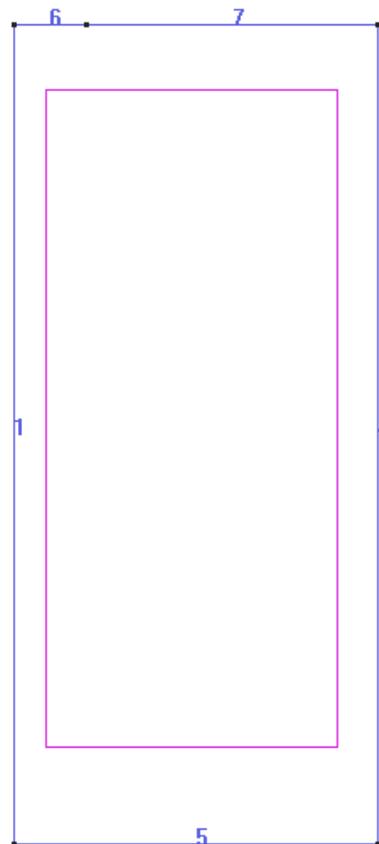
con la interface gráfica para pre y post-proceso GiD, creada por el Centro Internacional para Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

GiD es un sistema geométrico, todas las condiciones de contorno, materiales y fuerzas, son aplicadas a los elementos geométricos sin referencia al espacio. Luego que todo está definido se crea una malla a partir de la geometría existente.

La interface de dibujo del software se engloba en 4 tipos de elementos, puntos, líneas, superficies y volúmenes. Estos permiten dibujar todo tipo de límites a los materiales permitiendo especificar las condiciones necesarias para una mejor representación del medio

Crear un modelo en GiD se basa en 5 pasos principales:

1. Definición de la geometría.
2. Definición de atributos y condiciones.
3. Generación de la malla.
4. Cálculo de simulación.
5. Análisis de resultado.



**Figura 21 - Geometría del recipiente con simetría axial al eje Y en GiD (Code_Bright).
Fuente: Propia.**

El modelo creado está definido en 2 dimensiones utilizando simetría axial. Se creó un rectángulo de dimensiones iguales a las del recipiente utilizado en el ensayo de infiltración. Las 4 líneas perimetrales azules que se observan en la figura 21 denotan las paredes del recipiente cilíndrico y la parte superior desde una vista lateral. Una 5 línea (No.6) es creada para simular el radio de la piedra porosa sobre la superficie del material.

El rectángulo interior representa una superficie la cual se asigna a una geometría cerrada para asignar un dominio. Este dominio representa la presencia de un material con características físicas y parámetros de interacción en las diferentes interfaces del modelo.

Debido a la geometría simétrica del problema, se estableció una condición de espejo alrededor del eje Y, para simular solo la mitad del recipiente sin que esto afectara la evolución de las presiones de agua.

Como se menciona anteriormente, CODE_BRIGTH es un código de modelación. El mismo está compuesto por un conjunto de leyes constitutivas que permiten resolver problemas acoplados y desacoplados de tipo mecánico, hidráulico y termodinámico. Como el modelo en cuestión no presenta ningún tipo de fuerzas externas, se establece que solo se resolverán ecuaciones del tipo de balance de masa de agua (figura 22)

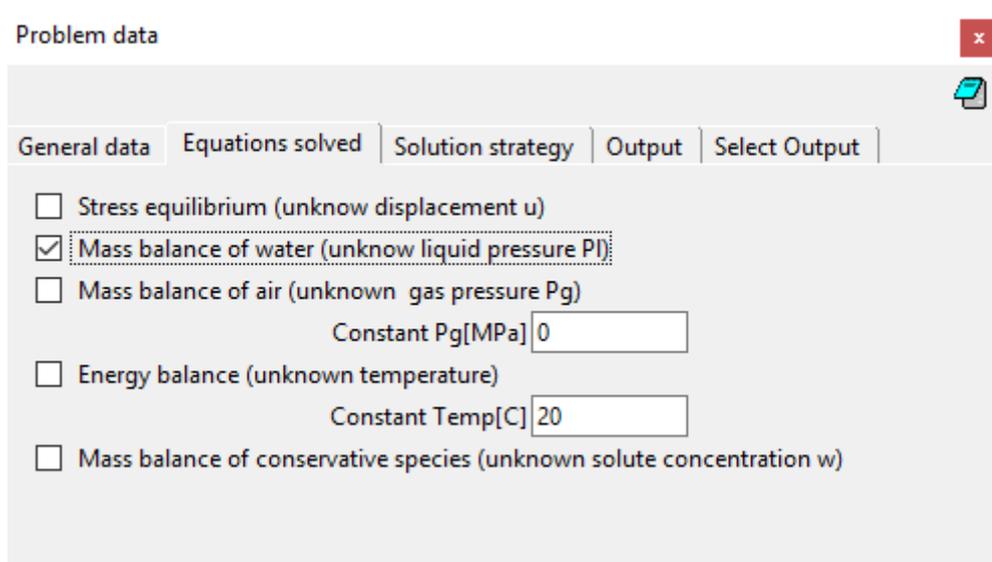


Figura 22 - Panel de ecuacionesw constitutivas de Code_Bright, selección de ecuación para balance de masa de agua. Fuente: Propia.

La interface de cálculo del GiD utiliza el método de elementos finitos (FEM) para la resolución de las ecuaciones constitutivas planteadas por el CODE_BRIGTH con los parámetros de material y condiciones de contorno definidas por el usuario. En la figura 23, se muestra una serie de casillas que controlan el comportamiento del esquema temporal a utilizar y los valores máximos a los que se iterará durante la fase de cálculo.

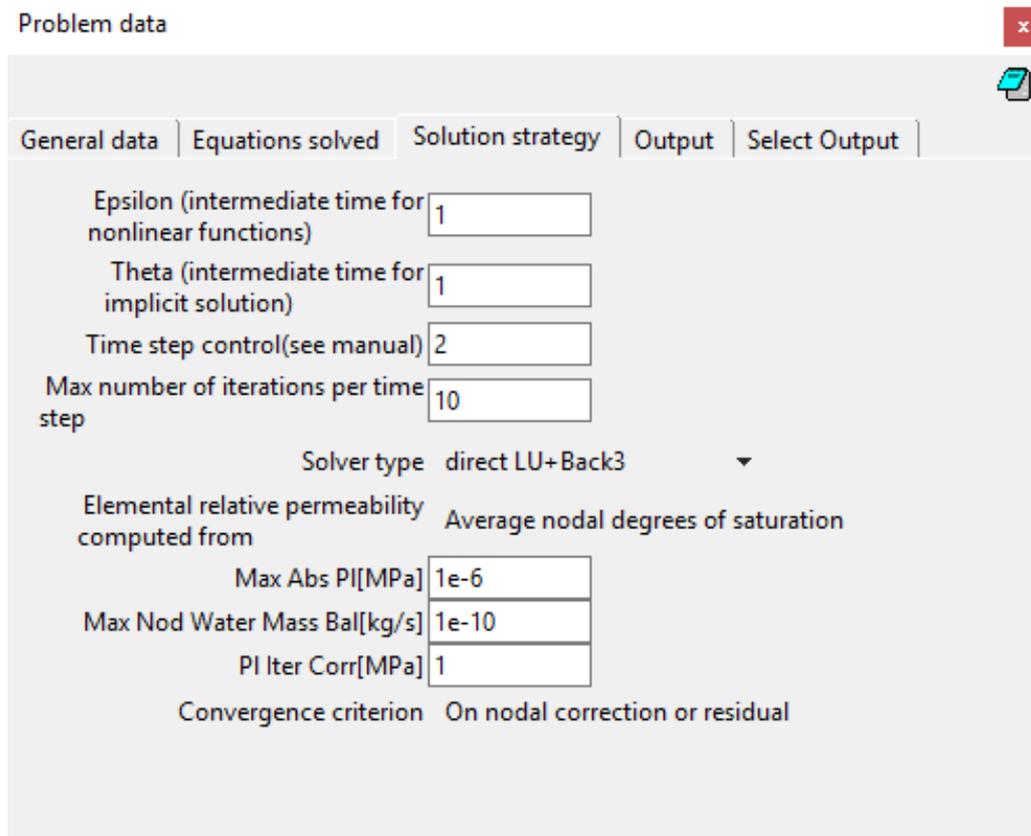


Figura 23 - Panel de control de parámetros analíticos para las iteraciones de Code_Bright. Fuente: Propia.

Se ha utilizado el código de modelación para representar el ensayo en escala real, tanto para la arena del laboratorio como para el suelo arcilloso del Campus Nord.

Las condiciones de contorno se aplican directamente a la geometría del modelo. Para simular superficies impermeables, simplemente no se asigna ningún parámetro a dichas superficies.

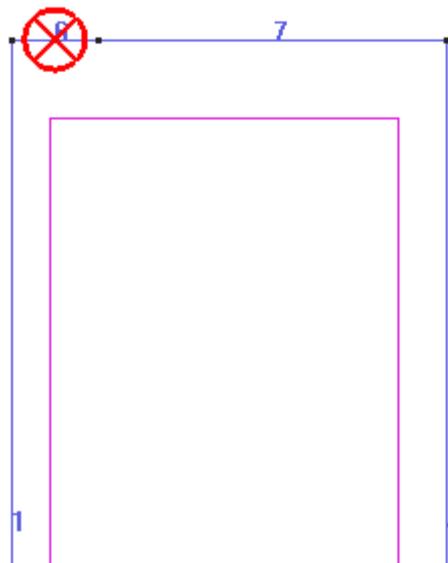


Figura 24 - Ubicación espacial en la geometría del modelo para la condición de contorno de flujo prescrito en Code_Bright (Flux B.C.). Fuente: Propia.

En la línea que representa el radio del infiltrómetro se aplican condiciones de flujo prescrito (figura 24). Estas condiciones incluyen:

- Presión de líquido prescrita (MPa): -6×10^{-6}
- Gamma del líquido: 1.e6
- Temperatura: 20C

Finalmente se estableció la porosidad para los materiales ensayados en cada modelo, de 0.375 para la arena y de 0.42 para la arcilla, y la succión del material en cada nivel de saturación medido. Estas condiciones generales se asignaron al rectángulo interior como parámetros iniciales del material.

Se utilizaron las leyes constitutivas que controlan el comportamiento hidráulico y la interface térmica. Bajo este apartado (figura 25), los parámetros introducidos están relacionados a la curva de retención, la permeabilidad intrínseca, la porosidad y la interacción de la fase líquida-suelo.

	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	
Retention Curve	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓
Intrinsic Permeability	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓
Liquid Phase Relative Permeability	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓
Gas Phase Relative Permeability	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓
Diffusive Flux of Vapour	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓
Diffusive Flux of Dissolved	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓
Dispersive Flux of Mass and Energy	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓
Conductive Flux of Heat 1	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓
Conductive Flux of Heat 2	ITVCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	↓

Figura 25 - Datos del material utilizados para la simulación de la curva de retención e infiltración en el suelo (Code_Bright). Fuente: Propia.

Las tablas 11 y 12 presentan los parámetros iniciales de modelación para cada uno de los materiales simulados.

Tabla 11 - Parámetros iniciales utilizados para la modelación en Code_Bright para la arena Lab-UPC.

Arena						
Curva de Retención		Permeabilidad Intrínseca		Permeabilidad relativa Fase líquida		
ITVCL		Modelo de van Genuchten (1)		Modelo de Kozeny (1)		Generalized Power Law (6)
P1	PO (MPa)	6E-04	k11 Perm. Intrínseca (m ²)	1.05E-04		
P2	Tensión superficial a temperatura T (N/m)	0.072	K22 Perm. Intrínseca (m ²)	1.05E-04	A, constante de proporcionalidad	1
P3	Factor de forma vG	0.367	K33 Perm. Intrínseca (m ²)	1.05E-04	Lambda	3
P4	Saturación residual Srl	0			Saturación residual Srl	0
P5	Saturación máxima Sls	1			Saturación máxima Sls	1

Tabla 12 - Parámetros iniciales utilizados para la modelación de la arcilla del Campus Nord.

Arcilla Barcelona						
Curva de Retención			Permeabilidad Intrínseca		Permeabilidad relativa Fase líquida	
ITYCL		Modelo de van Genuchten (1)		Modelo de Kozeny (1)		Generalized Power Law (6)
P1	P0 (MPa)	0.022	k11 Perm. Intrínseca (m ²)	1E-16		
P2	Tensión superficial a temperatura T (N/m)	0.072	K22 Perm. Intrínseca (m ²)	1E-16	A, constante de proporcionalidad	1
P3	Factor de forma vG	0.225	K33 Perm. Intrínseca (m ²)	1E-16	Lambda	4
P4	Saturación residual Srl	0.01			Saturación residual Srl	0.01
P5	Saturación máxima Sls	1			Saturación máxima Sls	1

La malla generada se realizó con una discretización de 5 mm y una discretización localizada en la zona de la superficie, donde se colocó el infiltrómetro de 2.5 mm, para un total de 1230 elementos triangulares y 672 nodos, de los cuales 7 nodos son analizados como los puntos de entrada del agua al medio.

En la figura 26 se puede observar el mallado del material, cabe mencionar que solo se ha modelado la mitad tanto del infiltrómetro como del recipiente utilizando la función de simetría a todo lo largo del eje Y. El radio del disco tiene una longitud de aproximadamente 1.5 cm incluidos en los 7.5 cm de radio del recipiente.

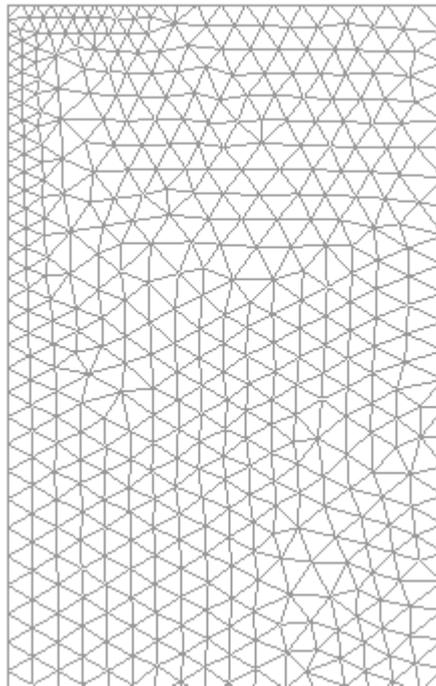


Figura 26 - Imagen del mallado utilizado para la simulación en Code_Bright. Tamaño general 5 mm, zona reestructurada (infiltrómetro) 2.5 mm. Fuente: Propia.

Después de cada análisis con los parámetros correspondientes para ambos materiales, se observó la evolución del volumen de agua que ingresa a la muestra en intervalos temporales similares a los registrados en los ensayos reales.

Posteriormente, estos valores de infiltración son comparados con los obtenidos en el laboratorio y calculados mediante relaciones empíricas.

4. CAPÍTULO IV: CURVAS EXPERIMENTALES

En este apartado se presentan gráficamente los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el laboratorio, tanto para la arena como para el suelo del Campus Nord.

4.1 Curvas experimentales de los ensayos en arena.

En las figura 27 se puede observar el volumen de agua infiltrado en mililitros contra la raíz cuadrada del tiempo en segundos para cada ensayo realizado con la arena.

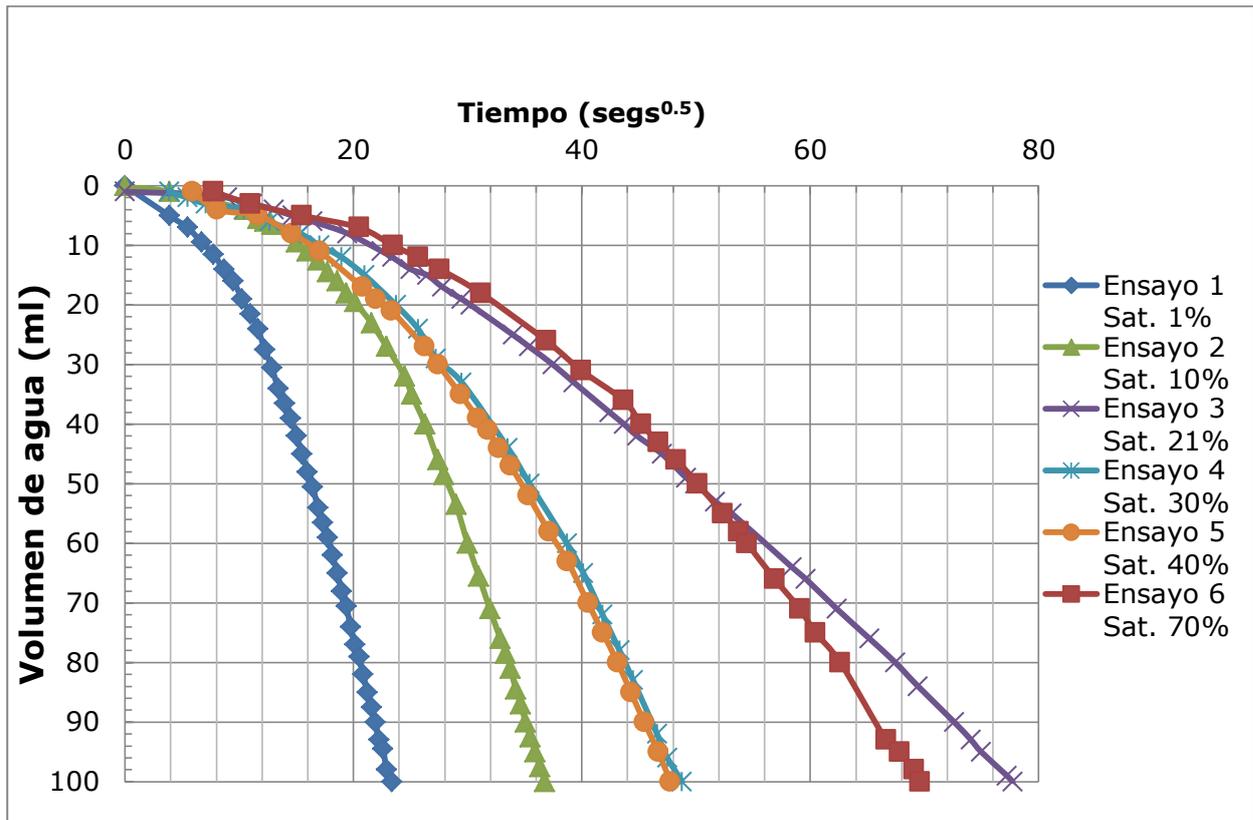


Figura 27 - Valores medidos en el laboratorio del volumen de agua (ml) que ingresa al suelo en función de la raíz cuadrada del tiempo ($s^{0.5}$) para distintos niveles de saturación de la muestra para la arena Lab-UPC. Fuente: Propia.

En teoría, en suelos no saturados el flujo de agua sucede desde puntos de menor succión a puntos de mayor succión. El flujo de agua en el permeámetro está controlado por la succión impuesta en el infiltrómetro de 6 cm (0.6 kPa).

Se puede definir el caudal observado como el volumen de agua que sale desde el infiltrómetro por unidad de tiempo, no obstante, este caudal está afectado por varias condiciones como, el contacto infiltrómetro-superficie de la muestra, la diferencia de succión entre el disco poroso y material, y la permeabilidad del mismo.

Dado que los niveles más altos de succión de la muestra suceden a menor saturación del ensayo, se registra un mayor caudal promedio de agua (tabla 13), aunque la permeabilidad relativa de los suelos más secos sea inferior a la de los suelos con mayor saturación.

Tabla 13 - Valores del caudal medio medido a partir de las observaciones realizadas en el laboratorio con diferentes niveles de saturación para la arena. Fuente: Propia.

Ensayo	Succión inicial (kPa)	Caudal medio (ml/s)	Saturación %
1	100.0	0.179	1
2	50.0	0.073	10
4	4.4	0.043	30
5	2.0	0.044	40
6	0.9	0.021	70

El caudal medio para cada ensayo fue calculado derivando la solución analítica ajustada de la función del volumen (ml) registrado en el tiempo (s) de los ensayos. Cada valor de volumen es dividido por el lapso de tiempo entre el punto anterior y el actual para obtener el caudal para dicho instante. El promedio de todos los caudales corresponde al caudal medio del material para el estado de saturación de la muestra.

