

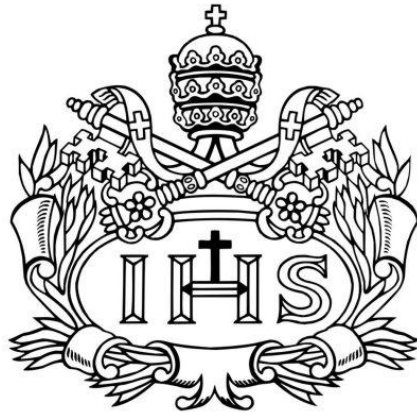
Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE
HUMEDAD EN GEO-MATERIALES INTERMEDIOS SOMETIDOS A
DIFERENTES NIVELES DE ESTRÉS TÉRMICO**

Laura Karina Sánchez Díaz

Director:

**MANUEL SANTIAGO OCAMPO TERREROS
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C**

Presentado por:

**Laura Karina Sánchez Díaz.
C.C 1.098.722.784 de Bucaramanga.**

Director:

**MANUEL SANTIAGO OCAMPO TERREROS
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.**

Evaluador:

**JOAN MANUEL LARRAHONDO CRUZ
JOSE ANDRES CRUZ WILCHES**

**Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil
Bogotá D.C.
Octubre de 2015**

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo incondicional, sin ellos nada de esto sería posible, gracias al esfuerzo, constancia y lucha frente a todas las adversidades, la importancia de la familia, la unión, el respeto y el amor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres quienes han aportado todo para lograr cada una de mis metas, por la confianza que me brindaron, todos sus esfuerzos y su motivación constante.

Al ingeniero Manuel Santiago Ocampo, como director de este trabajo de grado, su disponibilidad, carácter y guía profesional ha sido indispensable, cada uno de sus consejos permitió definir cada día mejores resultados.

A la disponibilidad y todo el personal del laboratorio de suelos de la Pontificia Universidad Javeriana, la atención y eficiencia en cada uno de los espacios utilizados.

Finalmente a todas las personas que me acompañaron en este camino como crecimiento profesional, cada uno de los ingenieros que brindaron su conocimiento para hacer de nosotros un mejor futuro, a mis compañeros que también hicieron parte del desarrollo, a Miguel Torres Zamora por su dedicación al inicio de este trabajo, a mi familia y a Dios quien me han brindado todo.

RESUMEN

La capacidad de un suelo para retener agua es función de la succión, y estas dos variables se relacionan por medio de la curva característica de humedad. La medición de la succión en un suelo, para un contenido de humedad dado, puede ser determinada en laboratorio por diferentes métodos de ensayo.

El comportamiento de la curva característica de un suelo puede variar en función del nivel de estrés térmico al cual se someta la muestra para modificar su contenido de humedad.

El objetivo de este trabajo es el evaluar los cambios en la curva característica de humedad lograda con diferentes métodos de secado, y diferentes métodos de medición de la succión. Para esto se analizaron las curvas características de humedad, midiendo la succión por medio del papel filtro y el equipo WP4C (potenciómetro para determinar el punto de rocío) sobre muestras de dos tipos de rocas blandas (geo materiales intermedios) y arenas (Guamo y Ottawa), que fueron secadas por medio de diferentes metodologías comúnmente usadas en laboratorio.

El uso del papel filtro, como método de succión para dar finalidad a la curva característica de humedad es de alta responsabilidad y cuidado ante los implementos, requerimientos y manipulación del papel; como medida facilitadora y de mayor exactitud la aplicación del método de succión con el equipo WP4C nos permitió avanzar de manera más segura y efectiva, su proceso disminuía tiempo y la manipulación del equipo no requería mayor riesgo.

En los resultados obtenidos se define una mejor curva característica para cada método de secado, utilizando succión por medio del equipo WP4C ya que genera mayor confianza debido al buen manejo del equipo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	1
2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	3
3 OBJETIVOS	5
3.1 Objetivo General	5
3.2 Objetivos Específicos	5
Establecer los puntos críticos en la ejecución de los ensayos para la obtención la curva característica en IGMS utilizando la técnica del papel filtro y el “chilled mirror succión”.	5
4 MARCO DE REFERENCIA	6
4.1 Marco Conceptual	6
4.1.1 Geo-materiales Intermedios	6
4.1.2 Succión o potencial mátrico	6
4.1.3 Curva característica de humedad	7
4.2 Marco Teórico	11
4.2.1 Métodos de secado de suelos en laboratorio	11
4.2.2 Métodos para medición de succión	12
4.3 Marco de Antecedentes	14
5 MATERIALES Y MÉTODOS	17
5.1 Materiales	17
5.1.1 Geo materiales Intermedios	17
5.1.2 Arena del Guamo	20

5.1.3	Arena Ottawa	21
5.2	Métodos de secado	21
5.2.1	Secado ambiente	22
5.2.2	Secado horno convencional	23
5.2.3	Secado lámparas halógenas	24
5.2.4	Secado horno micro-ondas	25
5.2.5	Secado cámara térmica	26
5.3	Métodos de succión	27
5.3.1	Método papel filtro	28
5.3.2	Método del potenciómetro para determinar el punto de rocío	29
6	RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
6.1	Gráficas Papel Filtro respecto cada método de secado	32
6.1.1	Secado ambiente	32
6.1.2	Secado horno microondas	33
6.1.3	Secado Lámparas halógenas	34
6.1.4	Horno convencional	35
6.1.5	Secado cámara térmica	36
6.1.6	Comparación de la influencia de los métodos de secado sobre el tipo de muestra	37
6.2	Gráficas WP4C respecto a cada método de secado	40
6.2.1	Secado ambiente	40
6.2.2	Secado Lámparas Halógenas	41
6.2.3	Secado Horno Microondas	42
6.2.4	Secado Horno convencional	43
6.2.5	Secado Cámara térmica	44
6.2.6	Comparación de la influencia de los métodos de secado sobre el tipo de muestra	45
6.3	Interpretación de resultados	48
7	CONCLUSIONES	50
8	DISCUSIÓN	52

9	RECOMENDACIONES	54
10	BIBLIOGRAFÍA	56

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A – Resultados y valores específicos de los geo materiales intermedios, muestras blanca y roja, arenas Guamo y Ottawa.
- ANEXO B – Resultados del método de Secado ambiente, succión a partir del papel filtro.
- ANEXO C – Resultados del método de Secado microondas, succión a partir del papel filtro.
- ANEXO D – Resultados del método de Secado lámparas halógenas, succión a partir del papel filtro.
- ANEXO E – Resultados del método de Secado horno convencional, succión a partir del papel filtro.
- ANEXO F – Resultados del método de Secado cámara térmica, succión a partir del papel filtro.
- ANEXO G – Resultados del método de Secado ambiente, succión a partir del WP4C.
- ANEXO H – Resultados del método de Secado lámparas halógenas, succión a partir del WP4C.
- ANEXO I – Resultados del método de Secado horno microondas, succión a partir del WP4C.
- ANEXO J – Resultados del método de Secado horno convencional, succión a partir del WP4C.
- ANEXO K – Resultados del método de Secado cámara térmica, succión a partir del WP4C.
- ANEXO L – Muestra roja, Graficas curva característica de humedad.
- ANEXO M – Muestra blanca, Graficas curva característica de humedad.
- ANEXO N – Arena de Ottawa, Graficas curva característica de humedad.
- ANEXO O – Arena de Guamo, Graficas curva característica de humedad.

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Distribución del suelo sub superficial (Bear 1972).	8
Ilustración 2. Curva característica, (Villarroya 2006)	9
Ilustración 3. Componentes de la curva característica, (Perez Garcia 2008).....	10
Ilustración 4. Curva de calibración mojado del papel filtro con respecto al contenido de succión del agua. (INVÍAS 2013).	13
Ilustración 5. Historia geológica de materiales arcillosos sobreconsolidados según Fleming et al, 1970.....	15

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas al ambiente.....	33
Gráfica 2. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas en horno microondas	34
Gráfica 3. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas en Lámparas halógenas.....	35
Gráfica 4. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas en Horno convencional	36
Gráfica 5. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas en Cámara térmica.....	37
Gráfica 6. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre la muestra roja	38
Gráfica 7. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre la muestra blanca	38
Gráfica 8. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre la arena de Ottawa	39
Gráfica 9. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre la arena del Guamo.....	39
Gráfica 10. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en el ambiente	41
Gráfica 11. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en Lámparas Halógenas	42
Gráfica 12. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en Horno Microondas	43
Gráfica 13. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en Horno convencional.....	44

Gráfica 14. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en Cámara térmica	45
Gráfica 15. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre la muestra roja.....	46
Gráfica 16. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre la muestra blanca	46
Gráfica 17. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre la arena de Ottawa	47
Gráfica 18. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre la arena del Guamo	47
Grafica 19. Secado Ambiente en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C	82
Grafica 20. Secado Horno Microondas en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	82
Grafica 21. Secado Lámparas Halógenas en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	83
Grafica 22. Secado Horno convencional en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	83
Grafica 23. Secado Cámara Térmica en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	84
Grafica 24. Secado Ambiente en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C	85
Grafica 25. Secado Horno Microondas en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	85
Grafica 26. Secado Lámparas Halógenas en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	86
Grafica 27. Secado Horno convencional en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	86
Grafica 28. Secado Cámara Térmica en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	87

Grafica 29. Secado Ambiente en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C	88
Grafica 30. Secado Horno Microondas en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	88
Grafica 31. Secado Lámparas Halógenas en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	89
Grafica 32. Secado Horno convencional en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	89
Grafica 33. Secado Cámara Térmica en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	90
Grafica 34. Secado Ambiente en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C	91
Grafica 35. Secado Horno Microondas en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	91
Grafica 36. Secado Lámparas Halógenas en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	92
Grafica 37. Secado Horno convencional en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	92
Grafica 38. Secado Cámara Térmica en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C.....	93

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades físicas de la arena del guamo Colombia, (Patiño Bautista and Lizcano Pelaez 2006)	20

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Geo-material intermedio, Muestra blanca.	18
Fotografía 2. Geo-material intermedio, Muestra roja.	18
Fotografía 3. Muestra Blanca, (Google Maps, 2015).....	19
Fotografía 4. Muestra Roja, (Google Maps, 2015)	19
Fotografía 5. Controlador de temperatura en el cuarto de secado ambiente.	23
Fotografía 6. IGMS, Muestra Roja, Arena de Ottawa, Arena de Guamo, Muestra Blanca, en el horno convencional a 110° C.....	24
Fotografía 7. IGMS, Muestra Roja, Arena de Ottawa, Arena de Guamo, Muestra Blanca, Secado lámparas halógenas.	25
Fotografía 8. Secado Horno microondas, Kalley.	26
Fotografía 9. Secado Cámara térmica.	27
Fotografía 10. Papel filtro. Whatman Schleicher y Schuell.....	29
Fotografía 11. WP4C.....	30

1 INTRODUCCIÓN

El suelo nos proporciona grandes propiedades en múltiples actividades, desde el desarrollo agrícola hasta el desarrollo estructural dentro del ámbito de la ingeniería civil; en función del conocimiento de las propiedades del suelo se pueden lograr acercamientos y consideraciones para la toma de decisión en el desarrollo de los proyectos definidos en diversas zonas del país, y para múltiples actividades de construcción. En el campo de la ingeniería civil, los suelos y rocas son empleados como materiales de construcción; estos materiales son de gran importancia y aporte para obras de cimentación, proyección de estructuras de contención del terreno en excavaciones profundas o superficiales, y materiales de estabilización para vías (bases, subbases y rajón). Por ser estos materiales de gran relevancia en el campo de la ingeniería civil, es de gran importancia su descripción, estudio, y análisis, con el fin de adecuarlos a los proyectos de ingeniería civil. Con el fin de estudiar y caracterizar adecuadamente estos materiales, se deben considerar ámbitos de investigación donde se puedan abordar las diferentes variables que gobiernan su comportamiento frente a sus diferentes usos.