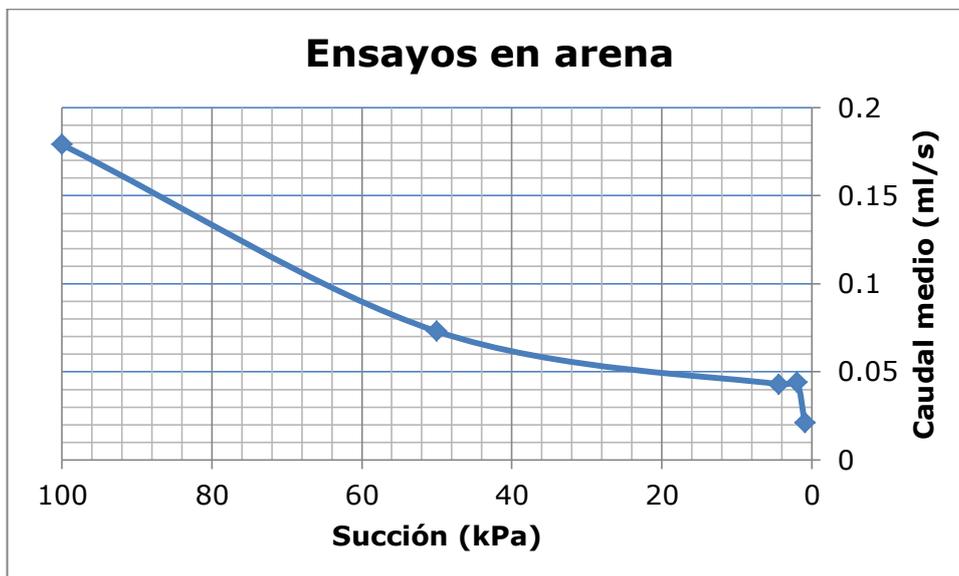


Figura 28 – Variación del del volumen de agua por unidad de tiempo promedio (ml/s) que ingresa a la muestra vs la succión (kPa) del material. Fuente: Propia.

El ensayo número 3 no sigue la tendencia que se muestra en la figura 28, esto es debido a que el método de preparación de la muestra difirió de los demás ensayos.

Para este ensayo se realizó un período de reposo de 5 días para permitir la distribución de la humedad del recipiente en lugar de homogeneizar la

humedad mediante el remezclado del material. Asumiendo una mala distribución del agua infiltrada, la parte superior de la muestra poseía un contenido de humedad muy cercano al de saturación total, provocando un flujo de 0.019 ml/s, mucho más lento que el correspondiente a un nivel de succión de 9 kPa.

Las figuras 29 y 30 muestran la evolución del caudal (ml) en el tiempo para los ensayos 1 y 5.

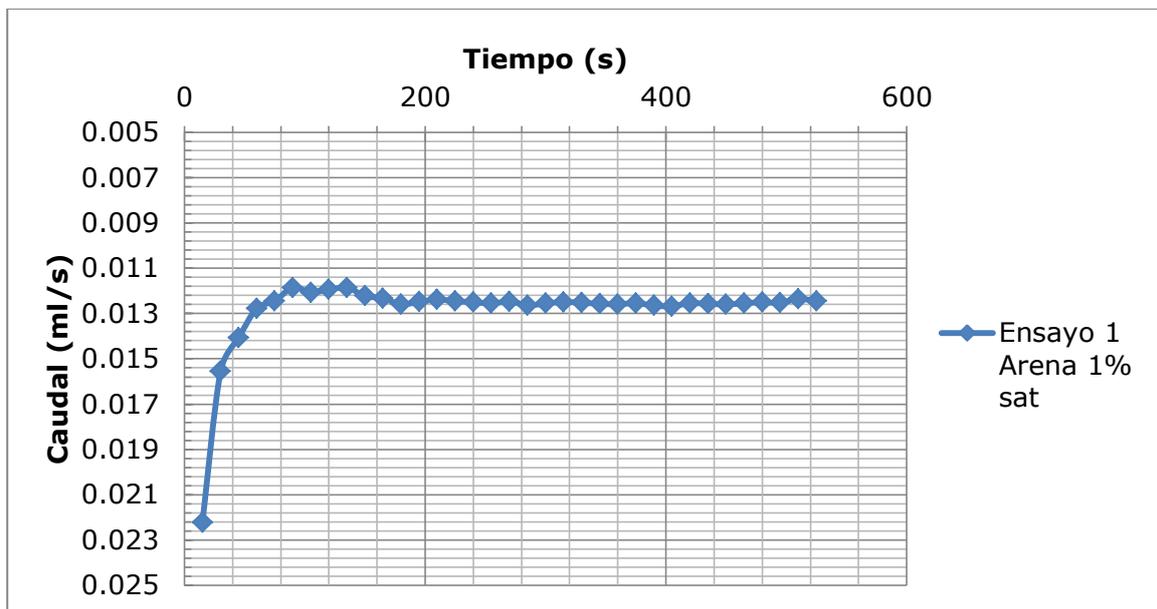


Figura 29 - Evolución del caudal medio que ingresa a la muestra en el tiempo para un saturación del 1% y una succión de 100 (kPa) para la arena. Fuente: Propia

Para un nivel de saturación bajo se exhibe una disminución gradual del caudal en los primeros segundos donde se lleva a cabo la saturación de la superficie, asumiendo que el caudal en el instante inicial no es cero. Luego de una saturación parcial de la superficie y los poros cercanos a la misma, se puede observar una estabilización de los valores y posteriormente un comportamiento asintótico en el eje horizontal.

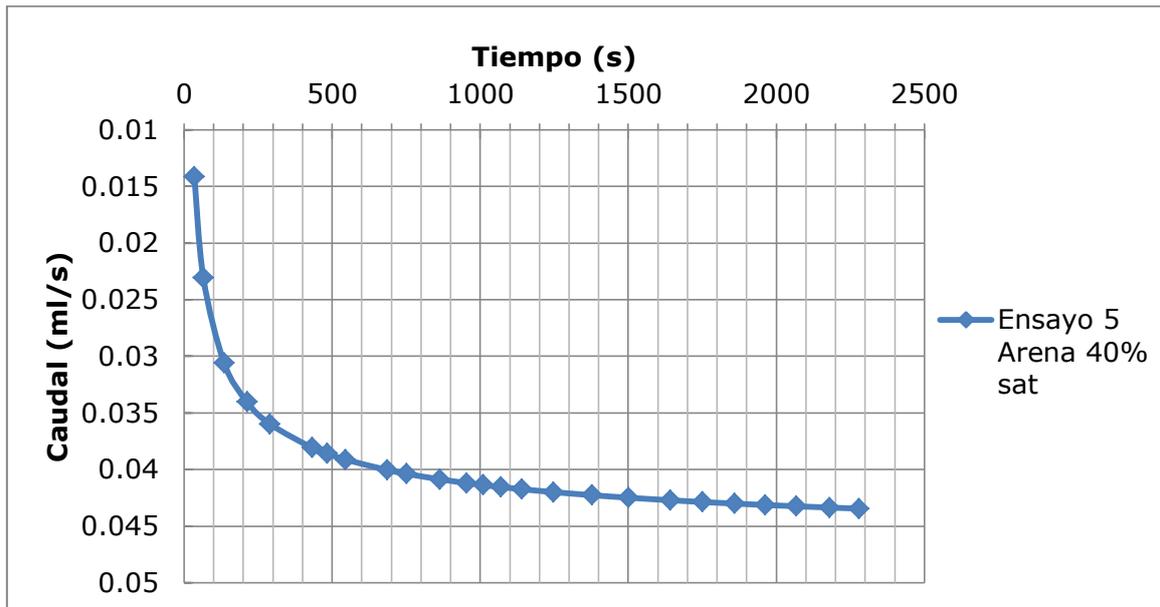


Figura 30 - Evolución del caudal medio que ingresa a la muestra en el tiempo para un saturación del 40% y una succión de 2 (kPa) para la arena. Fuente: Propia

En cambio, en saturaciones mayores se observa un aumento considerable del volumen por unidad de tiempo. En altos contenidos de humedad la mayoría de los microporos se encuentran saturados, por consiguiente, la entrada de agua sucede en los poros de mayor volumen y de una forma repentina debido al fenómeno que ocurre por la pérdida de succión en dichos espacios.

4.2 Curvas experimentales en la arcilla del Campus Nord.

La figura 31 muestra la evolución del volumen en función de la raíz cuadrada del tiempo para los ensayos realizados en la arcilla.

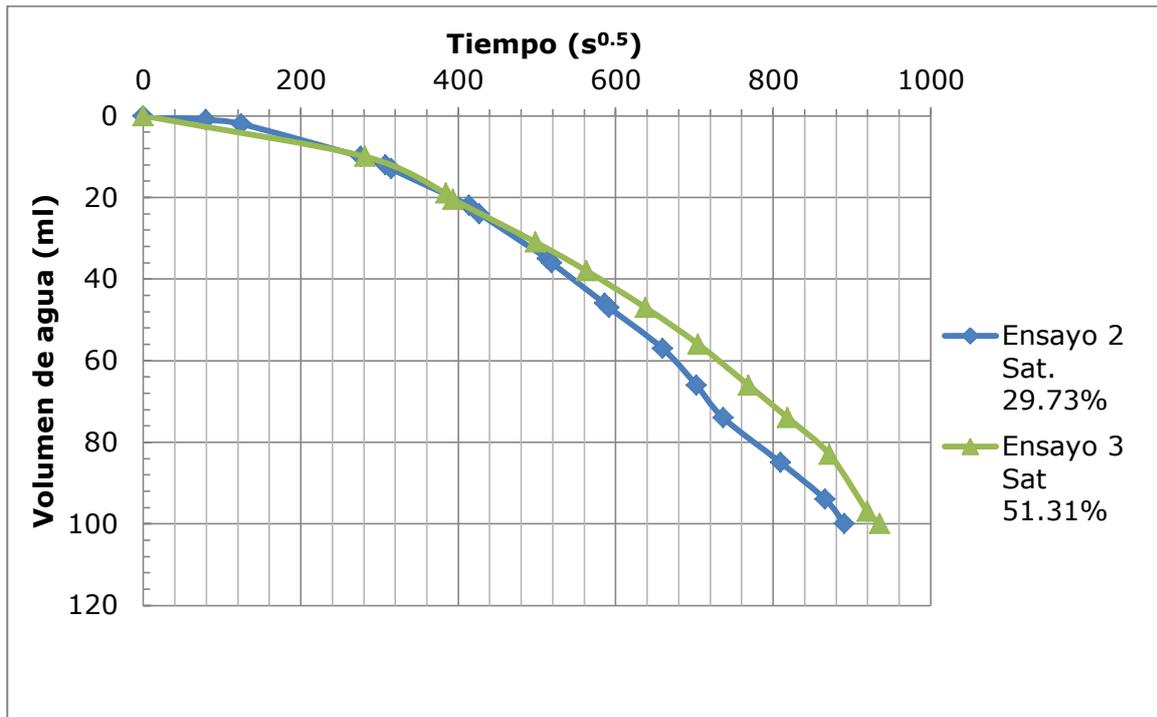


Figura 31 - Valores medidos en el laboratorio del volumen de agua (ml) que ingresa al suelo en función de la raíz cuadrada del tiempo (s^{0.5}) para distintos niveles de saturación de la muestra para la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia

Sin embargo, en materiales con una permeabilidad muy baja el efecto de la succión sobre el caudal es relativamente insignificante. La diferencia de caudales entre los ensayos del suelo del Campus Nord es de 2E-05 ml/s a diferencias de succión de aproximadamente 2 MPa (tabla 14), mientras que en los ensayos de la arena se registra una diferencia de más de 0.1 ml/s con apenas 100 kPa de variación en la muestra (tabla 13).

Tabla 14 - Valores del caudal medio medido a partir de las observaciones realizadas en el laboratorio con diferentes niveles de saturación para la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia.

Ensayo	Succión inicial (MPa)	Caudal (ml/s)	Saturación %
2	2.5	1.4E-04	30
3	0.45	1.2E-04	51

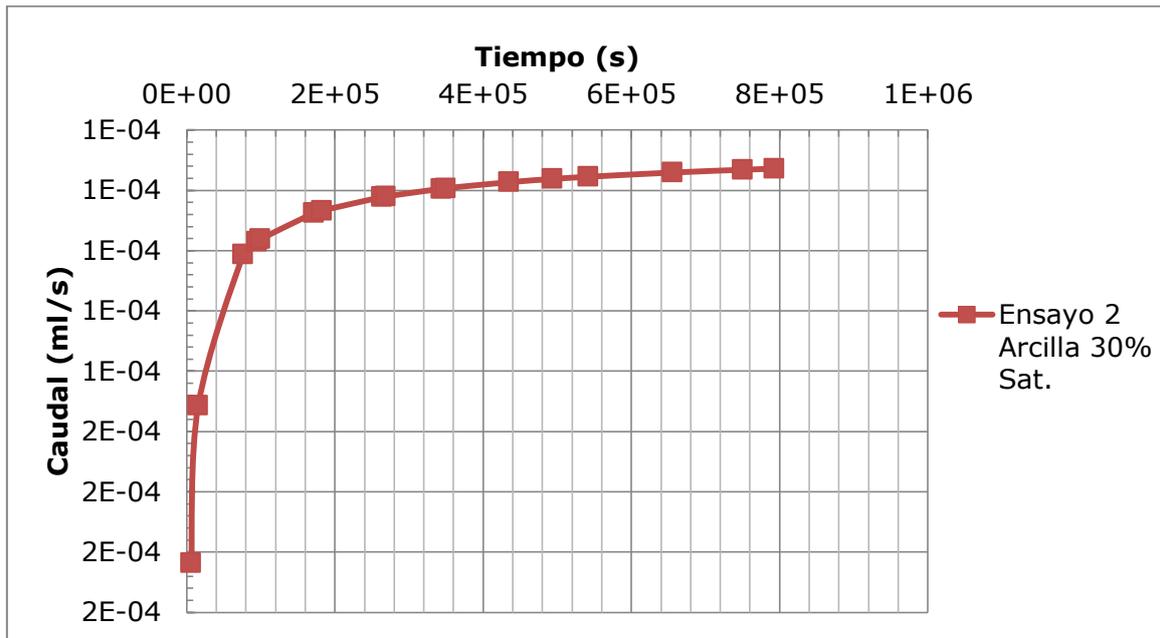


Figura 32 - Evolución del caudal medio que ingresa a la muestra en el tiempo para un saturación del 30% y una succión de 2.5 (MPa) para la arcilla Campus Nord. Fuente: Propia

La figura 32 muestra un comportamiento similar al observado en el ensayo 1 de la arena. La relación de succión entre el infiltrómetro (0.0006 MPa) y el material (2.5 MPa) es grande. Esto provoca una disminución de la succión en la zona inmediata por debajo del infiltrómetro y por consiguiente una disminución del caudal hasta estabilizarse.

Cada una de las condiciones mencionadas anteriormente, afectan de forma diferente el flujo de agua desde el infiltrómetro dependiendo el material sobre el que se utilice. Lograr un buen contacto en la superficie de material y una porosidad homogénea es relativamente más sencillo en el tipo de suelo del Campus Nord debido a que los materiales arcillosos son más trabajables que las arenas. Las arenas por otro lado, debido a la no cohesión en sus partículas pueden dar lugar a pequeños contactos irregulares y cavidades por debajo del disco poroso que afecten el valor del volumen infiltrado.

Para analizar la infiltración en los ensayos realizados, se normaliza el volumen registrado utilizando el área del disco poroso (7.07 cm²) que atraviesa el flujo. Este valor es la infiltración promedio del fluido que ingresa a la muestra, el cual depende directamente de la permeabilidad y la succión

del material, que son los factores a analizar en esta tesina. Gráficamente la tendencia observada es la misma que en las figuras de resumen del volumen (ml) vs la raíz cuadrada del tiempo ($s^{0.5}$).

Según la ecuación de Zhang 1997 (Ec. 9) la pendiente de la curva de infiltración en función de la raíz cuadrada del tiempo (tabla 15) es directamente proporcional a la permeabilidad del suelo, por ende realizando una regresión lineal de las curvas medidas, es posible obtener una aproximación de este valor.

Tabla 15 - Pendientes de infiltración obtenidas a partir de las soluciones analíticas de las curvas de infiltración observadas para ambos materiales. Fuente: Propia.

Ensayos Arena	Ecuación	Pendiente ($cm/s^{0.5}$)	R
1	$0.0264x^2+0.002x$	0.0264	0.999
2	$0.0143x^2-0.143x$	0.0143	0.996
3	$0.0019x^2+0.042x$	0.0019	0.997
4	$0.0066x^2-0.032x$	0.0066	0.999
5	$0.0067x^2-0.028x$	0.0067	0.999
6	$0.0032x^2-0.017x$	0.0032	0.998
Ensayos Arcilla			
2	$2E-05x^2+0.0008x$	2.00E-05	0.998
3	$1E-05X^2+0.0012X$	1.00E-05	0.998

4.3 Análisis de la infiltración

Otro punto muy interesante es el comportamiento de la velocidad de infiltración del agua a medida que la saturación del material cambia durante el ensayo. De acuerdo a las explicaciones observadas anteriormente, los diferentes niveles de succión en los ensayos controlan la forma en la que el agua ingresa a los vacíos en el suelo. Para apreciar dicho cambio, se deriva la infiltración con relación al tiempo para obtener la infiltración instantánea en cada punto de medida con respecto al anterior.

La función calculada a partir de los datos observados en el laboratorio exhibe una serie de oscilaciones que son producto de la combinación de errores de medición directa y la derivación de la función de infiltración como tal.

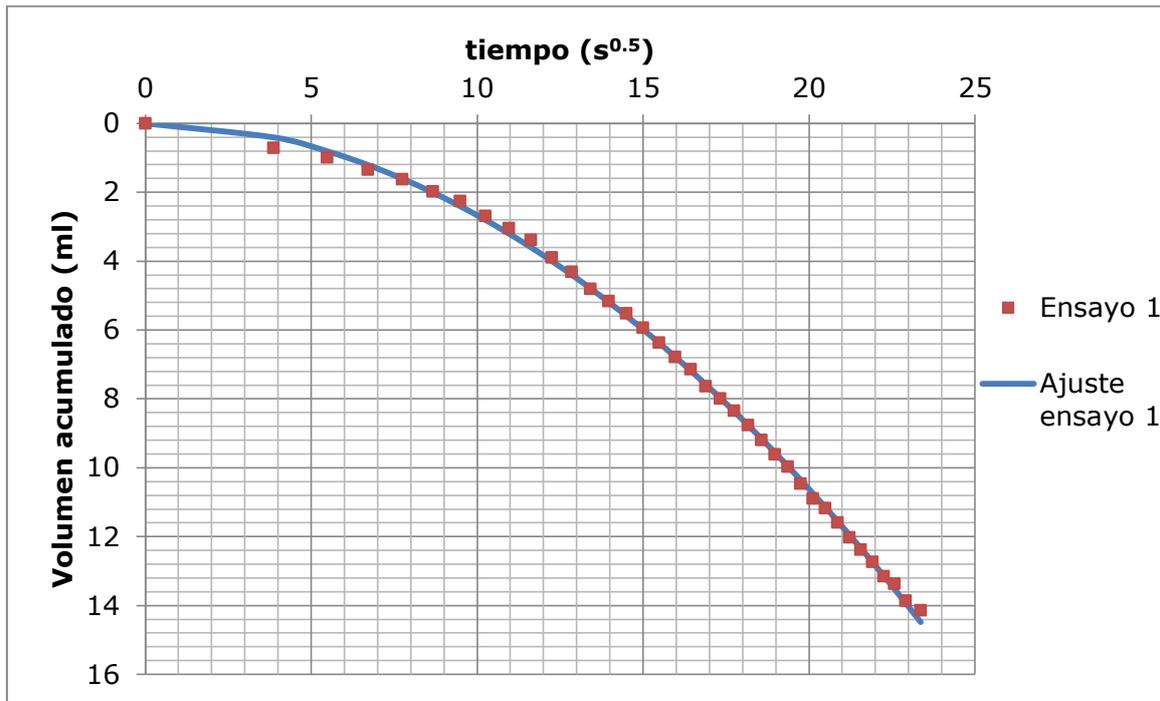


Figura 33 - Comparación del ajuste analítico (línea sólida) con los valores medidos del volumen acumulado (ml) en función de la raíz cuadrada del tiempo ($s^{0.5}$) para el ensayo 1 de la arena (Saturación 1%, 100 kPa). Fuente: Propia.

Pequeños cambios (figura 33), resultantes de la capacidad del ojo humano al momento de la toma del valor del volumen, provocan los picos positivos y negativos incidiendo en las variaciones drásticas en la pendiente de la curva de infiltración.

La figura 34 muestra una comparación del comportamiento de la infiltración instantánea para el ensayo 1 de la arena con el resultado gráfico de la solución analítica ajustada para la misma ecuación.

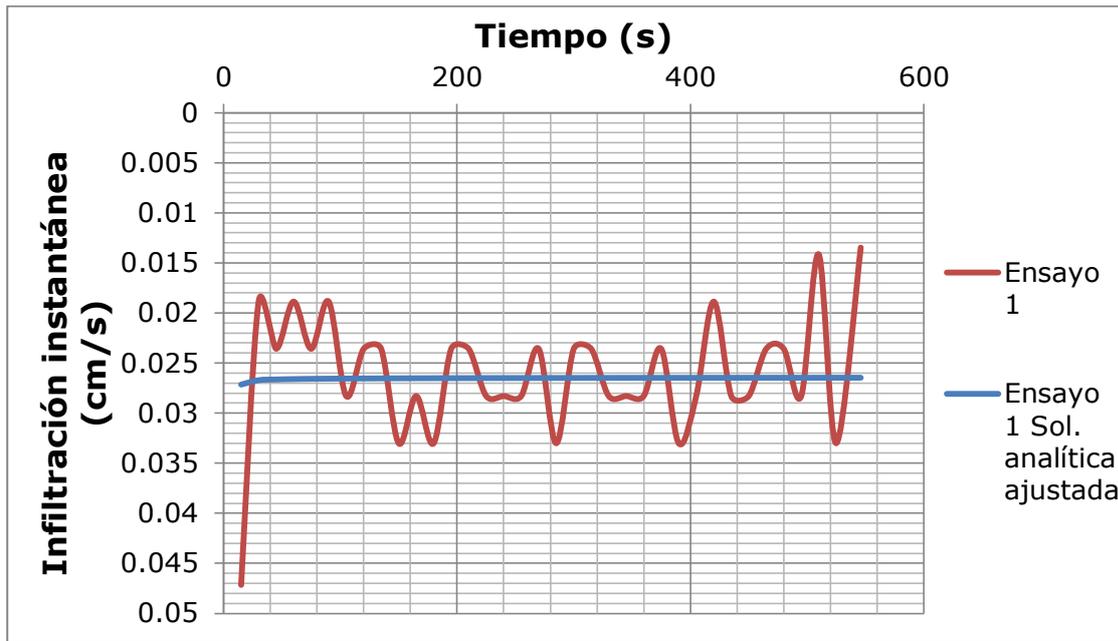


Figura 34 - Comparación de la derivada de la solución analítica vs la derivada directa de los valores observados en el laboratorio para el ensayo 1 de la arena. Fuente: Propia.

Se puede observar en este mismo gráfico que el aumento de la velocidad de infiltración para el primer ensayo es mínimo, significando un aumento casi lineal del volumen de agua infiltrado en el tiempo. Esto indica que la variación de la succión total promedio no es muy relevante debido a la poca saturación provocada por los 100 mililitros iniciales durante el ensayo.

Debido a la gran variación temporal de los ensayos, es imposible analizarlos en conjunto bajo un mismo gráfico, por lo que se generalizará el análisis, para la arena, en 3 casos relativamente distintos observados en las figuras 35 a 37 para los ensayos 2, 5 y 6 respectivamente. La totalidad de los valores y gráficas de los ensayos se encuentran adjuntadas en el capítulo de anexos.

El gráfico 35 presenta la evolución de la velocidad de infiltración del material a partir de una saturación del 10%. Al contrario del primer ensayo, se puede observar un aumento gradual de la razón de cambio de la infiltración hasta una tendencia asintótica con relación al eje X.

Analizando la sección lineal del gráfico, la diferencia en las velocidades de infiltración entre los ensayos 1 y 2 es de 0.0146 cm/s, aproximadamente 1.5 veces menor con relación al primer ensayo. Esto bajo un efecto de succión de 50 kPa, 50% menor a la del primer ensayo.

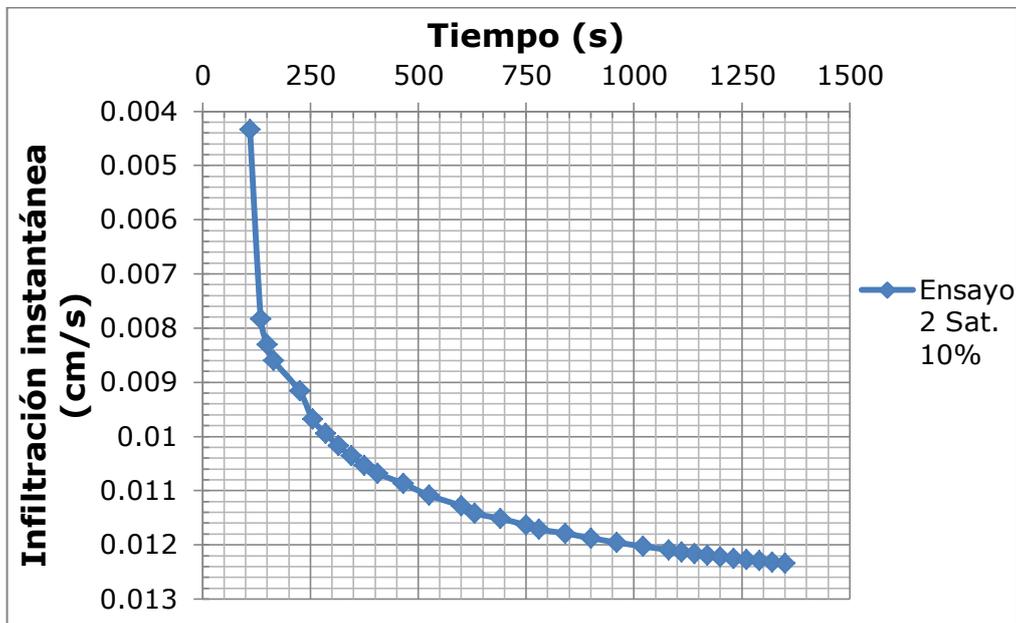


Figura 35 - Evolución de la infiltración instantánea en el tiempo para el ensayo 2 de la arena (Saturación 10%, 50 kPa). Fuente: Propia.

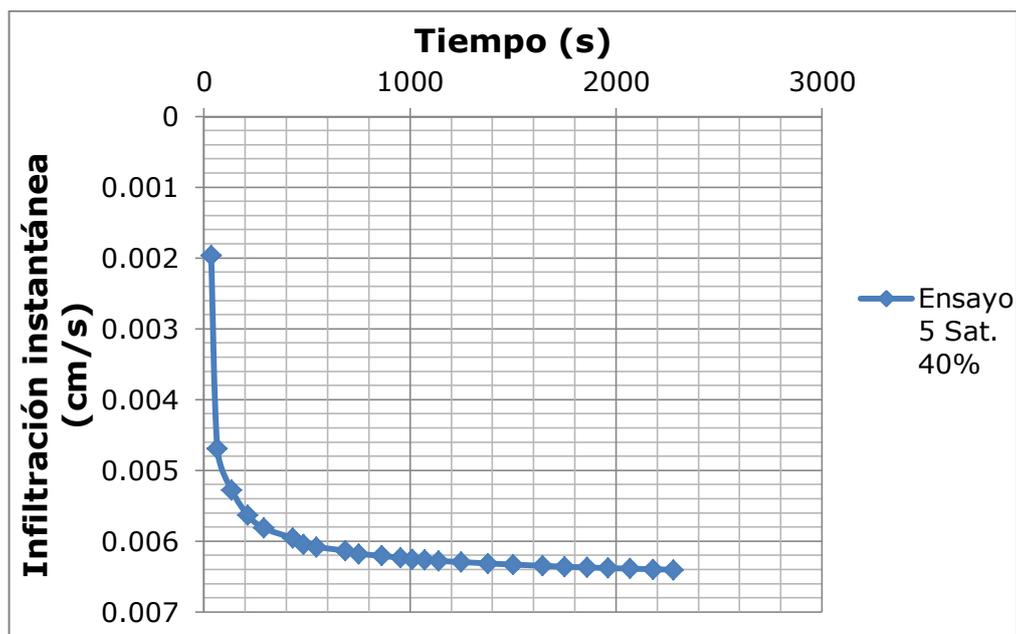


Figura 36 - Evolución de la infiltración instantánea en el tiempo para el ensayo 5 de la arena (Saturación 40%, 2 kPa). Fuente: Propia.

Al igual que en el ensayo 2, el ensayo 5, a una saturación del 40% y una succión de 2 kPa (figura 36) presenta una disminución de casi un 50% tanto de la succión como del valor de la infiltración máxima. La velocidad de infiltración máxima es de 0.0124 cm/s al final del ensayo e inicio del comportamiento lineal asintótico.

El ensayo 6 presenta un valor inicial de infiltración de 0.0019 cm/s y un valor máximo de 0.0031 cm/s.

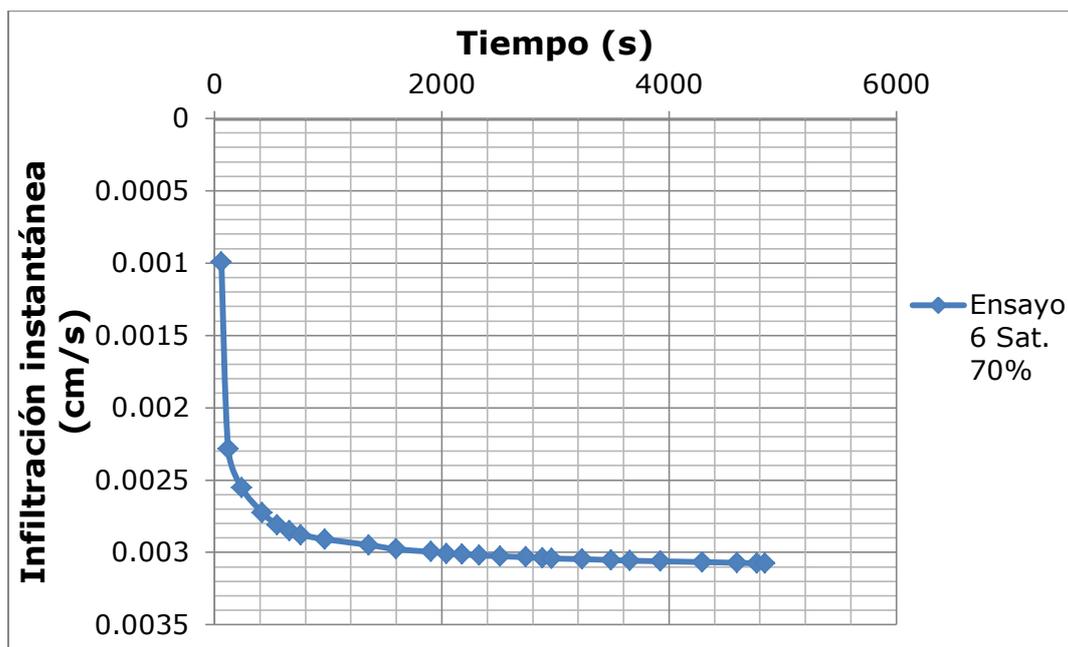


Figura 37 - Evolución de la infiltración instantánea (cm/s) en el tiempo (s) para el ensayo 5 de la arena (Saturación 70%, 0.9 kPa). Fuente: Propia.

La variación entre los ensayos no es lineal, la infiltración asintótica aumenta con la succión inicial del suelo y por ende, disminuye con el valor de saturación del ensayo.

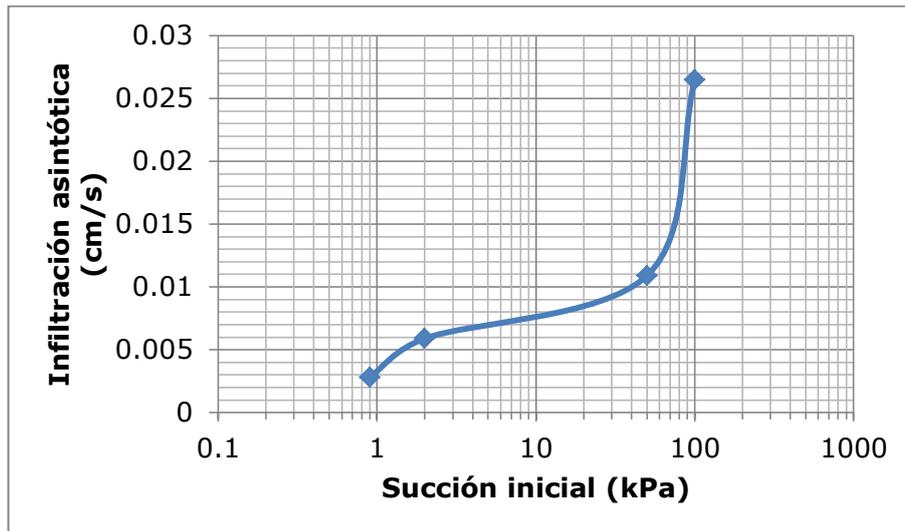


Figura 38 - Variación de la infiltración asintótica (cm/s), en función de la succión del material, observada en los ensayos 1,2,5 y 6 para la arena. Fuente: Propia.

La succión inicial en los primeros ensayos es significativamente mayor, la figura 38 representa los valores máximos de infiltración asintótica registrados en los ensayos analizados anteriormente (tabla 16).

La mayor pendiente se observa en cambios altos de succión, estas variaciones se presentan en la fase de humedecimiento del suelo que la entrada de agua es controlada por la interface aire-líquido de los microporos del material.

Al producirse una saturación de dichos poros los cambios de succión en la muestra son significativamente menores que en los niveles iniciales, reduciendo la velocidad de infiltración en un porcentaje equivalente a la caída de la succión.

Tabla 16 - Valores de infiltración obtenidos en la sección lineal asintótica de los gráficos de infiltración instantánea de la arena. Fuente: Propia.

Infiltración promedio asintótica (cm/s)	Succión Inicial (kPa)	Saturación
0.0265	100	0.01
0.0109	50	0.1
0.0059	2	0.4
0.0028	0.9	0.7
0.001	0	1

Utilizando los valores de la infiltración máxima expuestos en la tabla 16 y adicionando el valor experimental obtenido del ensayo de carga variable realizado para la arena en el laboratorio en condiciones saturadas, se obtiene una función logarítmica en base a la saturación del material que describe el comportamiento de la infiltración instantánea durante los ensayos (figura 39).

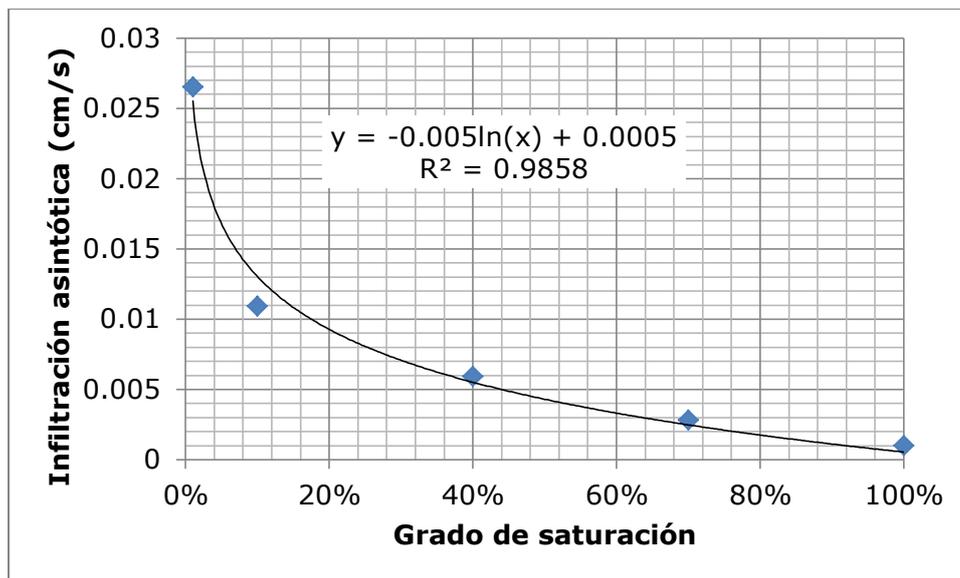


Figura 39 - Variación de la infiltración asintótica (cm/s) en función del grado de saturación del suelo, para la arena. Fuente: Propia.

Para los ensayos en la arcilla del Campus Nord también fue necesaria la realización de un ajuste para evitar oscilaciones en la derivada de la ecuación de la infiltración. La figura 39 muestra la bondad del ajuste realizado para el ensayo 2 con un 30% de saturación.

El ajuste muestra esencialmente los valores promedio de la infiltración entre los picos positivos y negativos de la función a partir de la data observada.

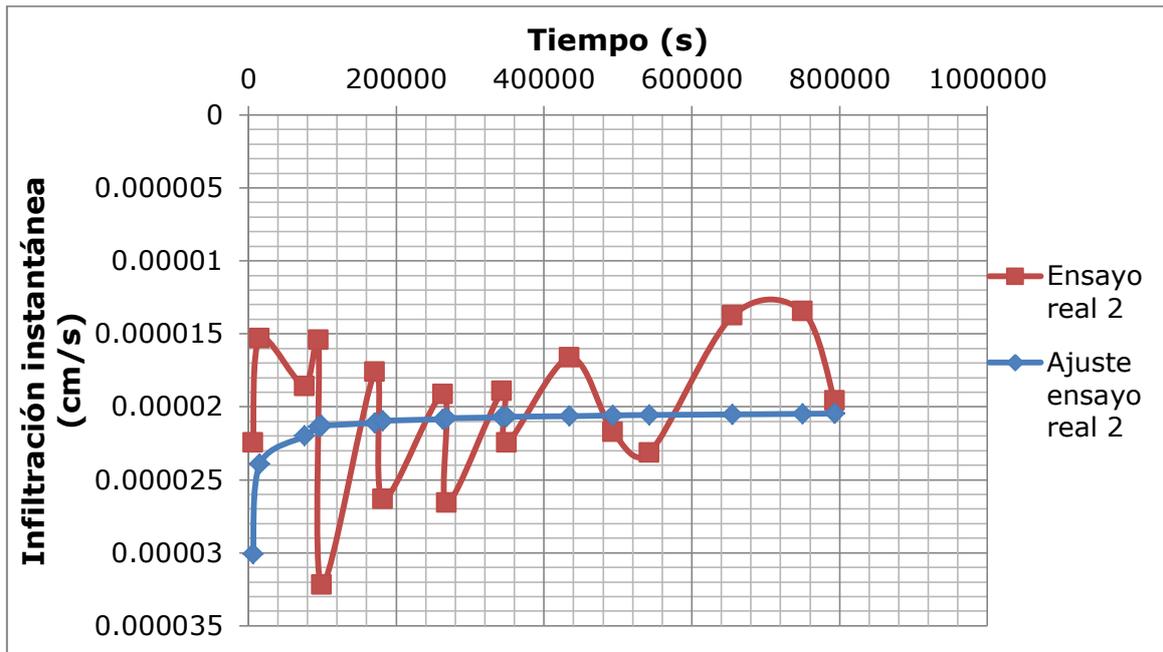


Figura 40 - Comparación de la derivada de la solución analítica vs la derivada directa de los valores observados en el laboratorio para el ensayo 2 de la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia.

En los ensayos en el suelo de Campus Nord, la diferencia temporal es menor por lo que pueden ser analizados bajo un mismo gráfico.

La figura 41 muestra el comportamiento para los ensayos a 30 y 50 por ciento de saturación con un valor de succión de 2.5 MPa y 0.45 MPa respectivamente.