Debido a la importancia que tiene el agua en los suelos y rocas, es necesario observar, analizar y justificar el cambio que puede generar el agua en su comportamiento, ya que podría afectar la estabilidad de las obras. Con el análisis de la curva característica se pueden determinar parámetros relevantes del suelo como son la permeabilidad, la resistencia al corte, la relación entre las diferentes fases del suelo, entre otros.

En los últimos años se han desarrollado distintos métodos para obtener la curva característica en suelos de forma rápida y con mayor precisión; algunos de los métodos destacados son el potenciómetro para determinar el punto de rocío, el papel filtro, el plato de presión, y métodos osmóticos.

En este trabajo de investigación se evaluó el cambio en las curvas características de humedad en dos tipos de rocas blandas (geo-materiales intermedios o IGM por sus siglas en inglés de *Intermediate Geo-Materials*) y dos tipos de arenas, que fueron secadas por medio de diferentes metodologías comúnmente usadas en laboratorio; la succión se determinó por medio del papel filtro y el equipo *Water Potential Meter* (WP4C).

Como objetivo principal de este trabajo se buscó definir el método de secado adecuado a partir de cada uno de los métodos de succión, considerando que el WP4C ofrece mayor eficiencia, arrojando valores de potencial mátrico y osmótico en tiempos cortos y precisos.

2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

En el campo de la ingeniería civil, los suelos y rocas son empleados como materiales de construcción en obras de cimentación, y la proyección de estructuras de contención o sostenimiento del terreno en excavaciones superficiales y profundas. Por ser estos materiales de gran relevancia, es preciso describirlos, estudiarlos, y adaptarlos a los proyectos de ingeniería. Con el fin de estudiar y caracterizar adecuadamente estos materiales, se deben considerar distintos ámbitos de investigación donde se puedan abordar las diferentes variables que gobiernan su comportamiento frente a los diferentes usos.

Uno de los aspectos claves a estudiar y definir es la curva característica del material (SWCC por sus siglas en inglés de *Soil Water Characteristic Curve*, SMC por sus siglas en inglés de *Soil Moisture Curve*, o SWRC por las siglas en inglés de *Soil Water Retention Curve*), la cual describe la relación entre el contenido de agua en el suelo y la succión; con el análisis de esta curva se evidencia la afectación de la permeabilidad, la resistencia al corte, los cambio de volumen, y la deformación del suelo (Johari, Habibagahi et al. 2011). En los últimos años se han generado diversas comparaciones de las distintas técnicas de ensayo para establecer la curva característica, como lo son el papel filtro, potenciómetro para determinar el punto de rocío, equilibrio de vapor, plato de presión, Tempe Cell, y métodos osmóticos (Nam, Gutierrez et al. 2010).

La humedad es una propiedad fundamental en suelos y rocas, resultando su medición compleja y demorada cuando se quiere obtener en forma directa; sin embargo, a partir de novedosos equipos de laboratorio, como por ejemplo el WP-4C, estos resultados se pueden obtener en tiempo relativamente cortos y de forma sencilla (Tarantino and El Mountassir 2013). Por otro lado se han propuesto métodos indirectos para estimar la curva característica de humedad en los suelos; como ejemplo de lo anterior, se reporta que los resultados logrados a partir de la

ecuación del modelo integrado MV-VG se ajustan adecuadamente para predecir curvas características de humedad en suelos con diferentes tamaños de partículas (Mohammadi and Meskini-Vishkaee 2013).

Es por esto que el interés de esta investigación fue el de observar los cambios que se presentan en la curva característica dependiendo del método de secado utilizado (Krisdani, Rahardjo et al. 2008), y comparar los resultados obtenidos con los reportados en la literatura (Estabragh, Moghadas et al. 2013); esto el fin de poder establecer el procedimiento que ofreciera mayor eficiencia para determinar la curva característica de humedad. En este trabajo se estudiaron geo-materiales intermedios que afloran en los cortes del trazado de la Concesión vial Bogotá-Tunja-Sogamoso (BTS).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar los cambios en la curva característica de humedad en geomateriales intermedios, sometidos a diferentes niveles de estrés térmico.

3.2 Objetivos Específicos

Cuantificar las diferencias en los resultados de humedad de los IGMs utilizando diferentes métodos de secado de acuerdo con sus propiedades índice.

Evaluar los resultados obtenidos de los ensayos de potencial en IGMs Y comparar los resultados obtenidos con los reportados en la literatura para materiales rocas y suelos.

Establecer los puntos críticos en la ejecución de los ensayos para la obtención la curva característica en IGMS utilizando la técnica del papel filtro y el “chilled mirror succión”.

4 MARCO DE REFERENCIA

4.1 Marco Conceptual

4.1.1 Geo-materiales Intermedios

El término geo-material intermedio (IGM por sus siglas en inglés de *Intermediate Geo-Materials*), ha sido aplicado recientemente a materiales térreos con propiedades entre los límites entre suelo y roca. Estos materiales, también conocidos como rocas blandas, se definen como materiales que se comportan como roca ante bajos esfuerzos, o como suelos cuando son sometidos a altos esfuerzos (Ceryan, Tudes et al. 2008). Los geo-materiales intermedios afloran en el trazado de la Concesión vial Bogotá-Tunja-Sogamoso, con estos materiales se describen efectos de succión (De Gennaro and Pereira 2013), retención del agua, y la conductividad hidráulica (Andry, Yamamoto et al. 2009); Analizando las posibles incertidumbres de los procesos utilizados, respecto de las características (Diehl 2013) de cada material.

Es llamado IGM's por sus siglas en inglés de *Intermediate Geo-Materials*, las muestras fueron nombradas por su ubicación y por lo más distintivos entre estos dos materiales que es color.

4.1.2 Succión o potencial mátrico

Las propiedades fundamentales para la elaboración de la curva característica de humedad se definen a partir de conceptos importantes como son la succión o el potencial mátrico y la humedad.

La succión o potencial mátrico en suelos representa su capacidad para retener agua en sus intersticios, y puede ser determinada por diferentes métodos como son el potenciómetro para determinar el punto de rocío, el papel filtro, el plato de presión, y métodos osmóticos. El potencial mátrico se define como el trabajo necesario para trasladar de forma isoterma y reversible la unidad de masa de agua desde un conjunto de agua libre a la matriz del suelo, este potencia es menor a la presión atmosférica de modo que nos ofrece valores negativos, a medida que el potencial mátrico disminuye de igual forma lo hace la masa de agua en la matriz del suelo (Villarroya 2006). Los mecanismos de retención del agua son tres (Villarroya 2006):

- La adhesión directa o absorción de las moléculas de agua por fuerzas de Van der Waals.
- La retención capilar donde se presenta la fuerza de cohesión y de adhesión al tiempo.
- La unión osmótica del agua creada a partir de las cargas eléctricas en la disolución intersticial del entorno y el potencial gravitacional basado en la posición del agua en el campo gravitatorio.

4.1.3 Curva característica de humedad

La curva de retención de humedad en los suelos es una propiedad importante y útil para caracterizar la capacidad de un suelo para almacenar agua. En los suelos y rocas se encuentran partículas porosas, donde se constituye una matriz ya definida o fase sólida con enlaces y espacios que pueden presentar varios efectos debido al agua, como son los debidos a la capilaridad, tensiones superficiales, problemas de expansión y compresión.

La succión es uno de los efectos ocasionados debido al comportamiento del material frente al agua; respecto a estos efectos se han generado varios estudios que se dividen en tres grandes grupos: Método para suelos equilibrados a un

potencial mátrico conocido, Método de medición directa, y Métodos basado en modelos. El procedimiento de referencia en los laboratorios es el papel filtro, el cual se desarrolla a partir de un método de medición directa, y que permite que las muestras se sequen progresivamente obteniendo las medidas de contenido de agua y su potencial directo (Castro 2009).

El esquema que se presenta en la Ilustración 1 indica la distribución del suelo sub superficial, considerando las condiciones de un suelo homogéneo; en la zona de saturación donde todos los poros del suelo se encuentran llenos de agua, al estar bajo el nivel freático se genera una presión de poros positiva, a diferencia de la zona de aireación donde las presiones intersticiales son negativas. Según esta distribución, los suelos se encuentran parametrizado en varias zonas; una de las más importantes e influenciada es la zona de aireación presente entre la superficie y el nivel freático, la cual se divide en tres sub zonas (Bear 1972):

- La zona de agua en el suelo o zona radicular donde se presentan las raíces de la vegetación y contiene gran cantidad de aire.
- La zona intermedia o zona de agua vadosa.
- La zona de ascenso capilar o franja capilar, allí la superficie se encuentra a presión atmosférica.

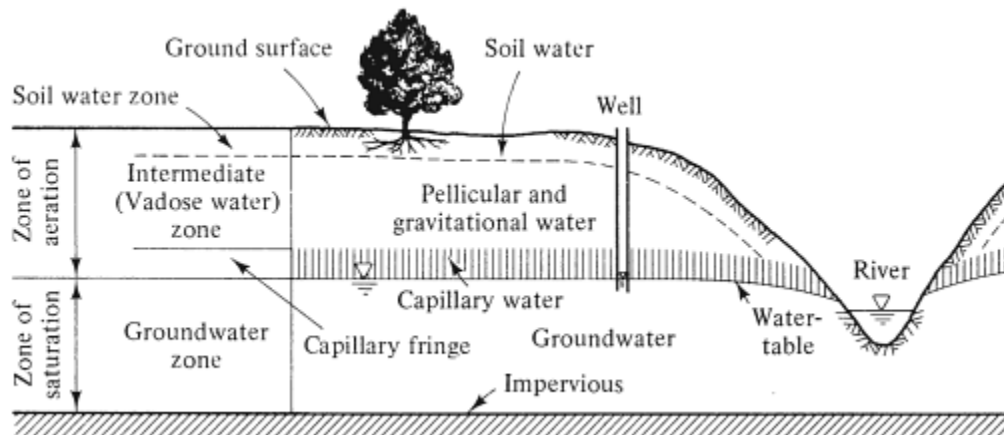


Ilustración 1. Distribución del suelo sub superficial (Bear 1972).

La curva característica de humedad relaciona el contenido de humedad de un suelo con la succión o potencial mátrico. Esta curva tiene un comportamiento de histéresis debido a que para un mismo valor de succión tiene dos contenido de humedad; esto es, durante el proceso de desecación se observa que es mayor el contenido de humedad que en el proceso de humectación (Ilustración 2).

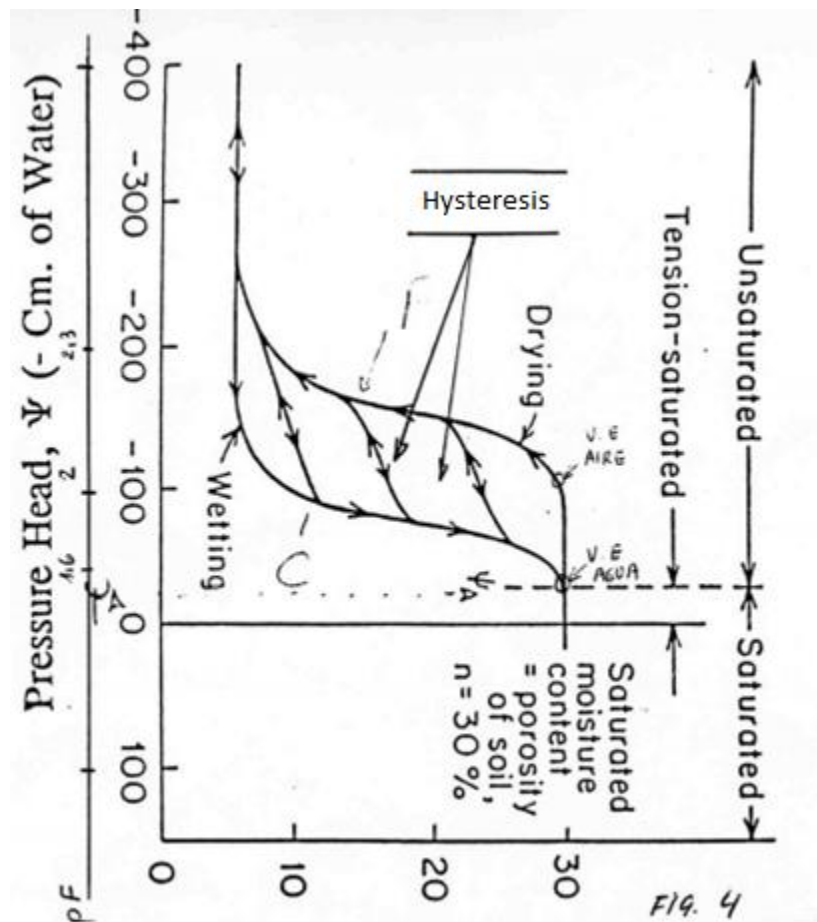


Ilustración 2. Curva característica, (Villarroya 2006)

La curva característica de humedad comprende tres zonas indispensables de estudio: la zona capilar, de desaturación, y la zona residual, donde cada una de ellas presenta un comportamiento único debido a la tendencia de la curva.

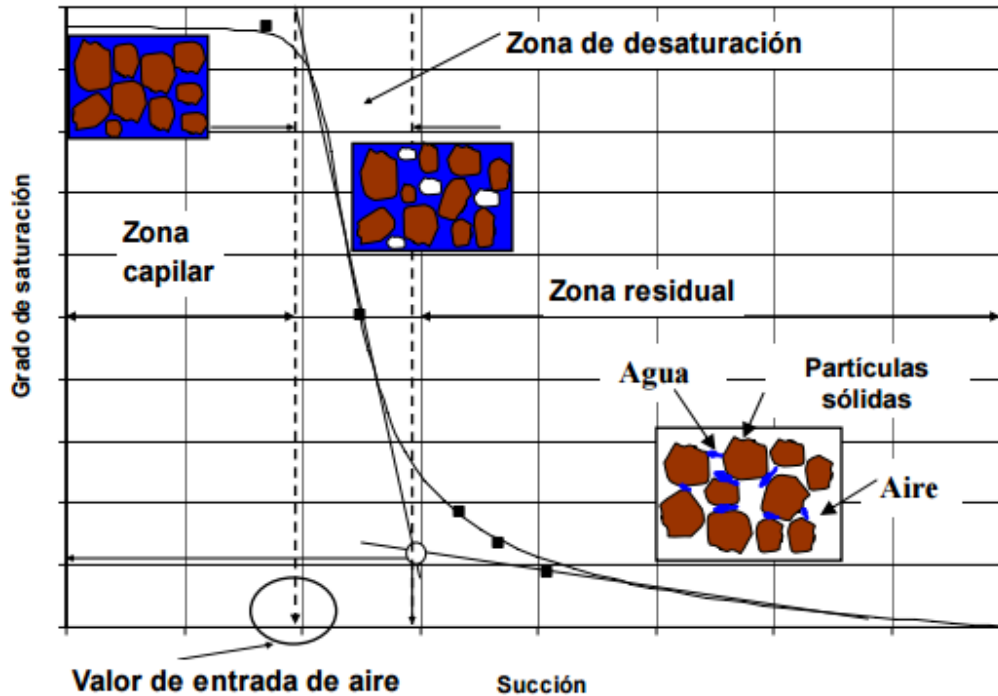


Ilustración 3. Componentes de la curva característica, (Perez Garcia 2008).

En la zona capilar, el suelo se mantiene en estado de saturación, justo en la etapa antes que se permita la entrada de aire en los macroporos del suelo, definido como el valor que debe de exceder la succión mátrica (Vanapalli, Fredlund et al. 1999).

En la zona de saturación el agua es desplazada por el aire, de modo que la fuerza generada para mover las partículas de agua que se adhieren al suelo se incrementa, y se pierde agua en el proceso.

En la zona residual se permite el incremento de succión con resultados altos, donde el contenido del agua no produce grandes cambios considerados en un 0% en cantidad y la remoción de esta es causada principalmente por evaporación (Vanapalli, Fredlund et al. 1999).

4.2 Marco Teórico

4.2.1 Métodos de secado de suelos en laboratorio

4.2.1.1 Secado ambiente

Con este método se pretende que las muestras de suelo pierdan humedad al dejarse expuestas a temperatura ambiente en un cuarto con temperatura controlada.

4.2.1.2 Secado horno convencional

El método de secado en horno convencional consiste en someter una muestra de suelo a una temperatura de 110° C por 24 horas, logrando que con este nivel de estrés térmico la muestra pierda toda su humedad.

4.2.1.3 Secado lámparas halógenas

El método de secado con lámparas halógenas consiste en colocar una muestra de suelo bajo lámparas halógenas que irradian calor, con esto se logra que la muestra pierda toda su humedad en un tiempo que depende del tipo de material expuesto y el contenido de agua.

El método de secado con lámparas halógenas no tiene una norma estipulada. Para determinar su rendimiento se procede a afinar y calibrar el método de secado utilizando varias muestras en diferentes tiempos de exposición a las lámparas.

4.2.1.4 Secado horno microondas

El método de secado en horno micro-ondas consiste en someter una muestra de suelo a una potencia entre 350 W a 700 W, la cual dependerá del horno utilizado. Las muestras se dejan en el horno bajo este estrés térmico hasta lograr la pérdida total de humedad.

El secado de las muestras con horno microondas, comparado con el secado en horno convencional, tiene como ventaja un menor consumo de energía eléctrica y una mayor eficiencia respecto al tiempo. Resultados de estudios donde se compara la eficiencia entre el secado con horno convencional y horno microondas, han mostrado mayor confiabilidad en el horno convencional.

Para realizar este método se requiere minimizar el sobrecalentamiento del suelo, de modo que se debe hacer uso de un vaso con agua dentro del horno microondas con el fin de reducir el calor dentro del mismo, y que sirva como indicador de sobrecalentamiento.

4.2.1.5 Secado cámara térmica

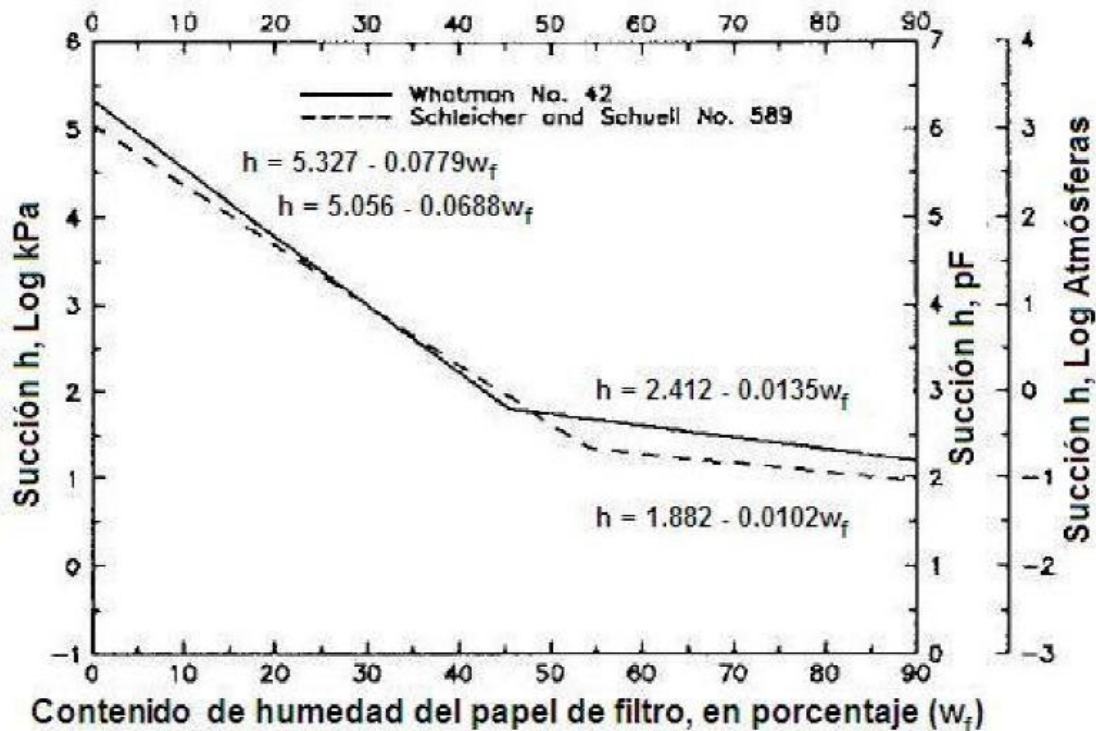
La cámara térmica es un equipo que se utiliza en el laboratorio de rocas para contener muestras a una temperatura constante. El método de secado con cámara térmica no tiene una norma estipulada. Para determinar su rendimiento se procede a afinar y calibrar el método de secado utilizando varias muestras en diferentes tiempos de almacenamiento.

4.2.2 Métodos para medición de succión

4.2.2.1 Método Papel Filtro

La técnica del papel filtro se basa en obtener el equilibrio de un papel filtro con el potencial mátrico del agua en el suelo. El método se base en que la muestra de suelo intercambiará agua con el papel filtro, hasta que el potencial mátrico en ambos se equilibre. Es un método sencillo y económico para determinar el potencial mátrico del agua en el suelo, siempre que los cambios sean muy lentos. Permite obtener lecturas entre -0.05 y -0.1 MPa (Mañas 2005).

Con el contenido de humedad obtenido en el papel filtro se determina la succión en el suelo por medio de la curva que se presenta en la Ilustración 4. La variabilidad en los resultados de succión por este método es menor al 2% para valores de succión sobre 100 kPa; en suelos con succión entre 100 kPa y 20 kPa, la perturbación de la muestra tiene mínima influencia sobre el resultado final; para suelos con succión menor valor a 20 kPa, la perturbación de la muestra aumenta la variabilidad de los resultados INV E- 159 (INVÍAS 2013).



Nota - Coeficiente de determinación $r > 0.99$

Ilustración 4. Curva de calibración mojado del papel filtro con respecto al contenido de succión del agua. (INVÍAS 2013).