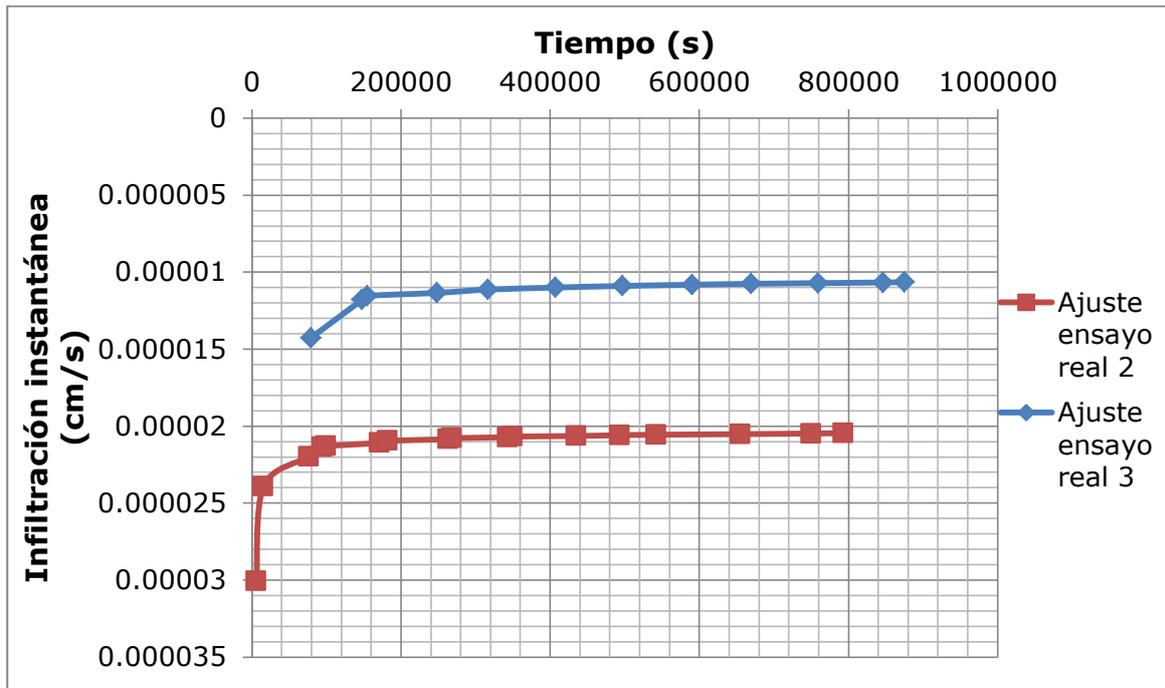


Figura 41 - Grafico de la evolución de la infiltración instantánea en el tiempo, a partir de la solución analítica ajustada para los ensayos en la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia.

Los ensayos en la arcilla muestran un comportamiento mucho más lineal en los de la arena. La diferencia en succión de los dos ensayos es de aproximadamente 2 MPa, mucho mayor que en los materiales granulares. El promedio de la velocidad de infiltración es 1.7 mayor en el segundo ensayo para una succión casi 6 veces menor.

Dado a que la infiltración es una función de la permeabilidad, el valor de la velocidad de infiltración instantánea varía directamente de acuerdo con el tipo de suelo. Esto significa que el efecto del cambio de la succión es proporcionalmente menos importante en bajas permeabilidades.

Utilizando las ecuaciones de Zhang ecuaciones 9 a 12 del apartado 1.6 con los valores de Carsel y Parrish (1988). Se analizan los parámetros correspondientes tanto para arenas como para arenas limosas debido al porcentaje de finos obtenido en el ensayo granulométrico.

Tabla 17 - Valores de conductividad hidráulica utilizando parámetros predeterminados por Carsel & Parrish (1988) a partir de las pendientes de las curvas de infiltración ajustadas para los ensayos en la arena. Fuente: Propia.

Material	Arena	Arena Limosa
A	0.667	2.026
n/h_0	2.68	2.28
radio	1.5	
α	0.145	0.124
Saturación	k_s	k_s
1%	3.95E-02	1.30E-02
10%	2.14E-02	7.00E-03
20%	2.85E-03	9.38E-04
30%	9.89E-03	3.26E-03
40%	1.00E-02	3.31E-03
70%	4.80E-03	1.57E-03

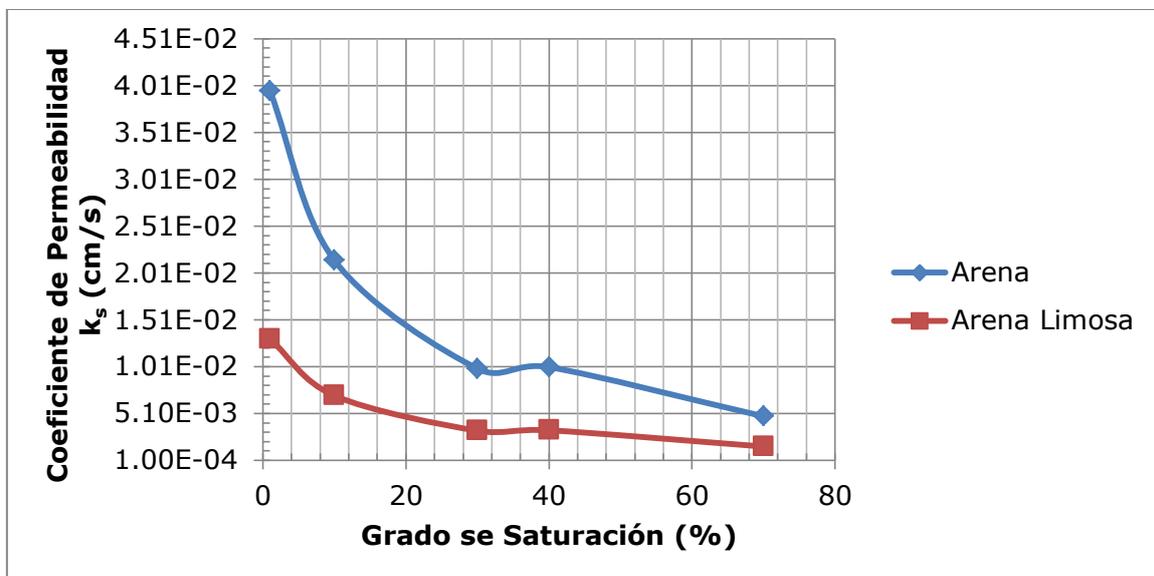


Figura 42 - Coeficientes de conductividad hidráulica para los parámetros predeterminados por Carsel y Parrish (1988) utilizando el método de Zhang-vG en para materiales similares a la arena Lab-UPC. Fuente: Propia.

En la figura 42 se puede observar que los valores de permeabilidad disminuyen con el aumento de la saturación del material. La variación en la arena es mucho más acentuada para altas succiones. Esto se debe a que el parámetro n de van Genuchten que representa la pendiente de la curva de retención es más empinada y por ende la succión varía en un grado mayor a medida que cambia el contenido de humedad de la muestra.

5. CAPÍTULO V: SIMULACIÓN EN CODE_BRIGHT

Para la resolución de la simulación, CODE_BRIGHT utiliza modelos numéricos destinados a realizar el balance de la masa de agua dentro de la muestra.

En el análisis de la simulación se toman en cuenta los nodos equidistantes creados en la superficie de contacto infiltrómetro-muestra. Tanto para los ensayos en la arena como en el suelo de Campus Nord, se utilizaron un total de 7 nodos espaciados a 2.5 mm.

Tabla 18 - Parámetros calibrados para la modelación del ensayo de infiltración en Code_Bright para ambos materiales.

Parámetros	Arena	Arcilla
m	0.367	0.225
$\alpha(1/P)$	16.63 kPa	17.5 MPa
n	1.58	1.3
Po (MPa)	6E-04	0.022
λ	3.5	5
σ_s (N/m)	0.072	0.072
Sls	1	1
Srl	0	0.01

Para calcular el volumen de agua por unidad de tiempo que ingresa a la muestra, se empleó la herramienta de gráficos del área de Post-proceso del GiD. Asumiendo que en la superficie no existe un flujo horizontal, se observa el líquido advectivo en el eje Y (vertical).

La figura 43 muestra la salida de datos del fluido en m/s, estos valores se exportan a una hoja de cálculo y exhiben la velocidad del fluido en cada instante iterado para cada uno de los nodos especificados.

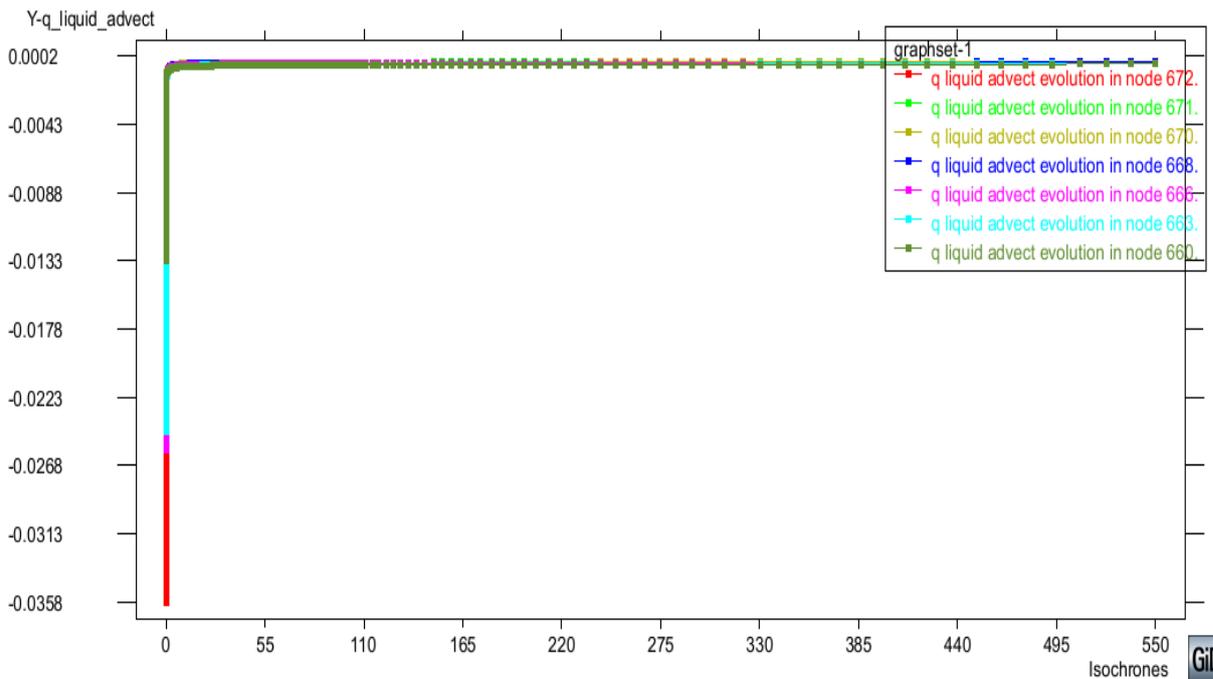


Figura 43 - Representación de la salida de datos de los nodos superficiales en la simulación de Code_Bright. Líquido advectivo en el eje Y que simula el flujo de agua por metro lineal de cada nodo en el tiempo. Fuente: Propia.

Siendo un método de elementos la información obtenida es puntual y no representa la totalidad del fluido que ingresa en la superficie de contacto. Para obtener el volumen real, se discretizó espacialmente el radio del infiltrómetro simulado y se calculó la sumatoria de los valores unitarios desde el nodo n_1 hasta el nodo n_i .

La ecuación 18 plantea la solución al método de elementos finitos considerando la condición de simetría y asumiendo la forma cilíndrica tanto del infiltrómetro como del molde de metacrilato utilizado en el ensayo.

$$\Delta t \left(\sum_{n=1}^i q_i 2\pi r_l r_{inf} \right) \quad (Ec. 18)$$

Dónde:

q_i es el flujo unitario por unidad de tiempo de cada nodo.

Δt es la discretización temporal, indicada por el lapso de tiempo considerado para cada iteración de la simulación.

r_I es el radio de influencia de cada nodo, al estar espaciados equidistantemente, el valor es el mismo para todos a excepción de los extremos.

r_{Inf} es el radio total del disco poroso del infiltrómetro.

Los parámetros de la curva de retención, son los valores más importantes dentro de esta simulación. Para confirmar el correcto funcionamiento del modelo no saturado, se verificó la saturación inicial de cada ensayo la cual es controlada por la saturación impuesta dentro de cada recipiente.

Como se observa en las figuras 44 y 45, el estado inicial de cada ensayo corresponde a la saturación inicial del material en el procedimiento real en el laboratorio.

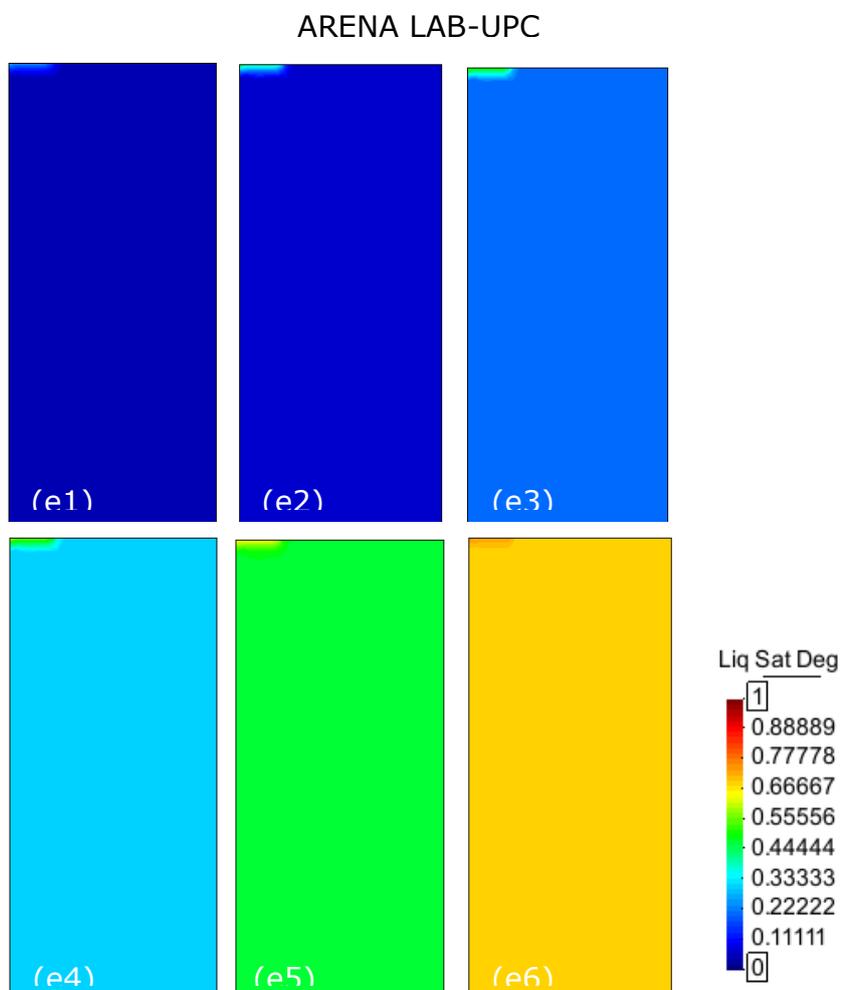


Figura 44 - Variación de la saturación del material simulado en Code_Bright en función de la succión impuesta dentro de la geometría. Modelo para la arena Lab-UPC
Fuente: Propia

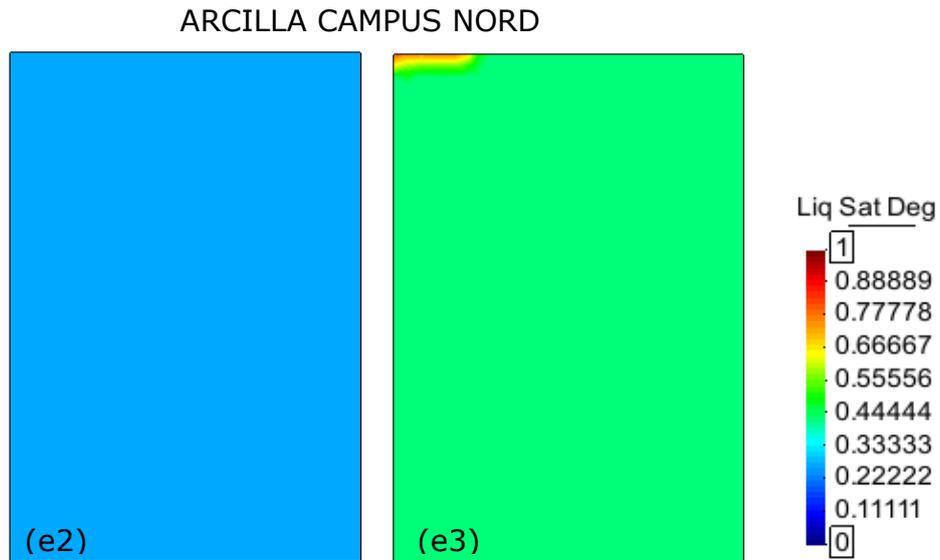


Figura 45 - Variación de la saturación del material simulado en Code_Bright en función de la succión impuesta dentro de la geometría. Modelo para la arcilla del Campus Nord Fuente: Propia

Al igual que en los experimentos de laboratorio, la distribución de humedad durante el ensayo no es homogénea. Los vectores de desplazamiento del flujo son mayores alrededor del infiltrómetro son mayores que en el centro del mismo (figura 46).

Esto se debe a que al saturarse el material en el área directamente debajo del infiltrómetro, ocurre una pérdida repentina de la succión, siendo esta mayor en la periferia, y por ende, provocando más flujo hacia las zonas con potencial negativo mayor. Este comportamiento afecta considerablemente al nodo 7 ubicado en el extremo de la condición de contorno del infiltrómetro.

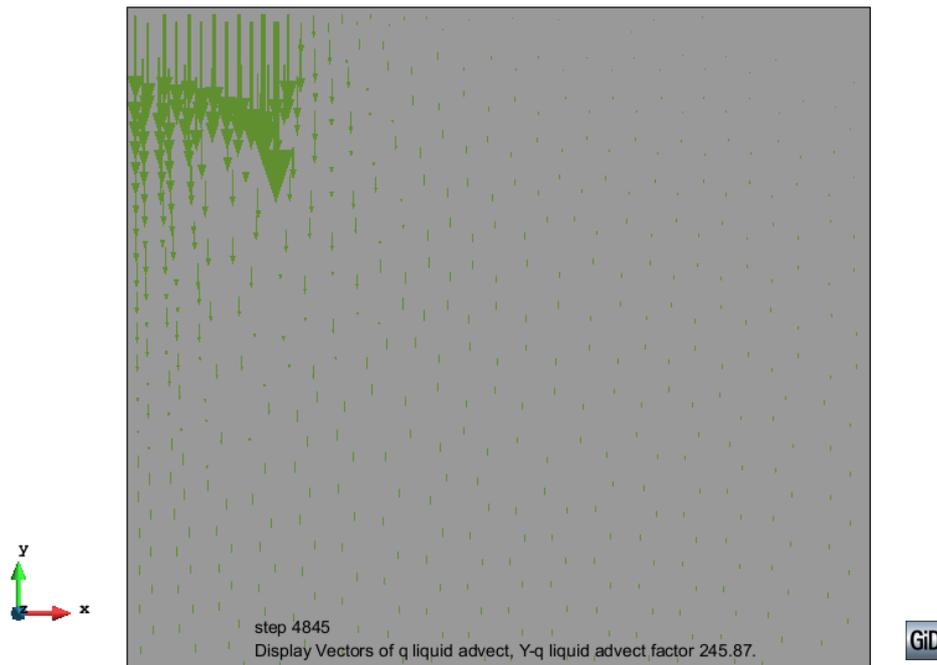


Figura 46 – Representación de los vectores de velocidad para el fluido advectivo en el eje Y simulados en Code_Bright. Fuente: Propia

La saturación parcial de la muestra puede incidir en la evolución de la infiltración del agua en el suelo debido a que en un medio no saturado que no es completamente homogéneo, existen zonas de alta y de baja succión.

Las figuras a continuación muestran la evolución de la saturación durante el ensayo 4 para la arena y el ensayo 3 para la arcilla, ambos en el punto intermedio y final de los ensayos simulados así como también las presiones/succiones presentes en la muestra.

La figura 47 muestra el ejemplo de la arena a una saturación inicial de 40%.