4.2.2.2 Método del potenciómetro para determinar el punto de rocío

El potenciómetro de punto de rocío utiliza la técnica de medir el punto de rocío en un espejo enfriado previamente. La técnica de medida consiste en enfriar un espejo (por efecto Peltier) que hay en el interior del bloque de medida hasta que una célula fotoeléctrica detecta la formación de rocío. En este momento, un termistor mide la temperatura del espejo (que es la temperatura de rocío), y un sensor de infrarrojos mide la temperatura de la muestra de suelo (Turner 2006).

4.3 Marco de Antecedentes

Las curvas de retención de humedad se usan principalmente para determinar el índice de humedad disponible en el suelo; como investigación primer de la curva característica de humedad, se han implementado varios métodos de diseño, uno de los estudios proporcionados son la determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión (Perez Garcia 2008).

Por otro lado estudios nos demuestran diseños experimentales con modelos paramétricos donde se hace una estimación completa del diseño, el método del recipiente de tensión hídrica, combinado con la membrana a presión (Martínez-Fernández 1995).

Los modelos de las curvas características de humedad estudiados e investigados enseñan algunos informes para guiar este trabajo de grado, pero es considerable que los materiales (suelos) y métodos estimados en los dos casos suelen ser completamente diferentes. De igual forma el comportamiento de los geo-materiales intermedios se pueden referencial con rocas sedimentarias como arcillolitas y lodolitas, su comportamiento como tal es similar pero cabe reconocer que su nivel de desintegración, la disposición del material y el proceso de los métodos podría implicar algunas diferencias, los resultados que se desempeñaron a lo largo del trabajo no exhiben una comparación precisa con algún modelo antes

estipulado, ya que la implementación del equipo WP4C y los materiales propuestos representan nuevas investigaciones.

La tendencia a comportamiento de rocas blandas donde dentro de este grupo se incluyen las argilitas, limolitas, margas, lutitas (shales) y lodolitas. Este tipo de materiales son comunes en obras civiles, el interés al estudio de su comportamiento será de alta importancia.

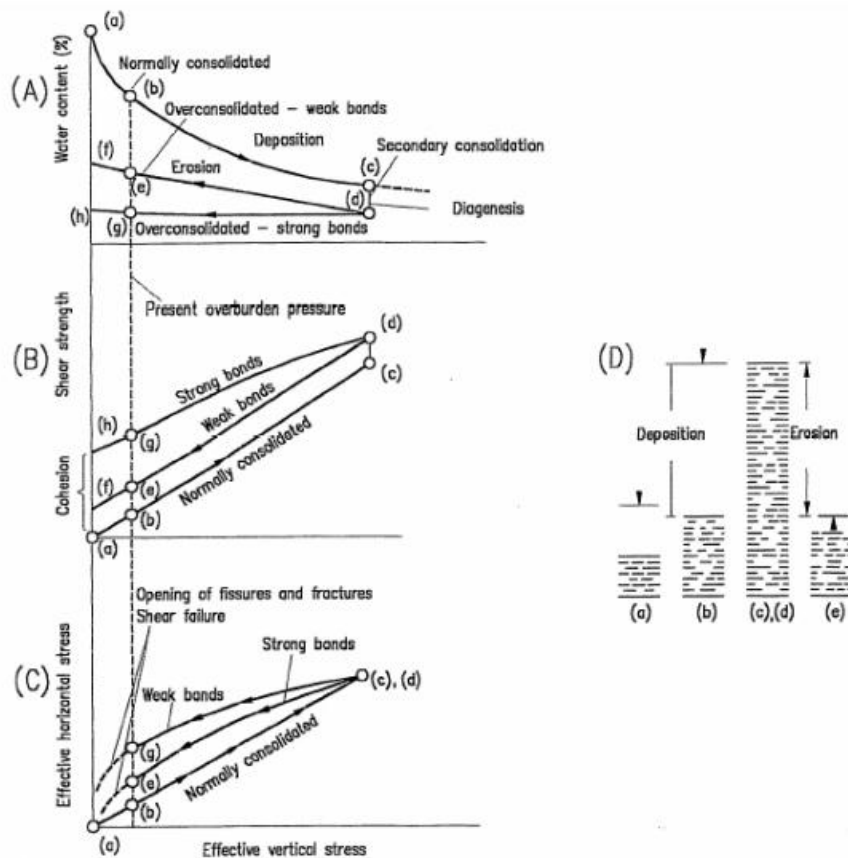


Ilustración 5. Historia geológica de materiales arcillosos sobreconsolidados según Fleming et al, 1970.

Por tanto, el comportamiento de las rocas blandas está muy relacionado con la historia geológica del material y, sobretudo, con el proceso de cementación sufrido. Los resultados presentados en la Ilustración 5 podría guiar el comportamiento que presentaran los geo-materiales intermedios en la obtención de la curva característica de humedad.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales

5.1.1 Geo materiales Intermedios

En este trabajo se estudiaron geo-materiales intermedios que afloran en los cortes del trazado de la Concesión vial Bogotá-Tunja-Sogamoso (BTS).

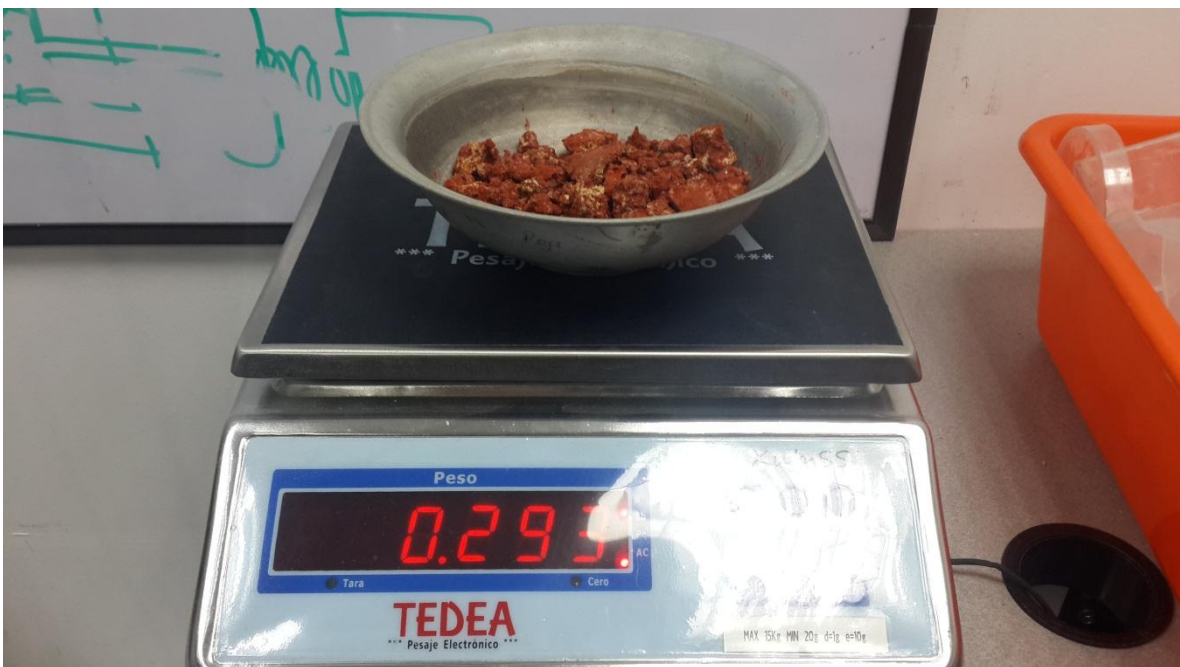
La primera muestra se extrajo de un talud ubicado en la calzada que conduce de Villapinzón (municipio del departamento de Cundinamarca) y la ciudad de Tunja (departamento de Boyacá), georreferenciado con la longitud 73.329386° y latitud de 5.70687° . Esta muestra es nombrada y referenciada en este trabajo como “Muestra Blanca”.

La segunda muestra se extrajo de un talud ubicado en la calzada que conduce entre la ciudad de Tunja (departamento de Boyacá) y Ventaquemada (municipio del departamento de Boyacá), georreferenciado con la longitud 73.454264° y la latitud 5.419004° . Esta muestra es nombrada y referenciada en este trabajo como “Muestra Roja”.

La obtención del material se realizó de manera personal, en la ubicación correspondiente se extrajeron dos bloques de cada material, cada uno de ellos fueron sellados con papel vinipel, y transportados al laboratorio de la Pontificia universidad Javeriana.



Fotografía 1. Geo-material intermedio, Muestra blanca.



Fotografía 2. Geo-material intermedio, Muestra roja.



Fotografía 3. Muestra Blanca, (Google Maps, 2015).



Fotografía 4. Muestra Roja, (Google Maps, 2015)

Los geo-materiales intermedios fueron parte fundamental del desarrollo de la propuesta del proyecto; la utilidad y comportamiento de cada uno frente a los métodos de secados mencionados fue vital para la finalidad de la curva característica de humedad.

Como complemento al estudio realizado con los dos geo-materiales intermedios se estudiaron también la arena del Guamo y la arena de Ottawa por ser materiales ampliamente estudiados.

5.1.2 Arena del Guamo

Un estudio sobre este material adelantado en la Universidad de Los Andes (Tabla 1), nos permite conocer su gravedad específica, la cual presenta un valor medio de 2.66.

Material	D ₁₀	D ₅₀	G _s	e _{max}	e _{min}
	mm	mm	[-]	[-]	[-]
Arena del Guamo	0.31	0.66	2.66	0.83	0.50
Fuji River Sand	0.22		2.68	1.08	0.53
Niigata Sand	0.13		2.67	0.99	0.55
Toyoura Sand	0.12	0.16	2.64	0.96	0.64
Monterey Sand	0.32	0.44	2.65	0.85	0.56

Tabla 1. Propiedades físicas de la arena del guamo Colombia, (Patiño Bautista and Lizcano Pelaez 2006)

En la Tabla 1 se presentan otras propiedades que permiten obtener datos relevantes para el inicio de los métodos de secado, como lo es la relación de vacíos.

5.1.3 Arena Ottawa

La arena de Ottawa se obtiene a partir de la minería hidráulica de cuarcita masiva situada en depósitos cerca de Ottawa, Illinois. Esta arena se compone en mayoría por granos de cuarzo redondeados de forma natural; es también llamada o considerada como arena normal o estándar graduada. El valores de densidad aparente encontrados en la revisión de la literatura es de 1.575 g/cc (Alonso 2013).

5.2 Métodos de secado

El proceso de secado se define como la eliminación de agua u otros materiales líquidos contenidos en una muestra de suelo. La humedad se define como la cantidad de agua presente en un sólido que tiene porosidad o espacios vacíos en su matriz; la humedad es la capacidad de absorber o de retener líquido en estos espacios porosos, y así aumentar su volumen debido a la expansión y aumento considerado de su peso.