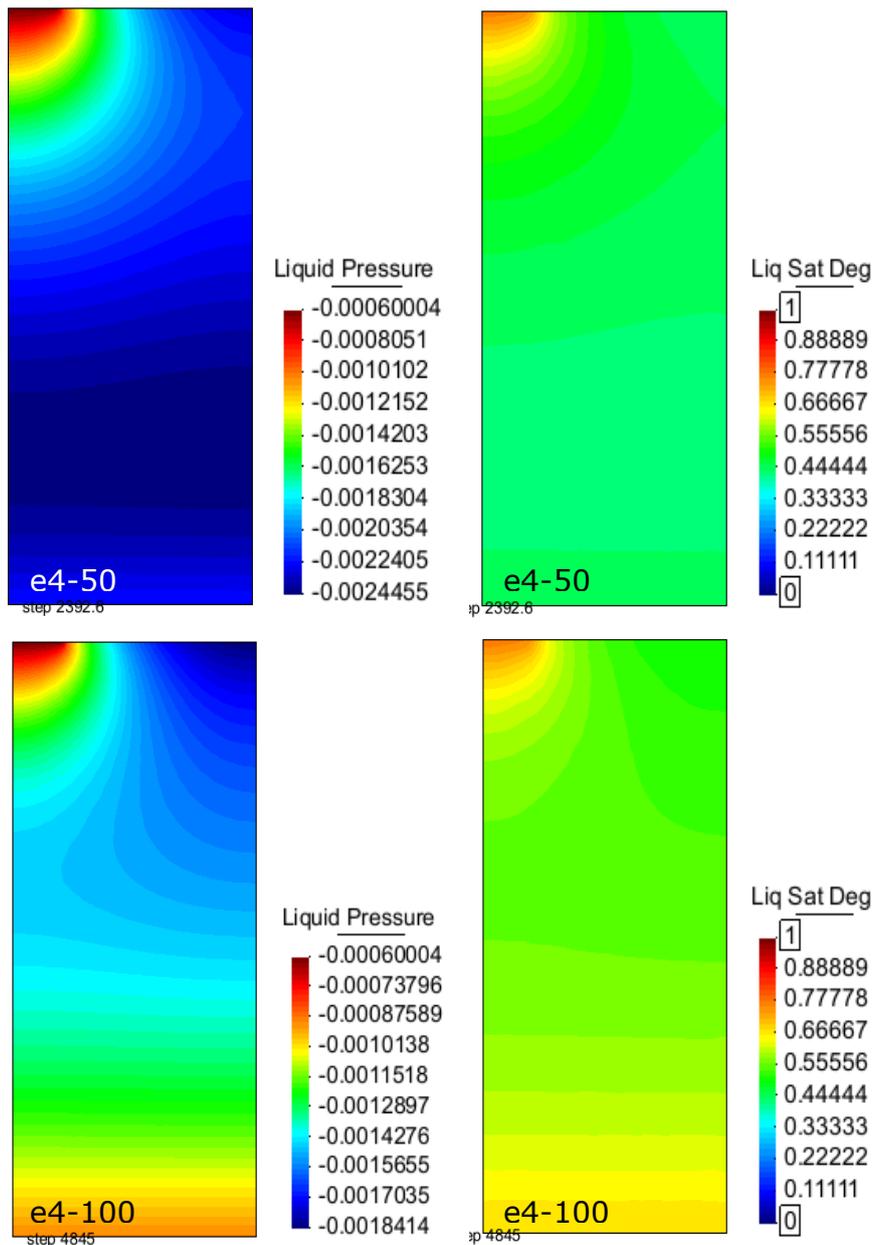


Figura 47 - Evolución de la saturación y las presiones dentro del material al 50% y 100% de la simulación del ensayo 4 de la arena en Code_Bright. (Saturación inicial 30%, succión inicial 9 kPa) Escala de presión en figura en MPa. Fuente: Propia.

El perfil de presiones cambia linealmente tanto con la saturación del material como con la profundidad de la muestra dentro del recipiente. En la zona de la superficie directamente bajo el infiltrómetro se puede observar el efecto de la succión prescrita colocada para simular la tensión aplicada por el capilar al disco poroso.

Si se observan los contrastes de los colores como isolíneas se aprecia que aunque el fluido se infiltre a una profundidad mayor dentro del recipiente, existen zonas cerca de la superficie que conservan los valores de succión iniciales, manteniendo poca variación con el paso del tiempo.

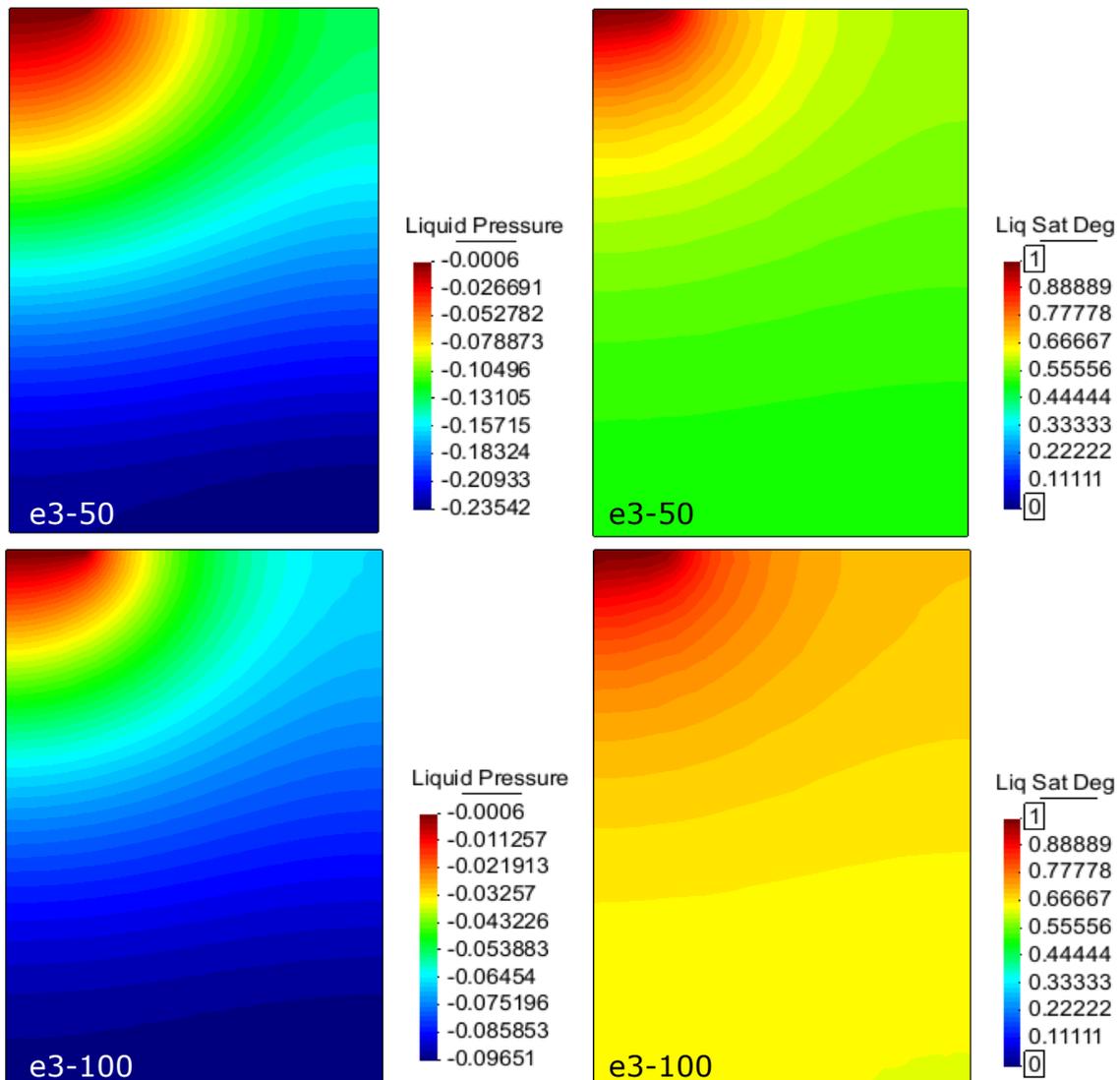


Figura 48 - Evolución de la saturación y las presiones dentro del material al 50% y 100% de la simulación del ensayo 3 de la arcilla en Code_Bright. (Saturación inicial 51%, succión inicial 0.45 MPa) Escala de presión en figura en MPa. Fuente: Propia.

La figura 48 corresponde al perfil de saturación y presiones de la arcilla para el ensayo 3, que corresponde a una saturación del 51% y un valor de succión de 0.45 MPa.

A diferencia de los perfiles mostrados para la arena, los niveles de saturación en la arcilla son mucho más homogéneos en cuanto a la profundidad. Esto es debido a que la baja permeabilidad del material no permite el paso del agua a todo el recipiente, conservando succiones relativamente altas en la parte inferior. Dicho comportamiento puede influir en la forma constante de la infiltración durante los ensayos realizados para este material.

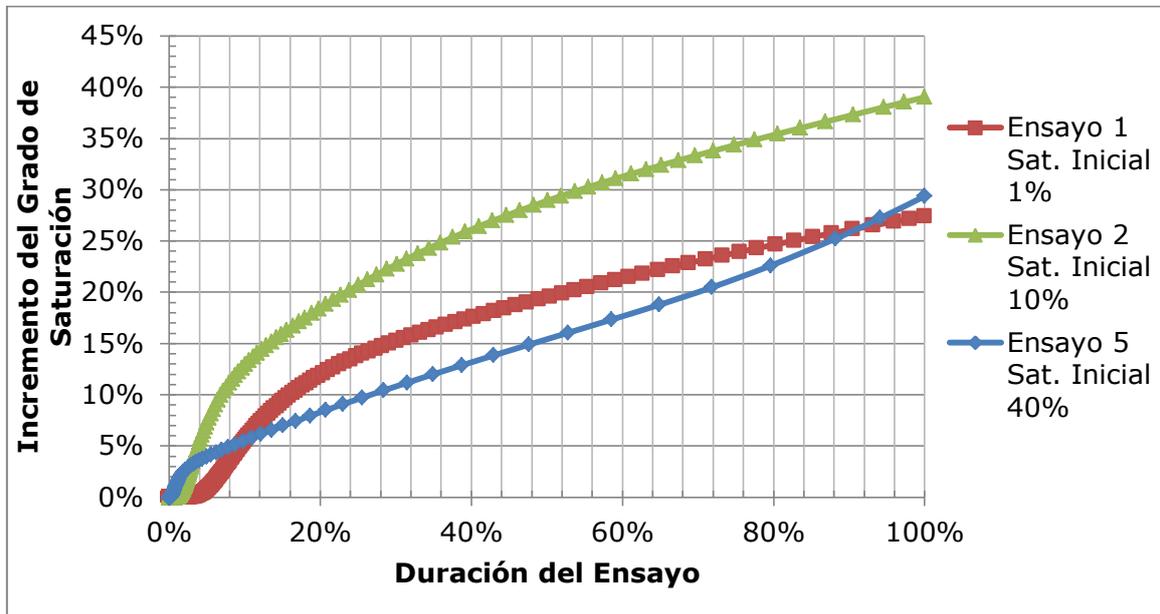


Figura 49 - Evolución de la saturación de la arena en un punto a 5 cm de profundidad en el centro del recipiente para la simulación. Fuente: Propia.

Las figuras 49 y 50 muestran la evolución de un punto a una profundidad de 5 cm obtenido de la simulación del ensayo en la arena y la arcilla respectivamente. Los valores del tiempo son representados como un porcentaje de la duración total los intervalos de cada simulación. El grado de saturación es mostrado a partir de la saturación inicial para poder apreciar el cambio de succión en el tiempo a partir del inicio del ensayo para el punto seleccionado.

Se debe tener en cuenta que a mayor saturación inicial, el tiempo de infiltración es mucho mayor. Los ensayos 1 y 2 en la arena muestran un comportamiento no lineal debido a la gran disminución de la succión que se presenta al inicio del ensayo. La pendiente para el segundo ensayo es mucho mayor, esto indica un avance del fluido mucho más rápido dentro del

material considerando que la permeabilidad relativa del primer ensayo es mayor al momento de analizar los nodos en la superficie.

Para una saturación inicial mayor, se exhibe un comportamiento casi lineal en la mayor parte del ensayo, esto puede observarse para las simulaciones del ensayo 5 de la arena y los ensayos en arcilla.

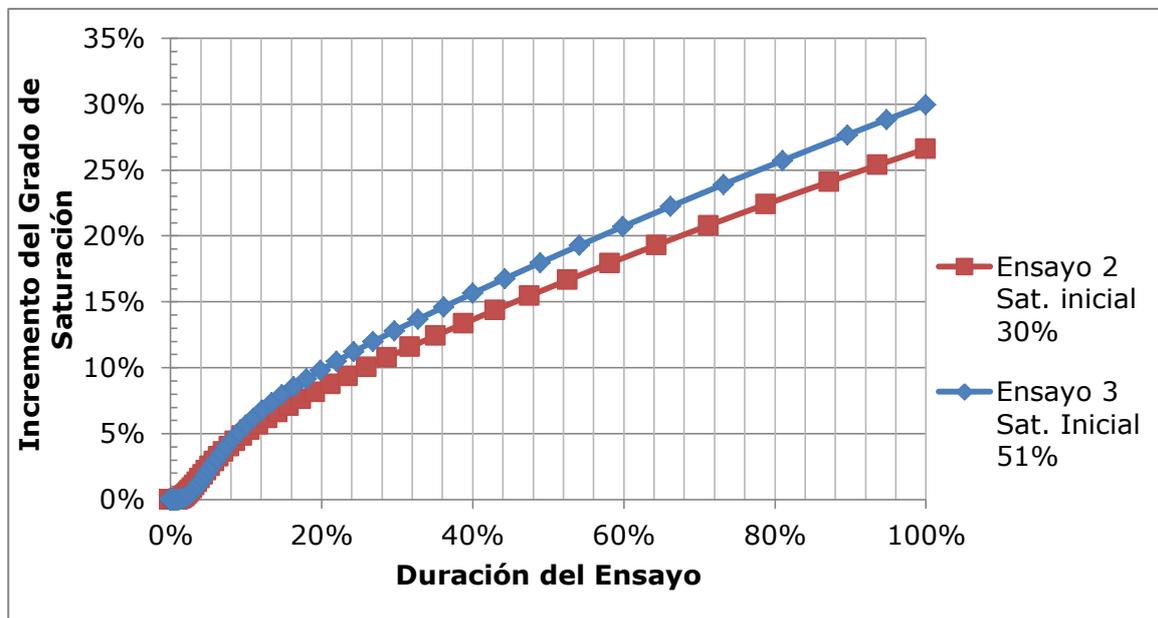


Figura 50 - Evolución de la saturación de la arcilla en un punto a 5 cm de profundidad en el centro del recipiente para la simulación. Fuente: Propia

La diferencia de succión en los ensayos de la arcilla es considerable en comparación a los cambios en la arena, sin embargo, las pendientes observadas en la figura 50 son bastantes parecidas. El paso del fluido a través de la muestra es mucho más homogéneo.

5.1 Curvas de infiltración modeladas en CODE_BRIGHT.

La infiltración de los ensayos se realizó para 2 conjuntos de parámetros diferentes.

El primero considera la permeabilidad promedio obtenida de los ensayos de carga variable y carga constante realizados en el laboratorio para la arena. Y para la arcilla del Campus Nord se tomó como valor de referencia la permeabilidad obtenida por Barrera (2002) en la fase de saturación durante un ensayo triaxial automático GDS con dicho material.

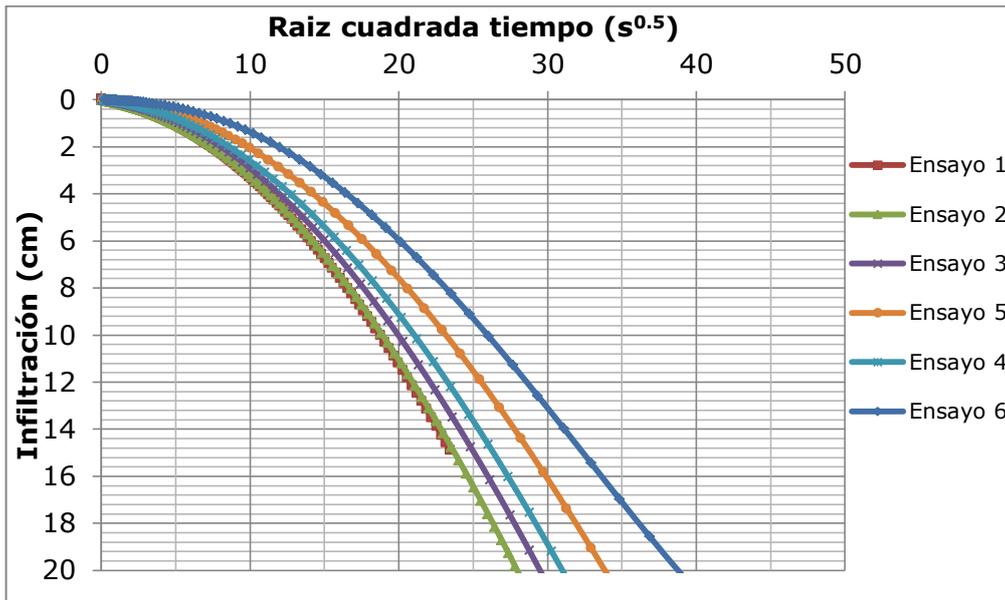


Figura 51 - Grafico de infiltración calculada para la Arena Lab-UPC. Permeabilidad saturada fija de 1.05E-4 m/s. Fuente: Propia.

La figura 51 muestra el comportamiento de las curvas de la infiltración en la simulación tomando una permeabilidad saturada fija de 1.05 E-04 m/s. A excepción del primer ensayo, las pendientes de las curvas calculadas difieren considerablemente de las medidas, el volumen de agua registrado al final de la simulación, en algunos casos, corresponde a 3 y 4 veces el valor real.

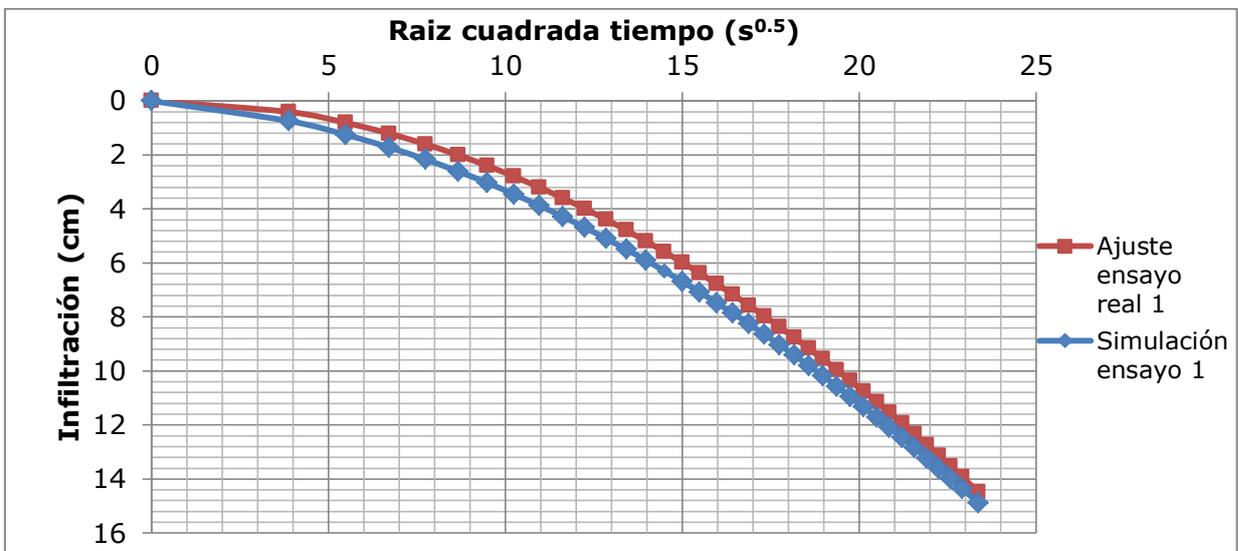


Figura 52 - Comparación de la solución analítica de los valores observados de infiltración con los resultados de la simulación en Code_Bright en función de la raíz cuadrada del tiempo ($s^{0.5}$) para el ensayo 1 de la arena. Fuente: Propia.

El ensayo 1 para la arena muestra un total de 14.9 cm infiltrados para la simulación y 14.1 cm para el ensayo real en 546 segundos. Esto indica un muy buen ajuste con diferencia de 5.6% de volumen que corresponden a 5 mililitros de agua adicionales registrados en el modelo en el mismo lapso de tiempo que para el ensayo real (figura 52).

Para los siguientes ensayos, este efecto aumenta, causando una mayor diferencia en el volumen registrado al final de la simulación. La figura 53, muestra la curva de infiltración para el ensayo 5, donde se observa una diferencia de aproximadamente 22 cm adicionales infiltrados, más del doble utilizado en el ensayo.