En el desarrollo de esta investigación se implementaron diferentes métodos de secado para realizar una comparación de las curvas características de humedad logradas bajo diferentes niveles de estrés térmico, y determinar las coincidencias y diferencias entre los resultados arrojados por estos métodos de secado, y determinar cuál de ellos optimiza el proceso de obtención de la curva característica de humedad. Las posibles diferencias entre los resultados obtenidos con los distintos métodos dependerán fundamentalmente de la capacidad calorífica que proporciona cada uno. Con el fin de realizar estas comparaciones, en este trabajo se consideró como método de secado de referencia el del horno convencional, el cual es el más utilizado. Se realizaron cinco tipos de secados:

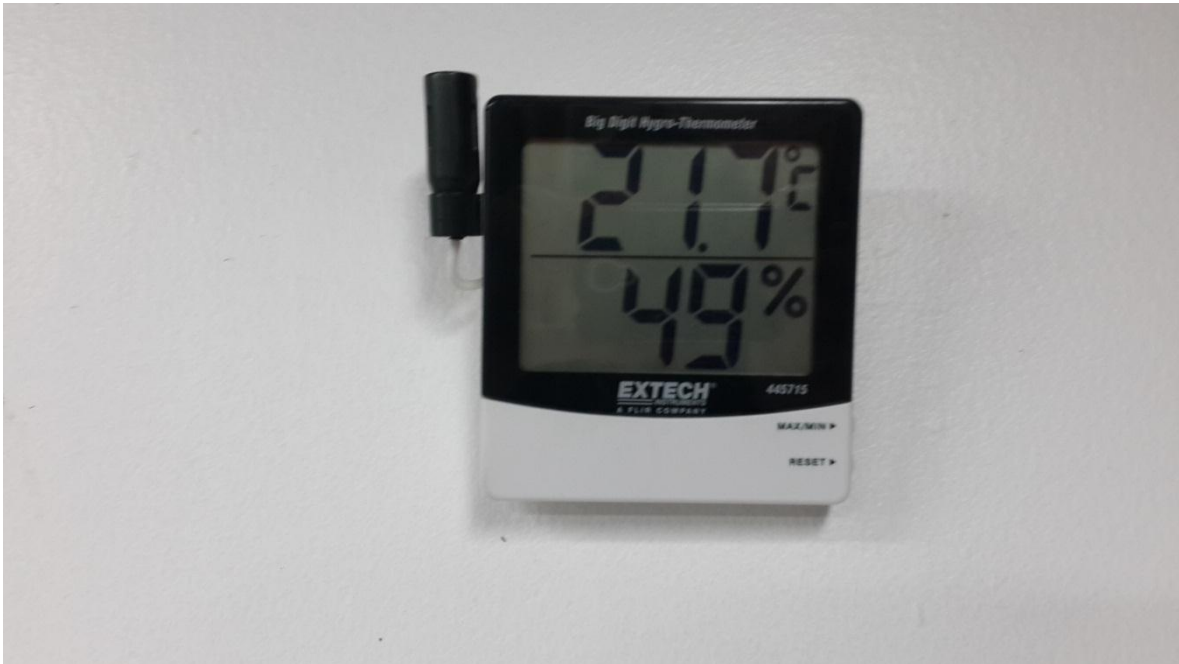
- Secado temperatura ambiente.

- Secado por horno convencional
- Secado con lámparas halógenas.
- Secado con horno microondas
- Secado en cámara térmica.

Los diferentes métodos de secado se realizaron con los cuatro tipos de materiales estudiados.

5.2.1 Secado a temperatura ambiente

Para la implementación de este método se utilizó un cuarto con temperatura controlada donde se dispusieron las muestras de cada material para que perdieran humedad sin estar expuestas a niveles de estrés térmico; en la Fotografía 5 se presenta el valor de la temperatura y humedad del cuarto utilizado para este método de secado. La mayor desventaja de este método es su tiempo de ejecución, ya se requiere de gran tiempo de espera para lograr que las muestras alcanzaran la humedad de equilibrio. El proceso de secado a partir del método temperatura ambiente fue de una duración aproximada de 14 días.



Fotografía 5. Controlador de temperatura en el cuarto de secado ambiente.

5.2.2 Secado horno convencional

El método de secado en horno convencional se realizó siguiendo la norma de ensayo INV E-122 (INVÍAS 2013). La temperatura de secado usada en este método fue de 110° C. Una vez colocadas las diferentes muestras de cada material en el horno, se fueron retirando en distintos periodos de tiempo con el fin de que tuvieran contenidos de humedad menor al inicial y mayor a cero. Con este método se determinaron entre ocho y nueve contenidos diferentes de humedad. El proceso de secado a partir del método horno convencional fue de una duración de 24 horas.



Fotografía 6. IGMS, Muestra Roja, Arena de Ottawa, Arena de Guamo, Muestra Blanca, en el horno convencional a 110° C.

5.2.3 Secado lámparas halógenas

Para este método de secado no se siguió una norma de ensayo. Una vez colocadas las diferentes muestras de cada material bajo las lámparas halógenas, se fueron retirando en distintos periodos de tiempo con el fin de que tuvieran contenidos de humedad menor al inicial y mayor a cero. Con este método se determinaron entre ocho y nueve contenidos diferentes de humedad. El proceso de secado a partir del método lámparas halógenas fue de una duración aproximada 5 horas



Fotografía 7. IGMS, Muestra Roja, Arena de Ottawa, Arena de Guamo, Muestra Blanca, Secado lámparas halógenas.

5.2.4 Secado horno micro-ondas

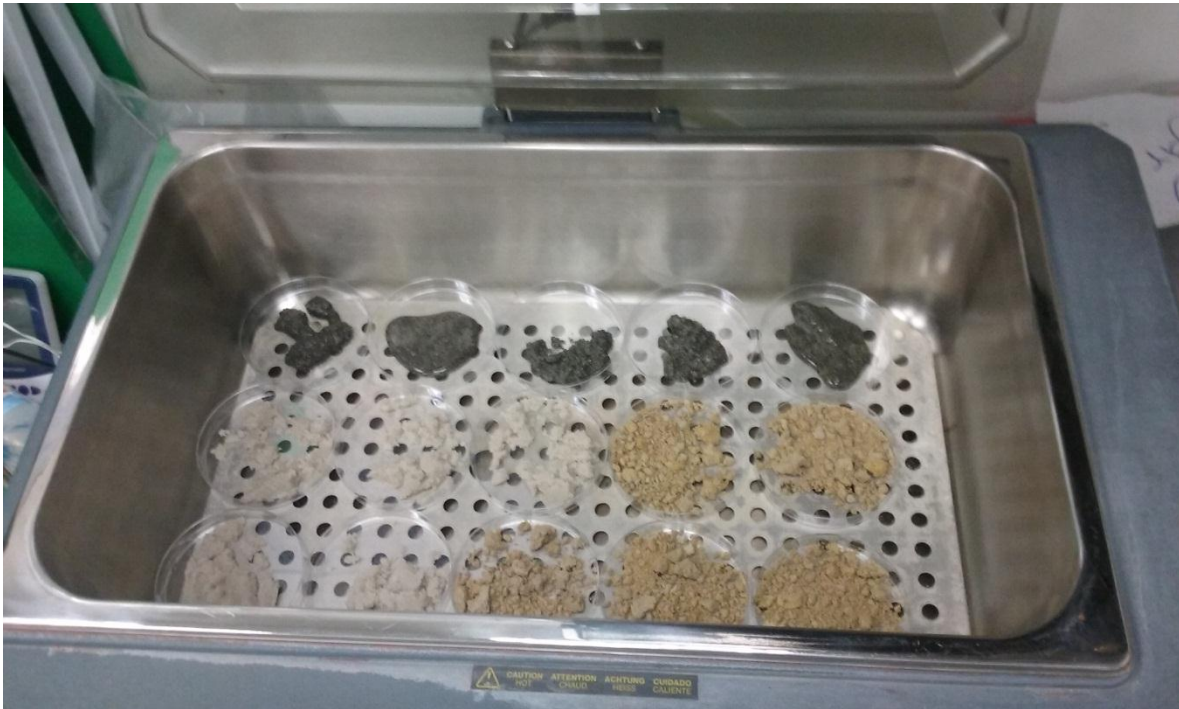
El método de secado en horno micro-ondas se realizó siguiendo la norma de ensayo INV E-135 (INVÍAS 2013). La potencia que se utilizó con el horno micro-ondas fue de 700 W. Con el fin de minimizar el sobrecalentamiento en las muestras de suelo, se colocó al interior del horno un vaso con agua. El proceso de secado a partir del Horno micro-ondas fue de una duración aproximada de 40 minutos.



Fotografía 8. Secado Horno microondas, Kalley.

5.2.5 Secado cámara térmica

En la implementación de éste método de secado se utilizó la cámara térmica completamente seca, y con una temperatura controlada promedio de 40° C. Debido a que al inicio del secado de las muestras éstas estaban completamente saturadas, durante el proceso de secado se generaba vapor de agua dentro de la cámara. El proceso de secado a partir del método cámara térmica fue de una duración aproximada de 13 horas.



Fotografía 9. Secado Cámara térmica.

5.3 Métodos de succión

En el desarrollo de este trabajo de grado se implementaron dos métodos para determinar la succión en cada muestra con cada contenido de humedad. Estos métodos fueron:

- Método del papel filtro.
- Método del potenciómetro para determinar el punto de rocío utilizando el equipo WP4C.

Con el quipo WP4C mide la suma del potencial osmótico y matricial de una muestra; a menudo una u otra de estas dos potenciales será el dominante en la determinación del potencial total. El segundo método utilizado fue el del papel filtro, el cual es el método más utilizado para determinar la succión en suelos; con el papel filtro no se obtiene un valor directo de succión durante el ensayo, por lo

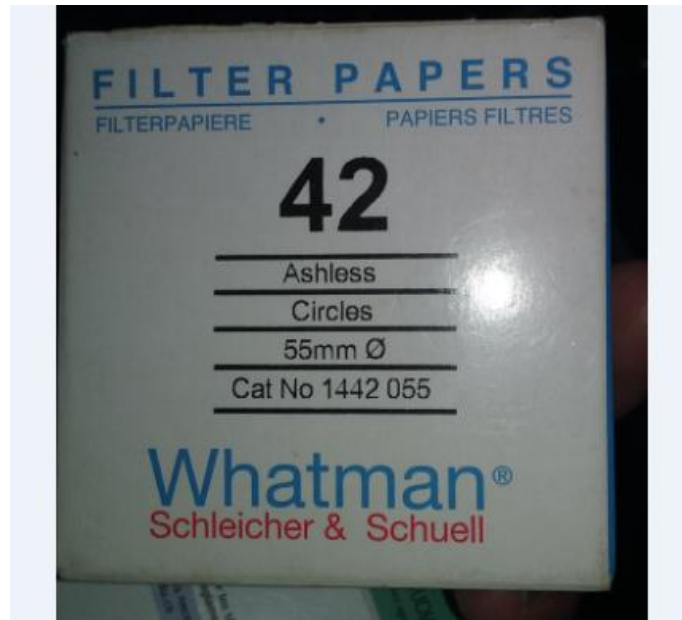
que la medición de la succión debe estimarse a partir del peso del papel filtro en porcentaje y leerse su valor en un gráfico.

5.3.1 Método papel filtro

Este método de ensayo establece el procedimiento para determinar la succión y potencial total de muestras inalteradas. Los papeles filtro se utilizan como sensores pasivos. Para describir el estado y la energía del agua y el suelo, el procedimiento a seguir se estipula a partir de la norma INV E-157 (INVÍAS 2013), con los parámetros ya estipulados se lleva a cabo el procedimiento de manera precisa.