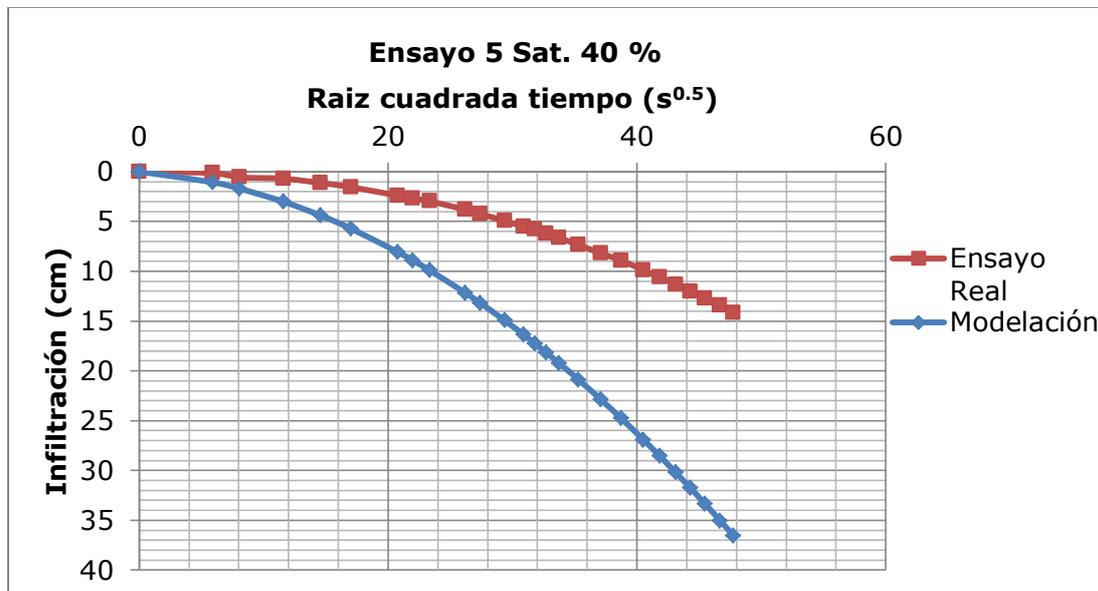


Figura 53 - Representación de la dispersión de las funciones al comparar la curva real de infiltración con el resultado de la modelación en Code_Bright sin calibrar. Fuente: Propia.

Como medida de ajuste, se procedió a cambiar las permeabilidades intrínsecas para cada ensayo con el fin de ajustar el volumen final simulado al real. Los valores de permeabilidad utilizados se encuentran en la tabla 19.

Tabla 19 - Valores de permeabilidad intrínseca (m^2) utilizados para calibrar las curvas de infiltración en el modelo de Code_Bright para la arena.

Ensayo	Succión (kPa)	Saturación	Permeabilidad Intrínseca ajustada (m^2)
1	100.00	0.65%	1.05E-11
2	13.00	11.36%	4.60E-12
4	1.90	35.39%	3.30E-12
5	0.80	47.13%	3.00E-12
6	0.62	79.39%	2.60E-12
3	3.50	30.90%	1.20E-12

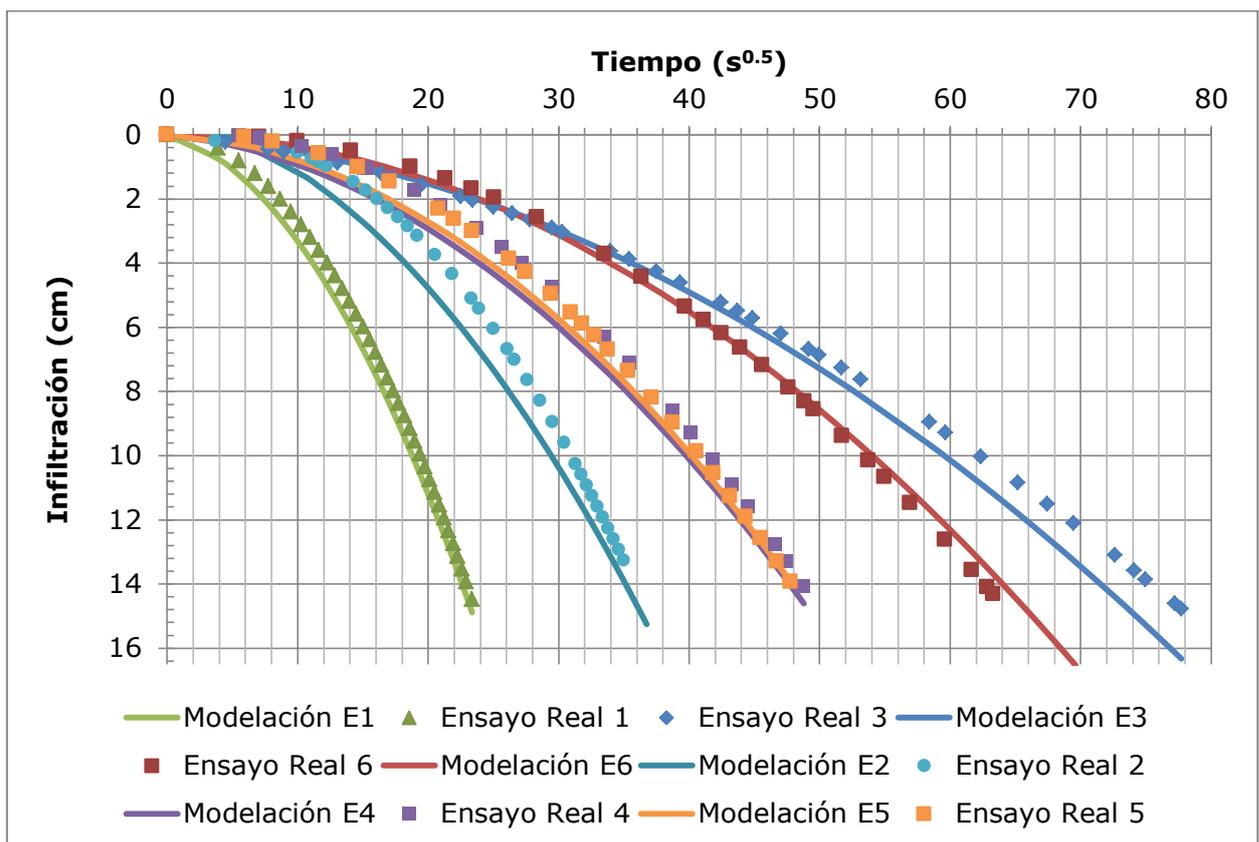


Figura 54 - Comparación de las soluciones analíticas de los valores de infiltración observados (marcadores) con las funciones resultantes de la calibración de la simulación en Code_Bright para la arena. Fuente: Propia.

El gráfico 54 muestra la evolución de la infiltración en la raíz cuadrada del tiempo para las simulaciones utilizando los parámetros de permeabilidad intrínseca ajustada.

Estos ajustes por permeabilidad intrínseca indican que al momento de realizar el remezclado del suelo para lograr la homogenización de la humedad, se modificó la estructura inicial de la muestra, provocando una restructuración de los poros y consecuentemente afectando la permeabilidad saturada del material.

En cualquier caso, salvo en el primer ensayo, los valores obtenidos son bastantes parecidos y algo más pequeños que el valor obtenido en el ensayo de permeabilidad, $1.68E-11 \text{ m}^2$ y mayores que los valores obtenidos utilizando el modelo de Zhang (entre $1.2E-12$ y $1.05E-11 \text{ m}^2$)

6. CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se recopilan todos los datos obtenidos para el cálculo de las permeabilidades saturadas y no saturadas de los materiales, a partir de las fórmulas empíricas y procedimientos experimentales tratados en esta tesina.

Los coeficientes de permeabilidad saturada fueron calculados utilizando las relaciones comentadas a partir del diámetro nominal de las partículas donde se retiene el 90% del peso de los materiales.

La tabla 20 muestra los valores para cada uno de los autores, para ambos tipos de suelo las permeabilidades mayores se presentan para el método de Hazen, siendo la relación de Terzaghi, la más conservadora.

Tabla 20 - Conductividades hidráulicas resultantes utilizando las relaciones empíricas planteadas en el apartado 1.

Material	Permeabilidad Saturada (m/s)					
	D_{10} (cm)	Hazen	Terzaghi		Schlichter	
			C_0		C	
Arena	1.69E-02	2.8E-04	460	1.5E-04	26.65	8.2E-05
Arcilla	9.00E-05	8.1E-09	400	5.0E-08	18.45	3.3E-09
n		Arena 0.375	Arcilla 0.42			

Los ensayos experimentales realizados en la arena, se llevaron a cabo utilizando el mismo material en un estado saturado. Se observa (tabla 21)

una dispersión considerable para las permeabilidades a carga constante y carga variable de la arena.

El equipo de carga variable, tiene un tiempo considerable de uso, por lo que podría presentar problemas de filtraciones u obstrucción de los poros de los discos que permiten la entrada del agua a la zona del material. Esto se traduce en un aumento de la pérdida de carga y una disminución en el valor de la permeabilidad calculada a partir de los resultados del ensayo, restando fiabilidad al valor obtenido.

Tabla 21 - Resultados experimentales de las conductividades hidráulicas para ambos materiales.

Arena Lab-UPC	Permeabilidad saturada (m/s)
Carga constante	1.6E-04
Carga variable	7.5E-05
Arcilla CN	
Carga constante (Barrera 2002)	2.5E-09

El método de Zhang-van Genuchten utiliza la curva de infiltración y un valor A obtenido a partir de los parámetros de la curva de retención del material. En la tabla 22 se encuentran los valores de A calculados empleando los parámetros de vG obtenidos de la curva de retención medida en el laboratorio para la arena y los valores tomados de Barrera (2002) para la arcilla.

Tabla 22 - Cálculo de la conductividad hidráulica utilizando el método de Zhang-vG y los parámetros de la curva de retención medida en el laboratorio para la arena y por Barrera (2002) para la arcilla.

Coefficiente A	Arena	Arcilla
	0.86	8.71
Ensayos Arena	Pendiente de infiltración $C_1(\text{cm/s}^{0.5})$	Conductividad hidráulica (cm/s)
1	0.0264	3.07E-02
2	0.0143	1.66E-02
3	0.0019	2.21E-03
4	0.0066	7.67E-03
5	0.0067	7.79E-03
6	0.0032	3.72E-03
Ensayos Arcilla		
2	2.00E-05	2.30E-06
3	1.00E-05	1.15E-06

Como medida de comparación se emplearon valores predeterminados de curvas de retención obtenidos por Carsel y Parrish (1988), para materiales con descripción parecida a los utilizados en las pruebas experimentales. La tabla 23 presenta los valores de conductividad saturada, y los parámetros correspondientes a la curva de retención de los materiales e infiltrómetro.

Tabla 23 - Cálculo de la conductividad hidráulica utilizando el método de Zhang-vG y los parámetros de la curva de retención predeterminados por los estudios de Carsel & Parrish (1988).

Material	Arena	Arena Limosa
A	0.667	2.026
n/h₀	2.68	2.28
radio	1.5 cm	
a	0.14	0.124
Saturación	k _s m/s	k _s cm/s
1%	3.9E-04	1.3E-04
10%	2.1E-04	7.0E-05
20%	2.8E-05	9.3E-06
30%	9.8E-05	3.2E-05
40%	1.0E-04	3.3E-05
70%	4.8E-05	1.5E-05
Material	Arcilla	A= 10.38
Saturación	C ₁	k _s
30%		9.6E-08
51%		9.6E-09

Para el cálculo de la conductividad hidráulica no saturada, se utilizó la derivación de la ecuación de Maulem (1976) realizada por van Genuchten en su modelo de para la obtención de la conductividad relativa (Ec. 8), la cual está expresada en función de la succión. Se conoce que la permeabilidad hidráulica no saturada (k_w) es igual a la conductividad hidráulica (k_s) multiplicado por la conductividad relativa (k_r). La conductividad hidráulica saturada de referencia fue tomada a partir de la calibración del modelo en Code_Bright (tabla 24).

Tabla 24 - Permeabilidad no saturada calculada utilizando la ecuación de vG (Ec. 8) para la conductividad relativa tomando como referencia la permeabilidad saturada calibrada en Code_Bright para la arena. Fuente: Propia.

Permeabilidades (cm/s)					
Arena n=1.6					
h (kPa)	k_r	k_s	k_s ajustada	k_w	k_w ajustada
100	0.4233	1.05E-02	1.05E-02	4.44E-03	4.44E-03
50	0.5837	1.05E-02	4.60E-03	6.13E-03	2.68E-03
9	0.8327	1.05E-02	1.20E-03	8.74E-03	9.99E-04
4.4	0.8878	1.05E-02	3.30E-03	9.32E-03	2.93E-03
2	0.9282	1.05E-02	3.00E-03	9.75E-03	2.78E-03
0.9	0.9545	1.05E-02	2.60E-03	1.00E-02	2.48E-03
Arcilla CN n=1.3					
h (MPa)	k_r	k_s	k_s ajustada	k_w	k_w ajustada
2.5	0.6491	8.10E-07	8.00E-08	5.26E-07	5.19E-08
0.45	0.7811	8.10E-07	7.00E-08	6.33E-07	5.47E-08

La figura 55 muestra el comportamiento de los valores de k_r de la arena, obtenidos a partir de los parámetros de la curva de retención medida en el laboratorio para los distintos niveles de succión. Se puede observar que, a mayor nivel de saturación los valores de conductividad relativa se acercan más a la unidad.

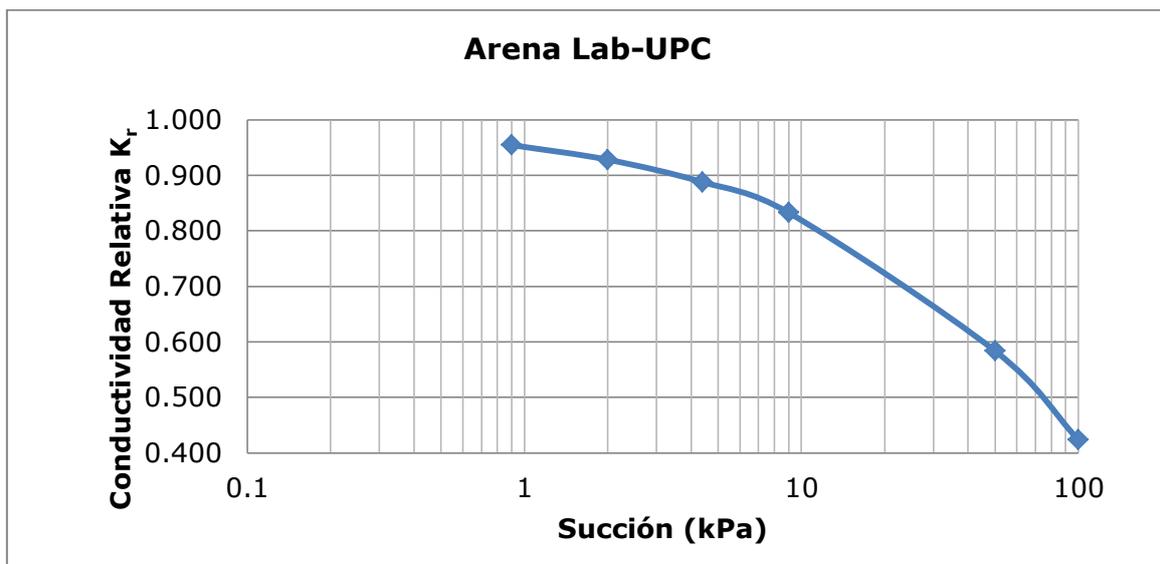


Figura 55 - Variación de la conductividad relativa k_r en la arena, calculada a partir de la relación de van Genuchten (ec. X). Fuente: Propia.

Comparando las conductividades hidráulicas saturadas obtenidas para la arena (figura 56), se observa una dispersión de aproximadamente un orden de magnitud. El valor máximo para la relación de Hazen y el mínimo para el ensayo de permeabilidad a carga variable. Por otro lado, la relación de Schlichter arrojó un k_s bastante parecido al observado en el ensayo experimental, por lo que podría considerarse como un valor límite si se pretenden analizar los coeficientes mínimos observables para un tipo de suelo.

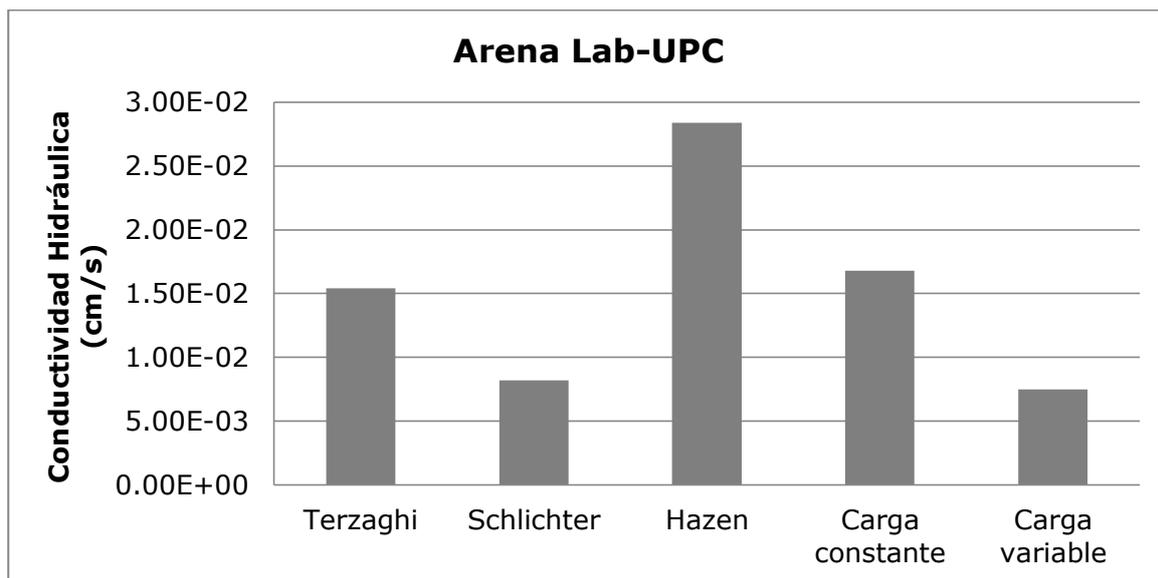


Figura 56 - Comparación de las conductividades hidráulicas obtenidas para la arena con los distintos métodos analizados. Fuente: Propia.

Para la arcilla del Campus Nord, se observa la misma tendencia (figura 57), siendo la relación de Terzaghi, un punto intermedio entre los demás métodos analizados.

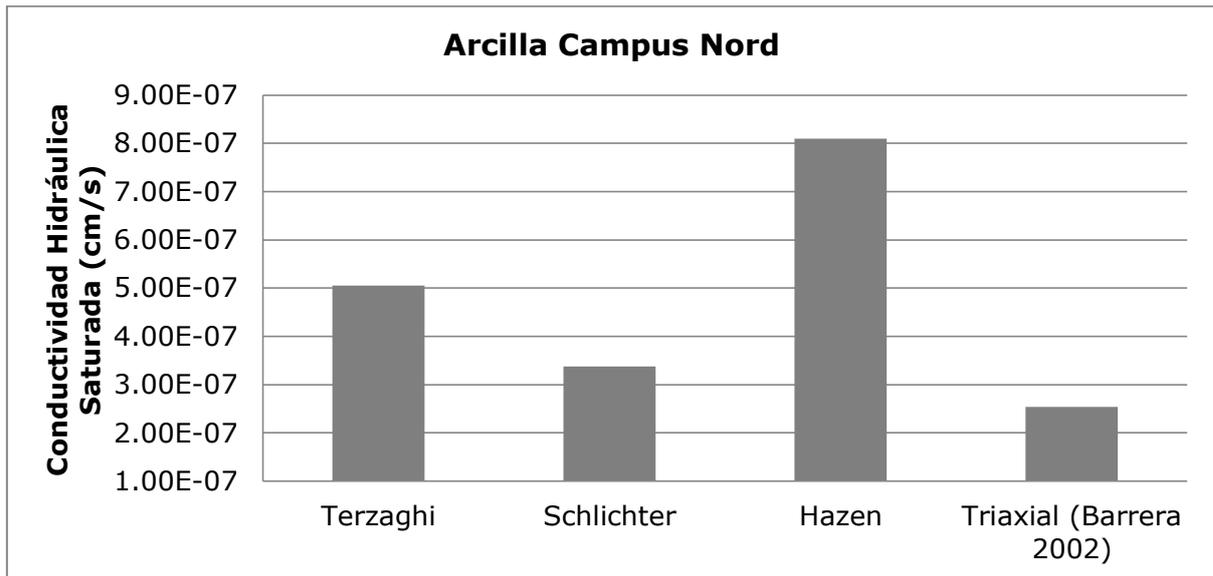


Figura 57 - Comparación de las conductividades hidráulicas obtenidas para la arcilla del campus Nord) con los distintos métodos analizados en la tesina. Fuente: Propia.

En las figuras 58 y 59 se comparan las permeabilidades obtenidas utilizando los distintos valores de A considerados para la arena y la arcilla mediante el Método de Zhang-van Genuchten.

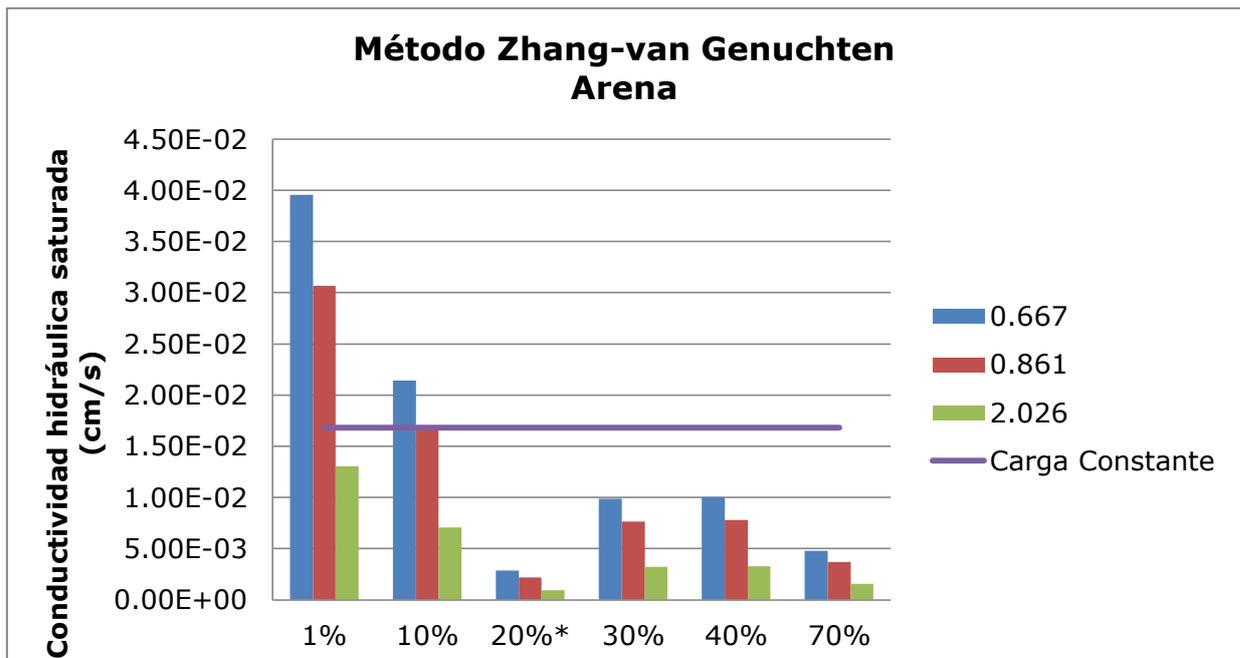


Figura 58 - Resultados de la conductividad hidráulica saturada (cm/s) mediante el método Zhang-vG, donde A=0.667 (arena), A=2.026 (arena limosa) por Carsel & Parrish (1988) y A=0.861 (Curva de retención medida en laboratorio). Fuente: Propia.

Como permeabilidad de referencia, se toma en cuenta el resultado del ensayo a carga constante, debido a que se considera la medida más directa y fiable.

Para la arena, se observa una sobreestimación de k_s obtenida a partir de ensayos con el suelo con bajas saturaciones y succiones altas. Para una saturación del 10% con un nivel de succión de 50 kPa el valor calculado de la permeabilidad saturada es muy parecido al obtenido experimentalmente. El valor de A de 0.861 es el obtenido a partir de los parámetros de la curva de retención medida en el laboratorio con el tensiómetro.

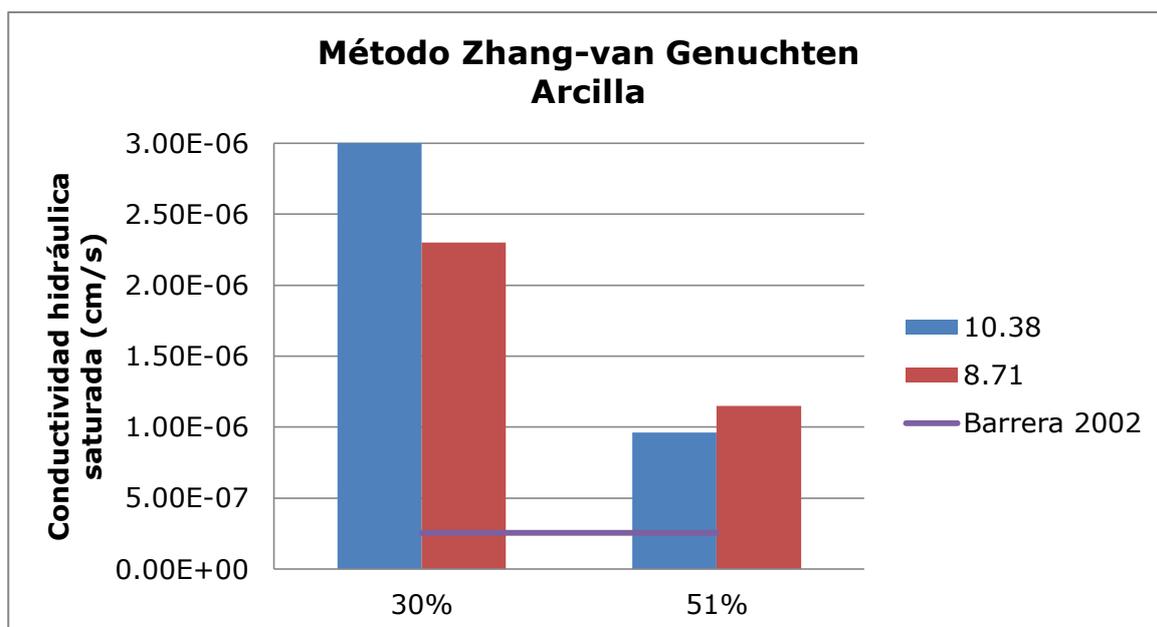


Figura 59 - Resultados de la conductividad hidráulica saturada (cm/s) utilizando el método de Zhang-vG, donde A=10.38 (arcilla) Carsel & Parrish (1988) y A=8.71 (Curva de retención medida en el laboratorio). Fuente: Propia.

Sin embargo, para la arcilla, todos los valores estimados son considerablemente mayores al propuesto por Barrera resultado de un ensayo de carga constante en un triaxial GDS. La alta succión en el material arcilloso con relación a la baja succión en la superficie del disco poroso, podría afectar la pendiente de la curva de infiltración con relación a un estado saturado.

Utilizando los valores de k_r (tabla 24) se calcula la permeabilidad no saturada en función de la conductividad hidráulica obtenida para cada ensayo a partir

de la calibración del modelo en Code_Bright. La figura 60 muestra los resultados para la arena y la figura 61 para la arcilla del Campus.

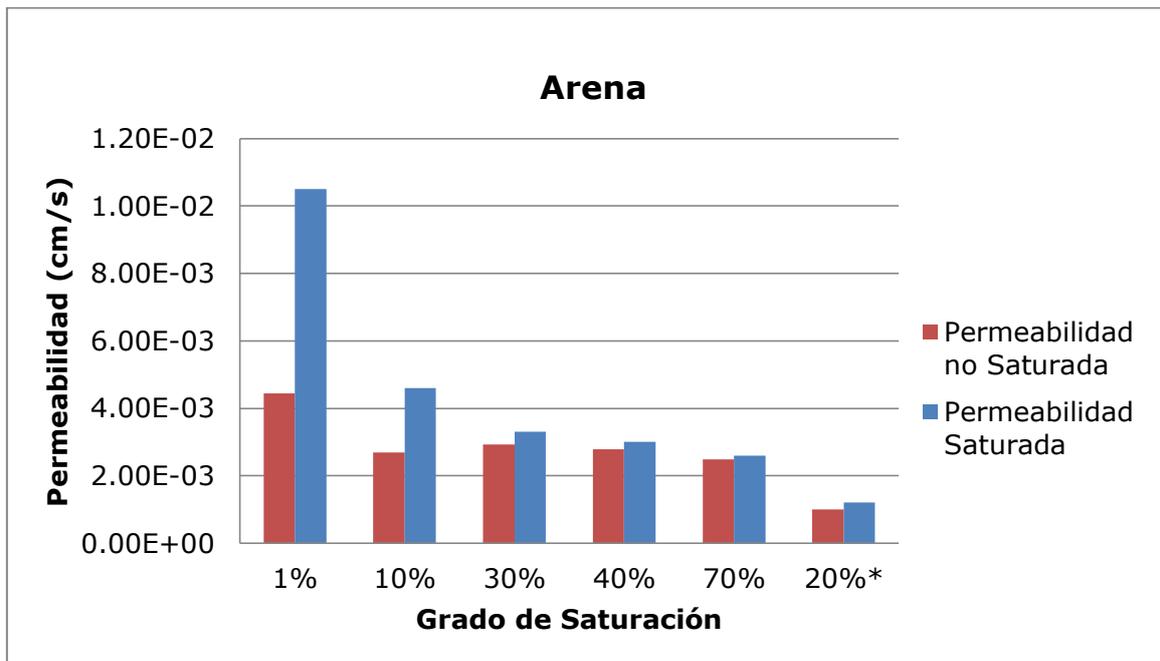


Figura 60 - Comparación de la permeabilidad saturada y no saturada (cm/s) de la arena para los diferentes ensayos en función del grado de saturación. 20%* para el ensayo número 3 no representa la saturación real del mismo. Fuente: Propia

Si se asume que el ensayo 3 para una saturación inicial del suelo del 20%, posee una saturación mucho mayor que el ensayo 6 debido a no homogeneizarse la humedad del material, se observa una tendencia decreciente del coeficiente de la permeabilidad no saturada a raíz de la pérdida de succión con el aumento de saturación de la muestra.

Este comportamiento no se exhibe para la arcilla en la figura 61. El rango de variación de los puntos analizados es mucho menor en comparación al de la arena.

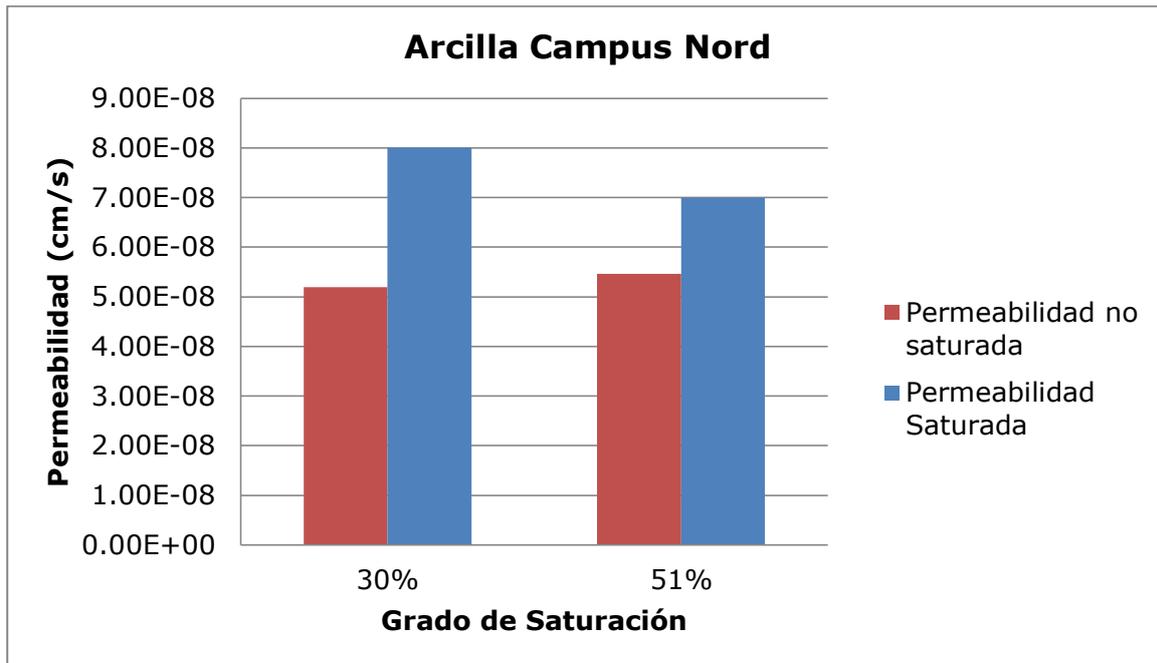


Figura 61 - Comparación de la permeabilidad saturada y no saturada (cm/s) de la arcilla del Campus Nord para los diferentes ensayos en función del grado de saturación. Fuente: Propia

Finalmente, se realizó una comparación entre los distintos métodos mediante el cálculo del error cuadrático medio (ECM) de los valores obtenidos con relación al resultado de la permeabilidad en el ensayo de carga constante para ambos tipos de suelo.

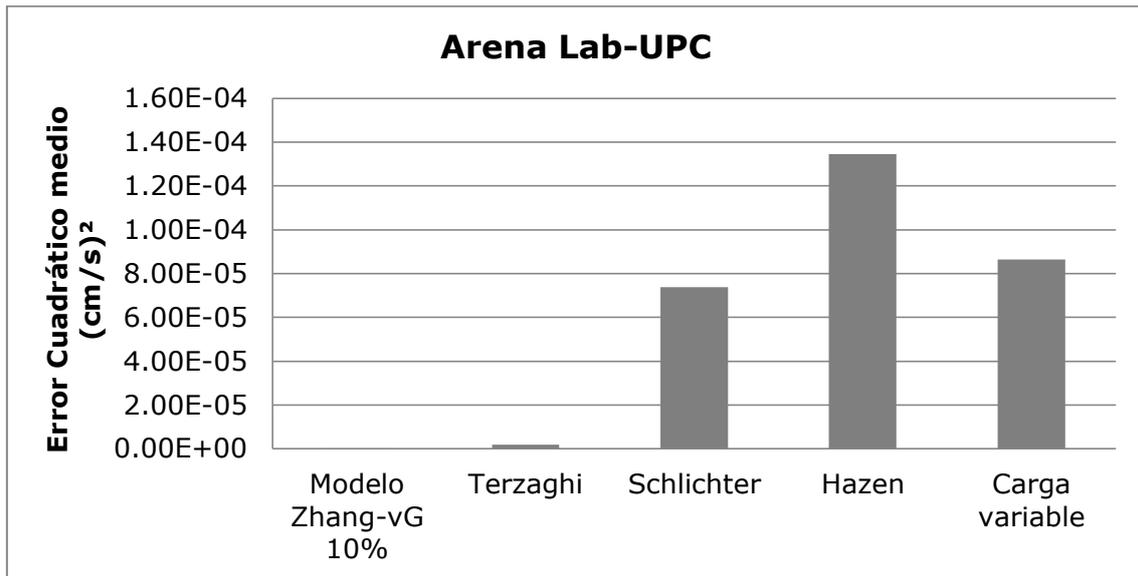


Figura 62 - Representación del error cuadrático de los valores calculados con relación al resultado de 1.6E-02 (cm/s) obtenido del ensayo de permeabilidad de carga constante para la arena. Fuente: Propia.

La conductividad hidráulica calculada de 2.14 E-02 cm/s con el modelo Zhang-vG es el más cercano, con un error cuadrático de 3.6E-08 (cm/s)², seguido por la relación de Terzaghi con 1.9E-06 (cm/s)² (figura 62). Claramente los demás métodos sobreestiman los valores de permeabilidad saturada, no obstante, manteniéndose en un rango aceptable para un material arenoso.

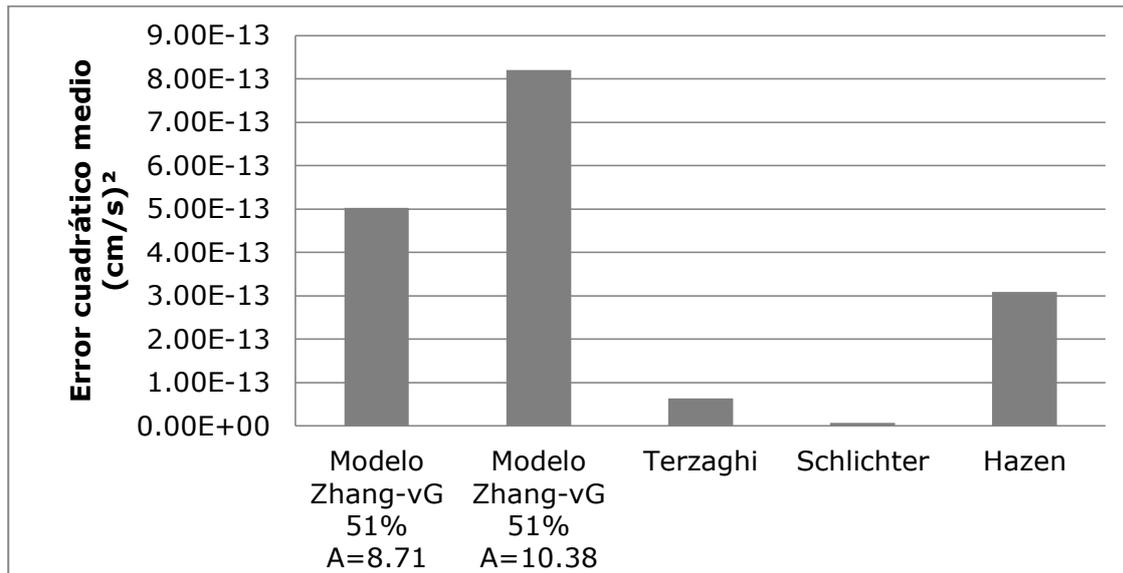


Figura 63 - Representación del error cuadrático de los valores calculados con relación al resultado de 2.5E-07 (cm/s) obtenido del ensayo de permeabilidad de carga constante para la arcilla del Campus Nord. Fuente: Propia.

Por otro lado, la figura 63 muestra que los resultados obtenidos a partir del modelo de Zhang-vG son mucho más elevados que el valor planteado por Barrera (2002), tomado como referencia en esta comparación.

La relación empírica de Schlichter, que considera el grado de compacidad del suelo, es el más cercano al resultado obtenido a la fase de saturación de la arcilla en el ensayo de carga constante en el triaxial GDS.

Las aproximaciones mediante Zhang-vG son directamente afectadas por las altas succiones presentes en la arcilla de 2.5 y 0.45 MPa en relación a la succión de 0.6 kPa.

7. CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Conclusiones.

El ensayo de infiltración utilizando el infiltrómetro de succión, permite determinar las propiedades hidráulicas de un suelo a partir de su estado no saturado.

La imposición de una succión en el depósito de agua que supe el flujo en el material, induce un régimen estable necesario para calcular la pendiente de infiltración en función del tiempo. Sin la succión aplicada, la velocidad de salida de agua desde el infiltrómetro cambiaría constantemente con el grado de saturación del material, arrojando valores dispersos de la conductividad hidráulica del suelo.

La velocidad de infiltración dentro del material disminuye con el aumento del grado de saturación en la muestra. La variación de la pendiente de infiltración para un mismo grado de saturación en un material, depende directamente de la relación de potencial entre la succión del infiltrómetro y la succión de la muestra.

Debido a que el dispositivo solo permite una succión constante de 6 cm (0.6 kPa), su utilización en rangos de saturación muy altos provoca un aumento exponencial en la duración del ensayo. Esto, en materiales de poca permeabilidad resulta muy desfavorable, debido a que un solo ensayo puede tardar alrededor de 7 días (Arcilla Campus Nord) con toma de medidas manuales realizadas periódicamente.

En este lapso de tiempo cualquier cambio de humedad en la muestra puede afectar los resultados del ensayo, cuestionando la factibilidad del mismo en el campo, a no ser que se tomen las medidas necesarias para mantener la saturación del suelo.

La simulación del ensayo en un programa de elementos finitos permite obtener información acerca de los niveles de succión y saturación a diferentes profundidades de la muestra sin incidir en la manipulación del material. Sin

embargo, el éxito de la simulación recae directamente en la exactitud de los parámetros de la curva de retención del suelo utilizado.

Para el caso de arenas es necesaria la utilización de equipos de alta precisión debido a que es imperativo medir muy bajas succiones en niveles cerca del estado saturado.

En las arcillas es importante el empleo de dispositivos con alta capacidad de medida y valores elevados de presión de cavitación por consecuencia de los niveles de succión que se muestran en los estados menos saturados. Van Genuchten 1980, plantea que el grado de saturación residual es imprescindible para la estimación correcta de la conductividad relativa y saturada a través de su modelo. Este valor solo puede ser obtenido analizando el comportamiento de la curva de retención en materiales muy secos, lo que implica altos niveles de succión.