Las muestras que se analizaron para ensayo del papel filtro, presentan un peso aproximado de 20 gramos, después de ser sometido cada material a los respectivos niveles de estrés térmico, considerando entre 6 a 8 puntos para el desarrollo de la curva característica de humedad, se hace uso de los recipientes hermético apropiados para ingresar la muestra con el respectivo papel filtro.

El papel filtro utilizado en el desarrollo de este ensayo es igual al referenciado e implementado en la norma INV E-157 (INVÍAS 2013), considerándose un diámetro de 5.5 cm para este papel y haciéndose uso de recipientes herméticos que permiten conservar las muestras con su respectiva humedad, simultáneamente se ingresa el papel filtro durante siete (7) días permitiendo el equilibrio entre el suelo el aire y el mismo papel.



Fotografía 10. Papel filtro. Whatman Schleicher y Schuell.

5.3.2 Método del potenciómetro para determinar el punto de rocío

La medición de potencial del agua en el WP4C de un sólido o un líquido se puede encontrar relacionando el potencial de lectura la muestra de agua a la presión de vapor del aire en equilibrio con la muestra.

La relación entre el potencial de agua de la muestra y la presión de vapor del aire se define por la siguiente ecuación. (Ver Ecuación 1)

$$\Psi = \frac{RT}{M} * \ln \frac{p}{p_0}$$

Ecuación 1

p: presión de vapor del aire

p₀: presión de vapor de saturación a temperatura de la muestra

R: constante de gas = 8.31 J/molK

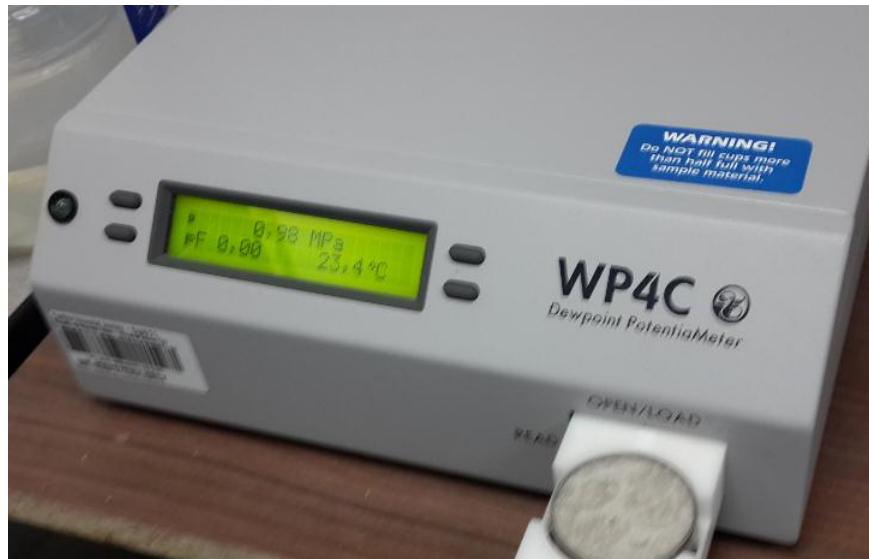
T: temperatura en kelvin de la muestra

M: masa molecular del agua

Esta medida se presentara en el WP4C computando el potencial de agua, equilibrando el agua en fase líquida de la muestra con la fase de vapor de agua en el espacio superior de la cámara cerrada.

Un valor aproximado de potencial osmótico se puede encontrar mediante la medición de la conductividad eléctrica EC del extracto de saturación del suelo. (Ver Ecuación 2).

$$\Psi_{os} (MPa) = -0.036 EC \frac{dS}{m} \quad \text{Ecuación 2}$$



Fotografía 11. WP4C

En la fotografía 11 se puede observar el potencial de agua en MPa y en función de la unidad de medida pF, con la temperatura respectiva de la muestra. Este resultado puede tardar entre 15- 30 minutos en ejecución.

$$pF = \log_{10} h \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

h : Presión negativa expresada en cm de agua.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con base en los análisis realizados para los cuatro materiales que se utilizaron (material blanco, material rojo, arena de guamo y arena de Ottawa), a partir de cada método de secado y de succión se elaboraron gráficos comparativos donde se presenta el comportamiento de las curvas características de humedad en función del material y del método de medición de la succión.

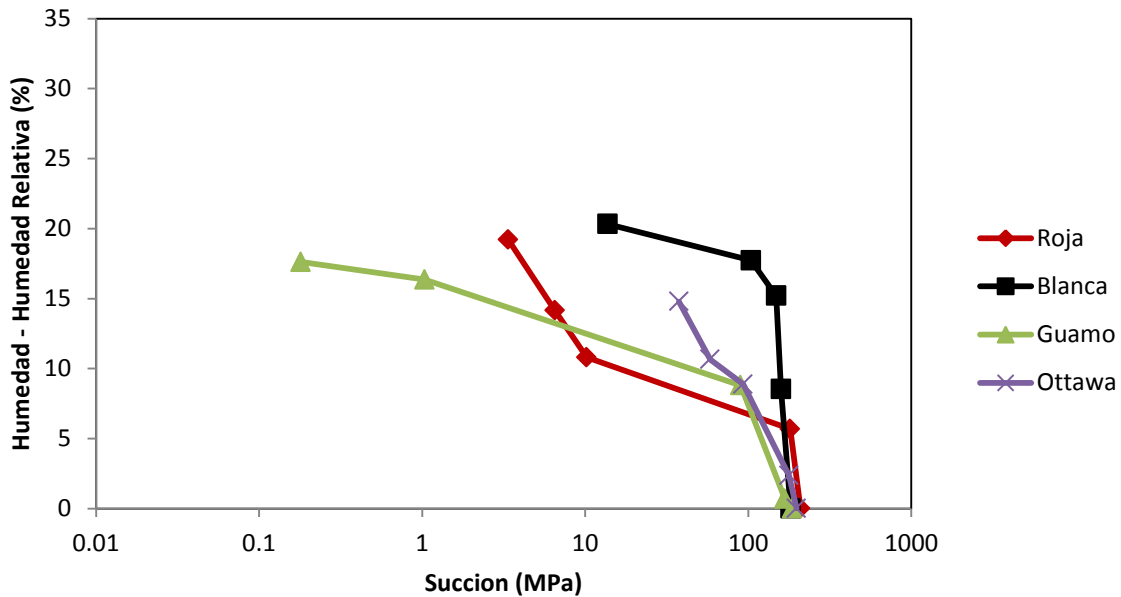
6.1 Método del Papel Filtro respecto cada método de secado

La gráfica para la curva característica de humedad se presenta a partir de la relación del porcentaje de humedad contra la succión en cada muestra; la finalidad del proyecto se centró en el comportamiento de la muestra hacia los diferentes métodos de secado empleados.

6.1.1 Secado a temperatura ambiente

En la Gráfica 1 se puede observar que, para un mismo valor de succión, los geo-materiales intermedios presentan mayor porcentaje de humedad en especial la muestra blanca que nos define en la gráfica con mayor claridad; lo anterior es debido a su alta porosidad y mayor área superficial específica; estas dos características hacen que el material retenga mayor cantidad de agua. Después de determinado tiempo en el desarrollo del método de secado, el contenido de humedad en las arenas tendía a disminuirse de forma acelerada comparado con el de las muestras de los geo-materiales intermedios.

En el **anexo B** se encuentra toda la información respecto a tiempos de ejecución, resultados en el papel filtro, temperatura promedio y pesos respectivos.

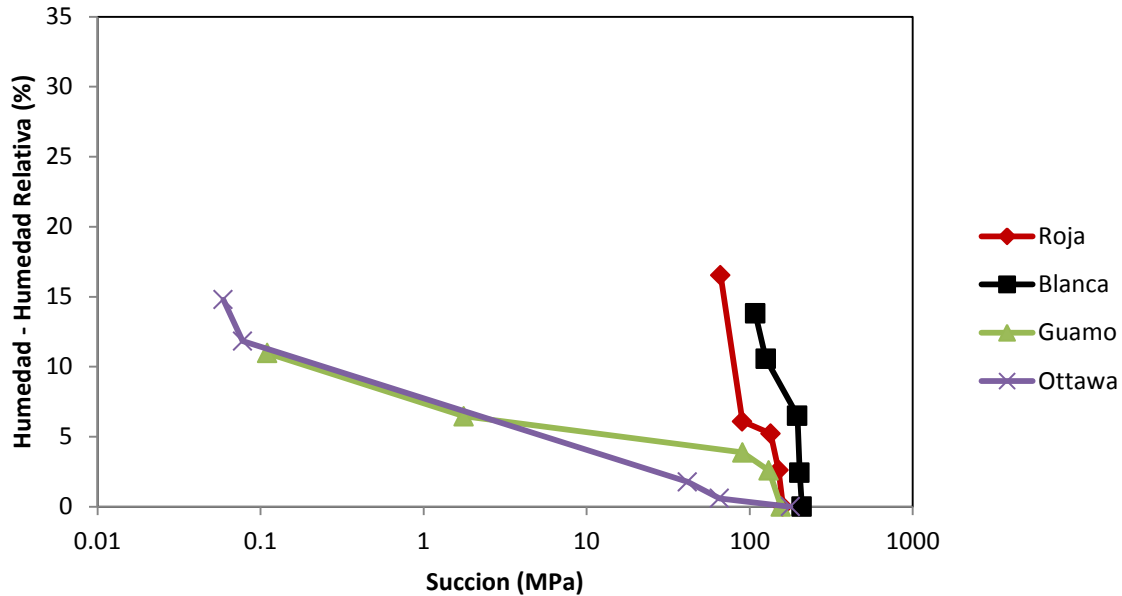


Gráfica 1. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas al ambiente

6.1.2 Secado horno microondas

Durante el desarrollo de este método, con un estrés térmico generado por el horno microondas a 700 Watts, se observó que las muestras se alteraban, por lo que fue necesario implementar la colocación de un vaso con agua dentro del horno con el fin de evitar sobrecalentamiento en las muestras. En la Gráfica 2 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado, donde se evidencia mayor retención de humedad en los geo-materiales intermedios que en las arenas para un mismo valor de succión.

En el **anexo C** se encuentra toda la información respecto la capacidad calorífica expuesta en cada material considerando los tiempos de ejecución, resultados en el papel filtro, temperatura promedio y pesos respectivos.

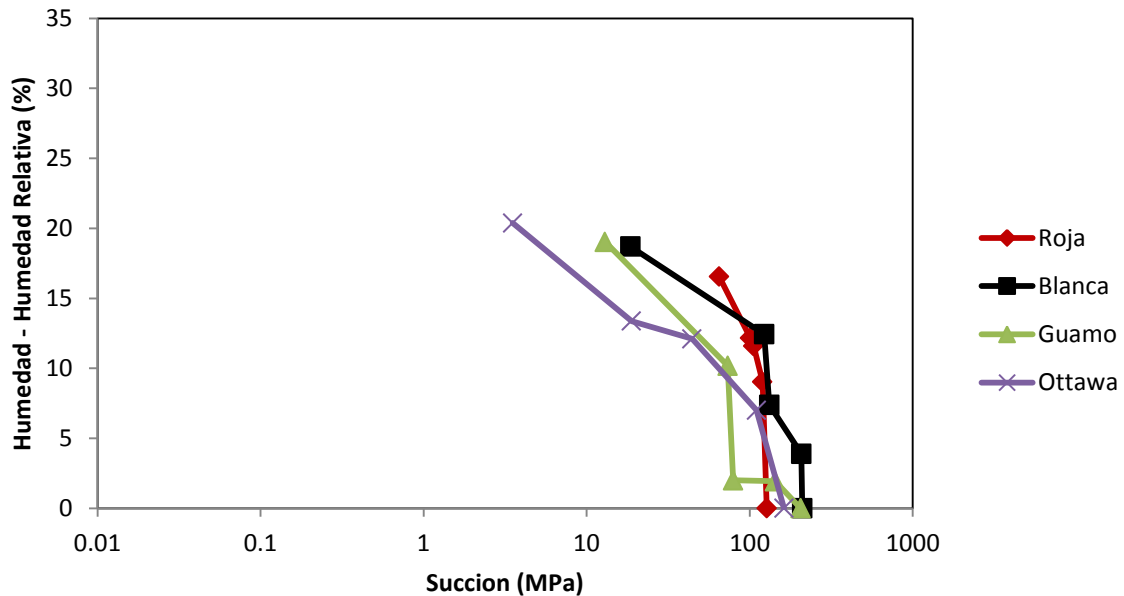


Gráfica 2. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas en horno microondas

6.1.3 Secado Lámparas halógenas

Con este método de secado se debe tener especial precaución en la posición en que se disponen las muestras bajo el efecto de los rayos de la lámpara, debido a que éstas generan mayor radiación bajo el centro de la bombilla y menor radiación en sus lados. En la Gráfica 3 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado, observándose el mismo comportamiento a los anteriores métodos mencionados, demostrando de igual modo la capacidad de retención de agua para los geo-materiales intermedios.

En el **anexo D** se encuentra toda la información respecto la capacidad calorífica expuesta en cada material considerando los tiempos de ejecución, resultados en el papel filtro, temperatura promedio y pesos respectivos.

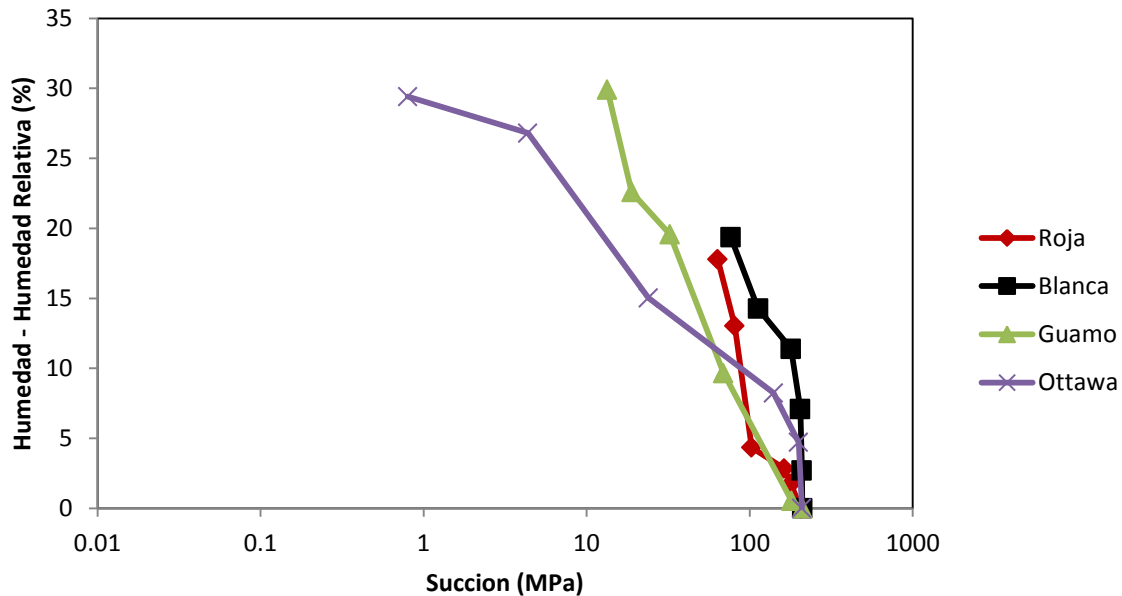


Gráfica 3. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas en Lámparas halógenas

6.1.4 Horno convencional

El secado de las muestras en el horno convencional se ejecutó siguiendo la norma de ensayo INV E-122 (INVÍAS 2013). Debido a la temperatura de secado constante (sin pérdida de calor) dentro del horno, y al después de las 24 horas del método, se evidencian con mayor detalle los cambios que se generan en la muestra a medida que la carga calorífica reacciona en esta; este efecto se percibe con mayor claridad a bajos contenidos de humedad en los geo-materiales. En la Gráfica 4 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado.

En el **anexo E** se muestra el detalle los tiempos en que las muestras variaban su peso considerablemente, a partir de la carga de calor expuesta sobre cada muestra.

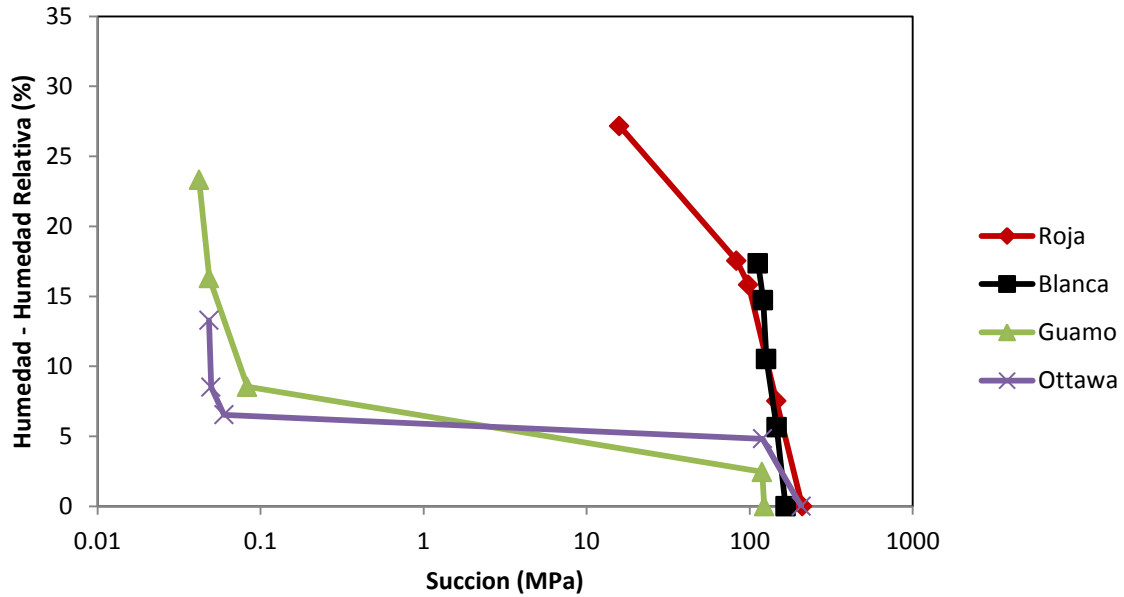


Gráfica 4. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas en Horno convencional

6.1.5 Secado cámara térmica

La implementación de este equipo como alternativa de secado, el cual es un baño María, se realizó colocando la cámara a 40 °C promedio generación de vapor (para que no se incrementara el contenido de humedad en las muestras), y sellando la cámara para que no se perdiera el calor generado. En la Gráfica 5 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado, donde se observa que las muestras de arena presentan un comportamiento similar de succión en función del contenido de humedad, confirmando la capacidad de retención de agua, para los geo-materiales intermedios.

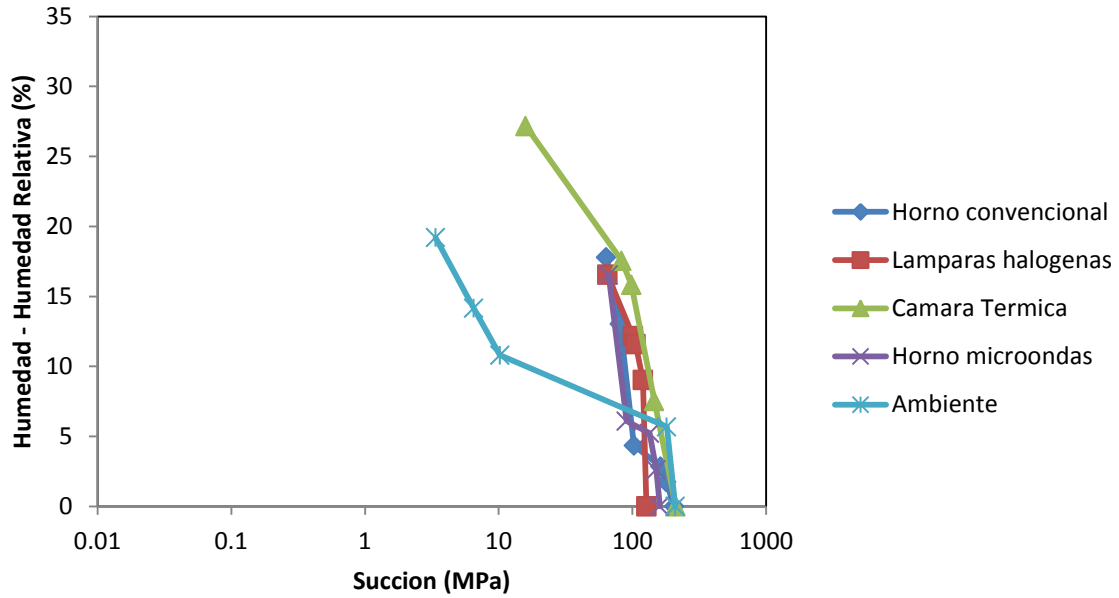
En el **Anexo F** se muestra los valores obtenidos a partir del método de secado, los tiempos requeridos para observar cambios de peso en las muestras, y los pesos representativos en el papel filtro después de los 7 días en los recipientes herméticos.