Esto explica en parte, la sobreestimación de los coeficientes de permeabilidad saturada observados para el modelo Zhang-van Genuchten en los niveles de saturación de 30% y 51% de aproximadamente 1 orden de magnitud. ($1E-7$ a $1E-6$ cm/s) con relación al resultado de permeabilidad del ensayo de carga constante de Barrera (2002).

La conductividad hidráulica en la arena obtenida para una saturación inicial del 10% y una succión de 50 kPa con el método de Zhang-vG es de $2.14E-02$ cm/s. Esto representa un 2% de error con relación al ensayo de permeabilidad con carga constante.

En la arcilla, la relación de Schlichter con un coeficiente de permeabilidad saturada de $3.38E-07$ cm/s es la más cercana al resultado obtenido por Barrera (2002) de $2.56E-07$ cm/s, para un error cuadrático de $8.40E-8$ (cm/s)².

7.2 Líneas futuras de investigación.

Para reforzar algunos puntos tratados en esta tesina y obtener resultados adicionales, se podrían considerar algunas de las siguientes proposiciones:

- La utilización de un equipo de infiltración que permita la variación de la succión dentro del depósito, disminuirá el tiempo de ensayo y permitirá una mayor densidad de puntos. Así como también la solución a través de métodos que necesitan ver la variación de los puntos a distintas cargas constantes, como por ejemplo el método de Ankeny (Ankeny et, al. 1991).
- El empleo de una cantidad considerable de moldes que permita la preparación simultánea y elimine la necesidad para homogeneizar la humedad del material provocando la alteración del estado físico del material.
- Utilización de muestras inalteradas para un mejor control de las densidades secas de los especímenes ensayados.
- La medición de la succión dentro de cámaras reguladoras de humedad y densidad, para la obtención de un mayor grado de precisión en los parámetros de la curva de retención.

8. REFERENCIAS

- Angulo-Jaramillo, R., Vandervaere, J.-P., Roulier, S., Thony, J.-L., Gaudet, J.-P., & Vauclin, M. (2000). Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrimeters. *Soil and Tillage Research*, 55(1-2), 1-29. [http://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00098-2](http://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00098-2)
- Ankeny, M. D., M. Ahmed, T.C. Laspar and R. Horton (1991). "Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity" *Soil Science Society of America Journal* 55; 467-470.
- ASTM D 2434. (2006). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) using Water Picnometer., 2434-68.
- ASTM D 6913-09 (2009), Standard Test Methods for Partice-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, V.04.09
- ASTM D 854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *ASTM Standard Guide*, 4(May), 1-8. <http://doi.org/10.1520/D0854-10>.
- Carsel, R. F. and R. S. Parrish (1988). Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. *Water Resources Research* 24; 755-769
- Chou, T. (2016). A free GUI application for solving the van Genuchten parameters using non-linear least-squares minimization and curve-fitting, (January), 1-5.
- Decagon Devices, Inc. (2014) Mini Disk Infiltrometer User Manual, V. September 10, Decagon Devices, Inc.
- Fatehnia, M. (2014). Comparison of the Methods of Hydraulic Conductivity Estimation from Mini Disk Infiltrometer. *EJGE*, 19(2014), 1048-1062.
- GHANBARIAN-ALAVIJEH, B., LIAGHAT, A., HUANG, G. H., & VAN GENUCHTEN, M. T. (2010). Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data. *Pedosphere*, 20(4), 456-465. [http://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60035-5](http://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60035-5)
- HAN, X. W., SHAO, M. A., & HORTON, R. (2010). Estimating van Genuchten Model Parameters of Undisturbed Soils Using an Integral Method. *Pedosphere*, 20(1), 55-62. [http://doi.org/10.1016/S1002-0160\(09\)60282-4](http://doi.org/10.1016/S1002-0160(09)60282-4)
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de Suelos TOMO I, Fundamentos de la mecánica de Suelos*. (1era ed.). México: Limusa. Pp. 51-54, pp. 191-206.

- Livingston, N. J., & Topp, G. C. (2006). Chapter 71 Soil Water Potential. In *Agriculture* (2006th ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2000). Estimation of sorptivity from disc-permeameter measurements. *Geoderma*, 95(3-4), 305-324. [http://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00096-8](http://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00096-8)
- Nimmo, J. R. (2004). Porosity and pore size distribution. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 295-303. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05265-9>
- Regalado, C. M., & Muñoz-Carpena, R. (2004). Estimating the saturated hydraulic conductivity in a spatially variable soil with different permeameters: A stochastic Kozeny-Carman relation. *Soil and Tillage Research*, 77(2), 189-202. <http://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.008>
- Simunek, J. (1998). Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. *Soil and Tillage Research*, 47(1-2), 27-36. [http://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00069-5](http://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00069-5)
- van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892. <http://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Ventrella, D., Losavio, N., Vonella, A. V., & Leij, F. J. (2005). Estimating hydraulic conductivity of a fine-textured soil using tension infiltrometry. *Geoderma*, 124(3-4), 267-277. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.005>
- Yang, X., & You, X. (2013). Estimating parameters of van genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 7(5), 1977-1983. <http://doi.org/10.12785/amis/070537>
- Zhang, R. (1997^a) Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61; 1024-1030
- CODE_BRIGHT USER'S GUIDE. (2016). UPC.

9 ANEXOS

Derivación de la ecuación de Darcy para el ensayo de carga variable.

$$h_s = Z + \frac{U}{\gamma_w} = h_0 = 0$$

$$h_E = Z + \frac{U}{\gamma_w} = -(L + x) + (L + x + y) \frac{\gamma_w}{\gamma_w} = -y(t)$$

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{-a \Delta y}{\Delta t}$$

$$Q = \frac{-a dy}{dt}$$

$$\frac{-a dy}{A dt} = -k \left(\frac{-y}{L} \right)$$

$$\int \frac{-dy}{y} = \int k \frac{A}{La} t$$

$$\ln y_0 - \ln y = \frac{kA}{La} t$$

$$\ln \frac{y_0}{y(t)} = \frac{kA}{La} t$$

Valores medidos para ensayo de permeabilidad de carga constante

L	15	cm	A	0.0063	m²				
	h1	h2	h3	∇h	Vol. agua	tiempo	Caudal	C. hidráulica	
E1	8.7	12.4	14.5	0.387	41.34	87.4	4.73E-07	1.94E-04	
E2	9.8	15	18.1	0.553	48.3	71.3	6.71E-07	1.94E-04	
E3	8	10.2	11.3	0.220	28.19	148.2	1.90E-07	1.37E-04	
E4	8.3	15.8	22.4	0.940	73.88	89.0	8.30E-07	1.40E-04	

Parámetros de Carsel y Parrish (1988) para el método Zhang-vG para infiltrómetro de radio de 2.25 cm

	radius	2.25	A							
	alpha	n/h ₀	-0.5	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
sand	0.145	2.68	2.835701	2.40407	1.727908	1.241921	0.892621	0.641565	0.46112	0.331427
loamy sand	0.124	2.28	2.9853	2.786831	2.4286	2.116417	1.844363	1.60728	1.400674	1.220625
sandy loam	0.075	1.89	3.877062	3.887982	3.909913	3.931969	3.954148	3.976453	3.998884	4.021441
loam	0.036	1.56	5.461148	5.717657	6.267384	6.869965	7.530482	8.254505	9.048139	9.918077
silt	0.016	1.37	7.921451	8.177401	8.714378	9.286617	9.896433	10.54629	11.23883	11.97683
silt loam	0.02	1.41	7.102076	7.367933	7.929874	8.534674	9.185601	9.886173	10.64018	11.45169
sandy clay loam	0.059	1.48	3.210664	3.523317	4.242925	5.109507	6.153081	7.409796	8.923184	10.74567
clay loam	0.019	1.31	5.857535	6.10902	6.644845	7.227667	7.861609	8.551155	9.301181	10.11699
silty clay loam	0.01	1.23	7.893227	8.094056	8.511175	8.949789	9.411007	9.895994	10.40597	10.94223
sandy clay	0.027	1.23	3.336287	3.570465	4.089288	4.683501	5.364059	6.143508	7.036218	8.058649
silty clay	0.005	1.09	6.076318	6.169307	6.359575	6.55571	6.757895	6.966316	7.181164	7.402639
clay	0.008	1.09	3.998056	4.096399	4.300401	4.514562	4.739389	4.975412	5.223189	5.483306

Parámetros de Carsel y Parrish (1988) para el método Zhang-vG para infiltrómetro de radio de 1.5 cm

	radius		A							
	1.5		-0.5	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
	alpha	n/h ₀								
sand	0.145	2.68	4.10113	3.476884	2.498984	1.796127	1.290953	0.927863	0.666894	0.479325
loamy sand	0.124	2.28	4.317488	4.030452	3.51236	3.060865	2.667408	2.324528	2.025723	1.765327
sandy loam	0.075	1.89	5.607197	5.62299	5.654708	5.686605	5.718683	5.750941	5.783381	5.816004
loam	0.036	1.56	7.89818	8.269155	9.064198	9.93568	10.89095	11.93807	13.08586	14.34401
silt	0.016	1.37	11.45639	11.82656	12.60316	13.43076	14.3127	15.25256	16.25414	17.32148
silt loam	0.02	1.41	10.27137	10.65586	11.46857	12.34326	13.28467	14.29787	15.38834	16.56199
sandy clay loam	0.059	1.48	4.64342	5.095593	6.136326	7.389619	8.898886	10.71641	12.90515	15.54091
clay loam	0.019	1.31	8.471453	8.835163	9.6101	10.45301	11.36984	12.3671	13.45182	14.63169
silty clay loam	0.01	1.23	11.41557	11.70602	12.30928	12.94362	13.61066	14.31207	15.04963	15.82519
sandy clay	0.027	1.23	4.825101	5.163781	5.914128	6.773508	7.757764	8.885041	10.17612	11.65481
silty clay	0.005	1.09	8.787869	8.922353	9.197528	9.481189	9.773599	10.07503	10.38575	10.70606
clay	0.008	1.09	5.782184	5.924412	6.21945	6.529181	6.854336	7.195684	7.554032	7.930225

Tabla de resumen de permeabilidades para la arena

Empíricas	Terzaghi		Permeabilidades (cm/s)						
		1.54E-02							
Arena	Schlichter	8.21E-03							
	Hazen	2.84E-02							
	Carga constante	1.68E-02							
	Carga variable	7.50E-03							
	Zhang-vG	A	Saturación	1%	10%	20%*	30%	40%	70%
		Arena*	0.667	3.96E-02	2.14E-02	2.85E-03	9.90E-03	1.00E-02	4.80E-03
		Arena Calc.	0.861	3.07E-02	1.66E-02	2.21E-03	7.67E-03	7.78E-03	3.72E-03
		Arena limosa*	2.026	1.30E-02	7.06E-03	9.38E-04	3.26E-03	3.31E-03	1.58E-03
			C1	2.64E-02	1.43E-02	1.90E-03	6.60E-03	6.70E-03	3.20E-03
		vG kr(h)	Saturación	1%	10%	20%*	30%	40%	70%
			h (kPa)	100	50	9	4.4	2	0.9
			kr	0.423	0.584	0.833	0.888	0.928	0.955
			CB ks	1.05E-02	1.05E-02	1.05E-02	1.05E-02	1.05E-02	1.05E-02
			CB kw	4.44E-03	6.13E-03	8.74E-03	9.32E-03	9.75E-03	1.00E-02
		Cal. CB ks	1.05E-02	4.60E-03	1.20E-03	3.30E-03	3.00E-03	2.60E-03	
		Cal. CB kw	4.44E-03	2.69E-03	9.99E-04	2.93E-03	2.78E-03	2.48E-03	

Tabla de resumen de permeabilidades para la arcilla.

		Terzaghi	5.05E-07	Permeabilidades (cm/s)		
		Empíricas	Schlichter			3.38E-07
Arena	Experimentales	Hazen	8.10E-07			
		Triaxial (Barrera 2002)	2.54E-07			
		Zhang-vG	A	Saturación	30%	51%
		Arcilla*	10.38	9.62E-06	9.63E-07	
		Arcilla Calc.	8.71	2.30E-06	1.15E-06	
			C1	2.00E-05	1.00E-05	
		vG kr(h)		Saturación	30%	51%
				h (MPa)	2.5	0.45
				kr	0.649	0.781
				CB ks	2.50E-07	2.50E-07
				CB kw	1.62E-07	1.95E-07
				Cal. CB ks	8.00E-08	7.00E-08
		Cal. CB kw	5.19E-08	5.47E-08		

Ensayo permeabilidad con carga variable de la arena.

	d	0.008	m	a	5.02655E-05	m²	L	0.05	m			
	D	0.05	m	A	0.001963495	m ²	L*a/A	0.00128	m ⁻¹			
h	ln y(0)/y(t)	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11
70	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
65	0.0741	0.49	0.65	0.45	0.50	0.62	0.49	0.42	0.62	0.48	0.61	0.49
60	0.0800	0.99	0.96	0.91	0.93	0.82	0.87	0.87	0.62	0.62	0.88	0.67
55	0.0870	1.00	1.14	0.87	0.70	0.79	0.94	1.08	1.15	1.22	1.15	1.29
50	0.0953	1.09	1.21	0.98	0.89	0.94	0.93	1.13	1.18	1.21	1.13	1.14
45	0.1054	1.41	1.37	1.27	1.36	1.20	1.25	1.10	1.25	1.30	1.32	1.33
40	0.1178	1.43	1.66	1.44	1.33	1.39	1.32	1.33	1.51	1.62	1.50	1.55
35	0.1335	1.75	1.99	1.73	1.94	1.78	1.81	1.81	1.97	2.00	1.92	2.04
30	0.1542	2.05	2.23	1.99	1.66	1.89	1.80	1.66	1.96	2.14	1.85	2.21
25	0.1823	2.38	2.65	2.23	2.45	2.12	2.25	2.39	2.59	2.83	2.36	3.25
20	0.2231	3.56	3.70	2.94	3.03	2.95	2.92	3.17	3.32	3.97	3.44	4.61
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.49	0.65	0.45	0.50	0.62	0.49	0.42	0.62	0.48	0.61	0.49
		1.48	1.61	1.36	1.43	1.44	1.36	1.29	1.24	1.10	1.49	1.16
		1.99	2.10	1.78	1.63	1.61	1.81	1.95	1.77	1.84	2.03	1.96
		2.09	2.35	1.85	1.59	1.73	1.87	2.21	2.33	2.43	2.28	2.43
		2.50	2.58	2.25	2.25	2.14	2.18	2.23	2.43	2.51	2.45	2.47
		2.84	3.03	2.71	2.69	2.59	2.57	2.43	2.76	2.92	2.82	2.88
		3.18	3.65	3.17	3.27	3.17	3.13	3.14	3.48	3.62	3.42	3.59
		3.80	4.22	3.72	3.60	3.67	3.61	3.47	3.93	4.14	3.77	4.25
		4.43	4.88	4.22	4.11	4.01	4.05	4.05	4.55	4.97	4.21	5.46
		5.94	6.35	5.17	5.48	5.07	5.17	5.56	5.91	6.80	5.80	7.86

	1.94E-04	1.46E-04	2.11E-04	1.90E-04	1.53E-04	1.94E-04	2.26E-04	1.53E-04	1.98E-04	1.56E-04	1.94E-04
	6.92E-05	6.36E-05	7.53E-05	7.16E-05	7.11E-05	7.53E-05	7.94E-05	8.26E-05	9.31E-05	6.88E-05	8.83E-05
	5.60E-05	5.30E-05	6.26E-05	6.83E-05	6.92E-05	6.15E-05	5.71E-05	6.29E-05	6.05E-05	5.49E-05	5.68E-05
	5.84E-05	5.19E-05	6.59E-05	7.67E-05	7.05E-05	6.52E-05	5.52E-05	5.24E-05	5.02E-05	5.35E-05	5.02E-05
	5.39E-05	5.23E-05	5.99E-05	5.99E-05	6.30E-05	6.19E-05	6.05E-05	5.55E-05	5.37E-05	5.50E-05	5.46E-05
	5.31E-05	4.98E-05	5.56E-05	5.60E-05	5.82E-05	5.87E-05	6.20E-05	5.46E-05	5.16E-05	5.35E-05	5.23E-05
	5.37E-05	4.68E-05	5.39E-05	5.23E-05	5.39E-05	5.46E-05	5.44E-05	4.91E-05	4.72E-05	5.00E-05	4.76E-05
	5.19E-05	4.68E-05	5.30E-05	5.48E-05	5.38E-05	5.47E-05	5.69E-05	5.02E-05	4.77E-05	5.23E-05	4.64E-05
	5.27E-05	4.78E-05	5.53E-05	5.68E-05	5.82E-05	5.76E-05	5.76E-05	5.13E-05	4.70E-05	5.54E-05	4.27E-05
	4.81E-05	4.50E-05	5.52E-05	5.21E-05	5.63E-05	5.52E-05	5.14E-05	4.83E-05	4.20E-05	4.92E-05	3.63E-05
Promedio	6.91E-05	6.03E-05	7.48E-05	7.38E-05	7.07E-05	7.38E-05	7.60E-05	6.60E-05	6.91E-05	6.48E-05	6.69E-05

Valores de volumen observados en el ensayo de infiltración en el laboratorio para la arcilla

Ensayo 3 Arcilla CN		Ensayo 2 Arcilla CN	
Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tiempo (s)	Volumen (ml)
0	0	0	0
79243	10	6300	1
147616	19	15540	2
154801	20.5	76380	10
248406	31	94740	12
316844	38	99135	13
406841	47	171411	22
496802	56	182160	24
590410	66	263400	35
669617	74	268720	36
759620	83	343440	46
846006	97	349740	47
874810	100	434820	57
		493444	66
		542318	74
		655383	85
		749959	94
		793281	100

Valores de volumen observados en el ensayo de infiltración en el laboratorio para la arena

Ensayo 1 Arena			Ensayo 2 Arena		Ensayo 3 Arena	
Tiempo (s)		Volumen agua (ml)	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tiempo (s)	Volumen (ml)
0	0	0	0	0	0	0
15	15	5	15	1	20	1
30	15	7	110	4	60	1.5
45	15	9.5	135	5.5	80	2
60	15	11.5	150	6	125	3
75	15	14	165	6.5	170	4
90	15	16	225	9.5	215	5
105	15	19	255	11	270	6
120	15	21.5	285	12.5	380	8
135	15	24	315	14.5	506	11
150	15	27.5	345	16	548	12
165	15	30.5	375	18	626	14
180	15	34	405	19.5	700	15
195	15	36.5	465	23	773	17
210	15	39	525	27	868	19
225	15	42	600	32	916	20
240	15	45	630	35	1154	25
255	15	48	690	40	1252	27
270	15	50.5	750	46	1404	30
285	15	54	780	48.5	1545	33
300	15	56.5	840	53.5	1800	38
315	15	59	900	60	1909	40
330	15	62	960	65.5	2012	42
345	15	65	1020	71	2210	45
360	15	68	1080	76	2415	49
375	15	70.5	1110	78.5	2495	50
390	15	74	1140	81	2670	53
405	15	77	1170	84.5	2823	55
420	15	79	1200	87	3410	64
435	15	82	1230	90	3555	66
450	15	85	1260	92.5	3885	71
465	15	87.5	1290	95	4250	76
480	15	90	1320	97.5	4550	80
495	15	93	1350	100	4822	84
510	15	94.5			5272	90
525	15	98			5488	93
546	21	100			5621	95
					5965	99
					6040	100

Valores de volumen observados en el ensayo de infiltración en el laboratorio para la arena

Ensayo 4 Arena			Ensayo 5 Arena		Ensayo 6 Arena	
Tiempo (s)	Volumen (ml)		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tiempo (s)	Volumen (ml)
0	0	0	0	0	0	0
0	1		35	1	60	1
60	2		65	4	120	3
90	3		135	5	240	5
120	4		213	8	420	7
180	6		290	11	550	10
240	8		432	17	658	12
300	10		483	19	760	14
360	12		545	21	970	18
480	15		687	27	1360	26
660	20		752	30	1597	31
720	24		863	35	1905	36
840	29		955	39	2044	40
900	33		1011	41	2180	43
1020	44		1070	44	2330	46
1140	50		1140	47	2514	50
1200	60		1247	52	2740	55
1500	65		1377	58	2886	58
1620	72		1501	63	2966	60
1800	78		1643	70	3237	66
1980	83		1750	75	3490	71
2280	92		1860	80	3655	75
2400	96		1962	85	3923	80
2520	100		2067	90	4295	93
			2180	95	4601	95
			2280	100	4775	98
					4845	100