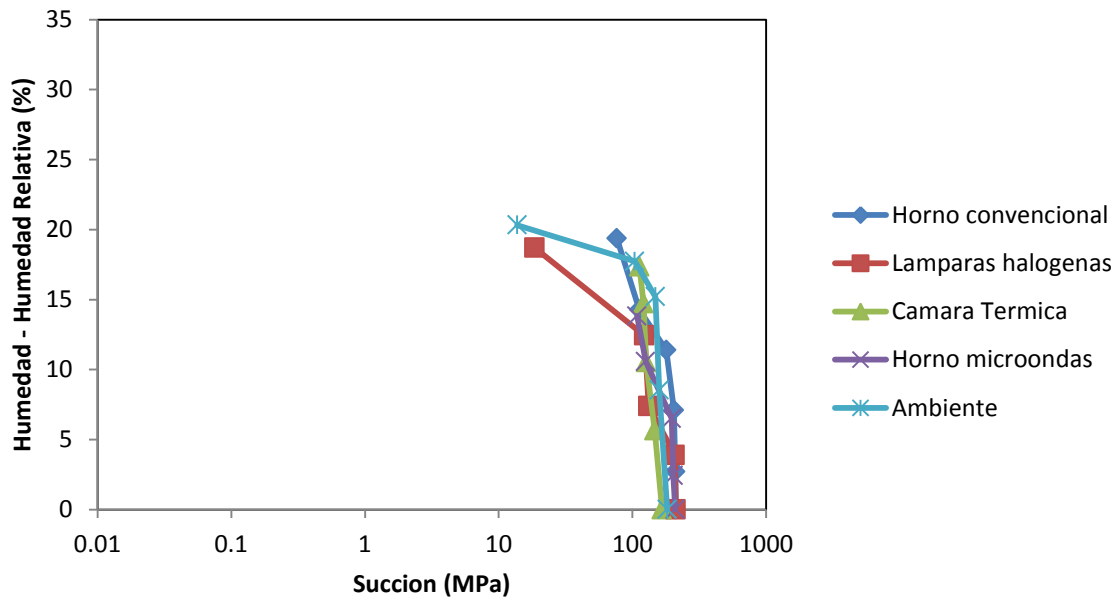
Gráfica 5. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre muestras secadas en Cámara térmica

6.1.6 Comparación de la influencia de los métodos de secado sobre el tipo de muestra

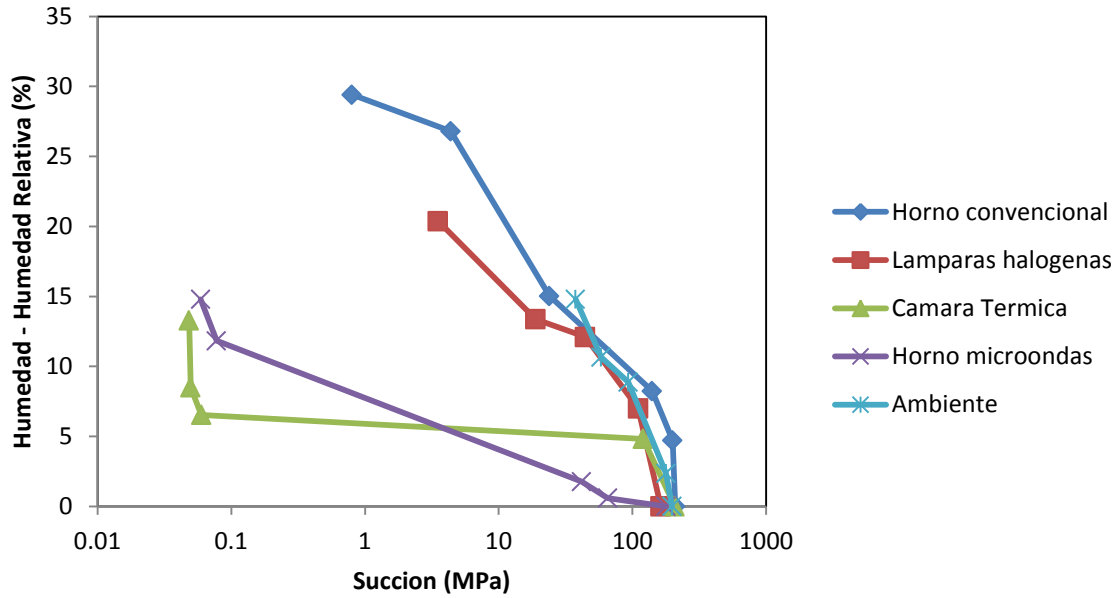
En la Gráfica 6 a la Gráfica 9 se presenta la influencia de los métodos de secado sobre el tipo de muestra para la medición de succión usando papel filtro.



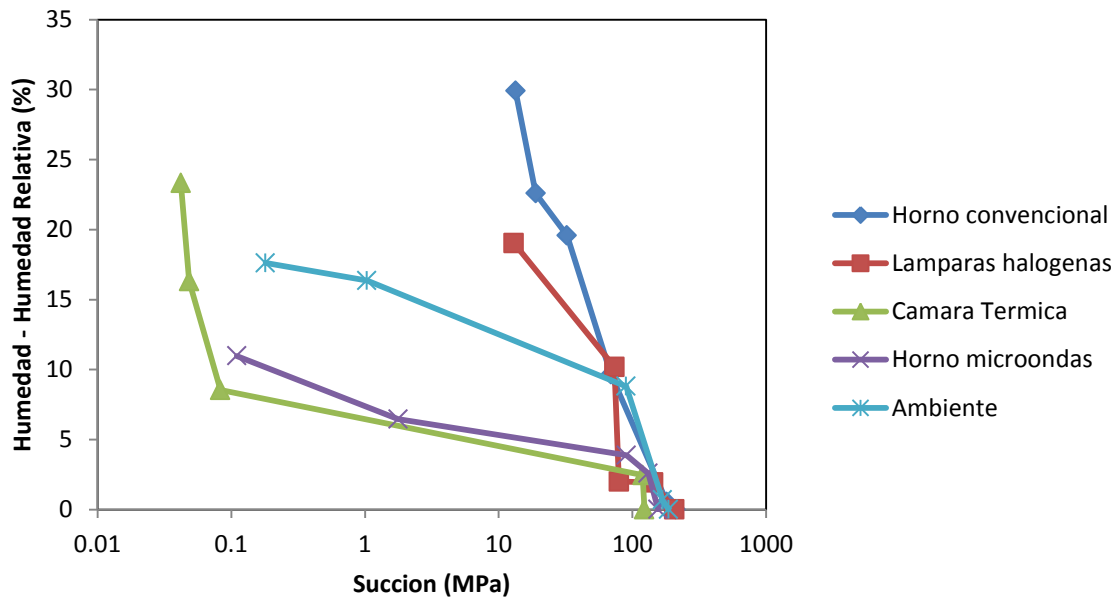
Gráfica 6. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre la muestra roja



Gráfica 7. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre la muestra blanca



Gráfica 8. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre la arena de Ottawa



Gráfica 9. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con papel filtro sobre la arena del Guamo

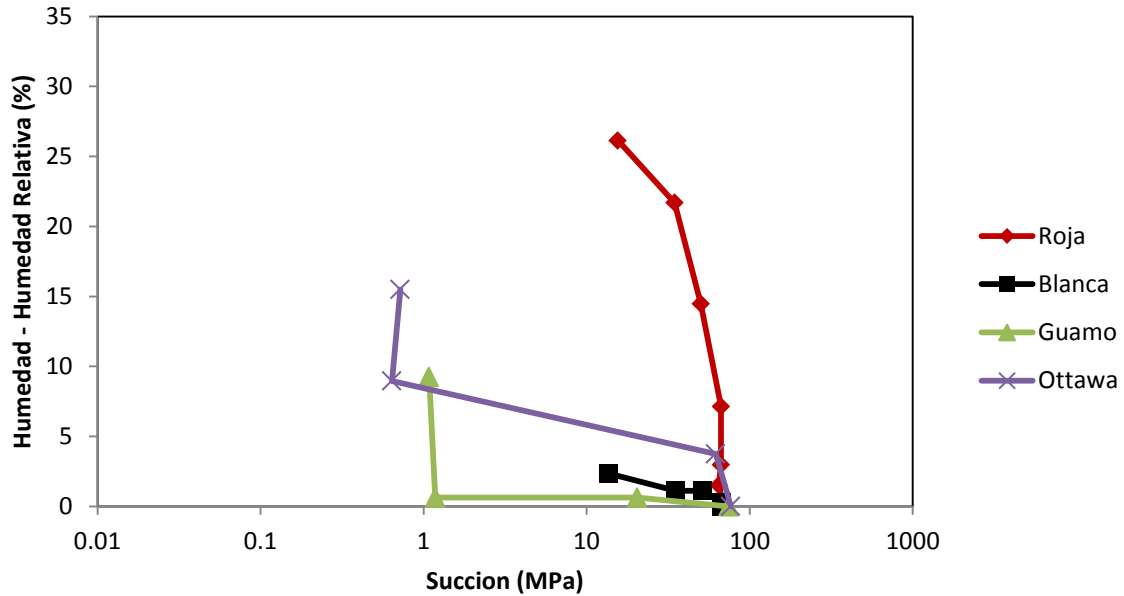
6.2 Método WP4C respecto a cada método de secado

Comparando los métodos de secado implementados en este trabajo, y considerando los procesos a seguir en cada uno de ellos, la succión medida a partir del equipo WP4C resultó ser eficiente en cuanto a tiempo de ejecución del ensayo y calidad de precisión en los datos para el diseño de la curva característica de humedad, ya que los datos arrojados por el WP4C son de manera directa en función de pF y MPa sin necesidad de utilizar una curva de calibración directa como se realiza con el método del papel filtro.

La Gráfica curva característica de humedad se presenta a partir de la relación del porcentaje de humedad contra la succión en cada muestra, para los diferentes métodos de secado.

6.2.1 Secado a temperatura ambiente

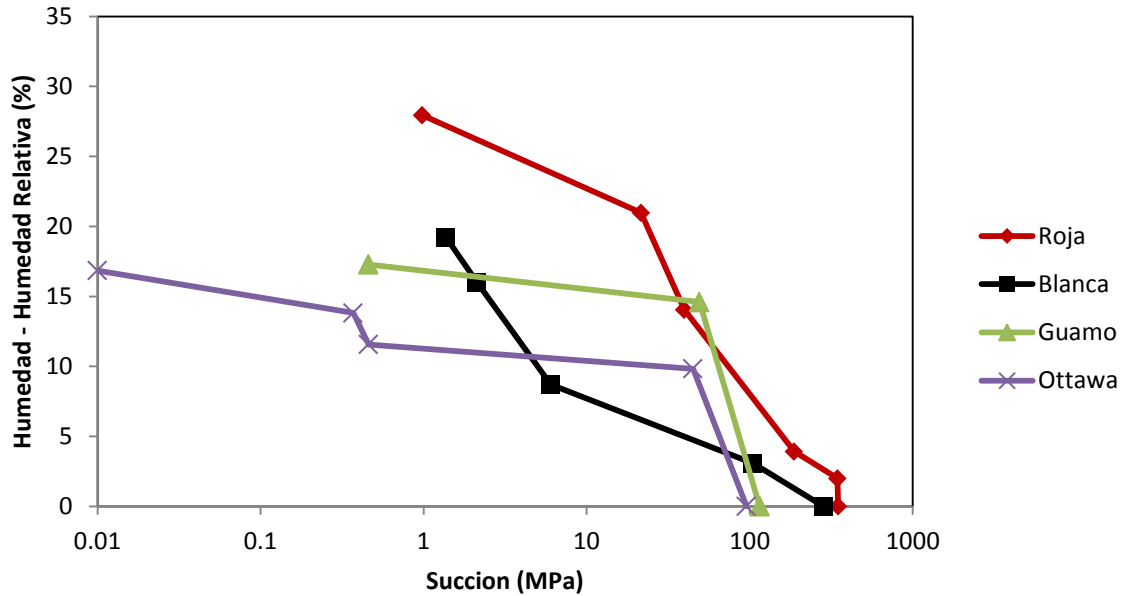
Con este método de secado, y la medición de la succión por medio del WP4C, los resultados se obtuvieron en un margen de 30 minutos promedio. Las arenas, de igual modo, muestran su baja capacidad de presentar valores de succión a altos contenidos de humedad. En la Gráfica 10 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado. Los datos detallados del proceso se muestran en el **anexo G**.



Gráfica 10. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en el ambiente

6.2.2 Secado Lámparas Halógenas

El comportamiento entre geo-materiales intermedios, y entre arenas, resultó ser muy similar. En la Gráfica 11 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado. Los datos detallados del proceso se muestran en el **anexo H**.

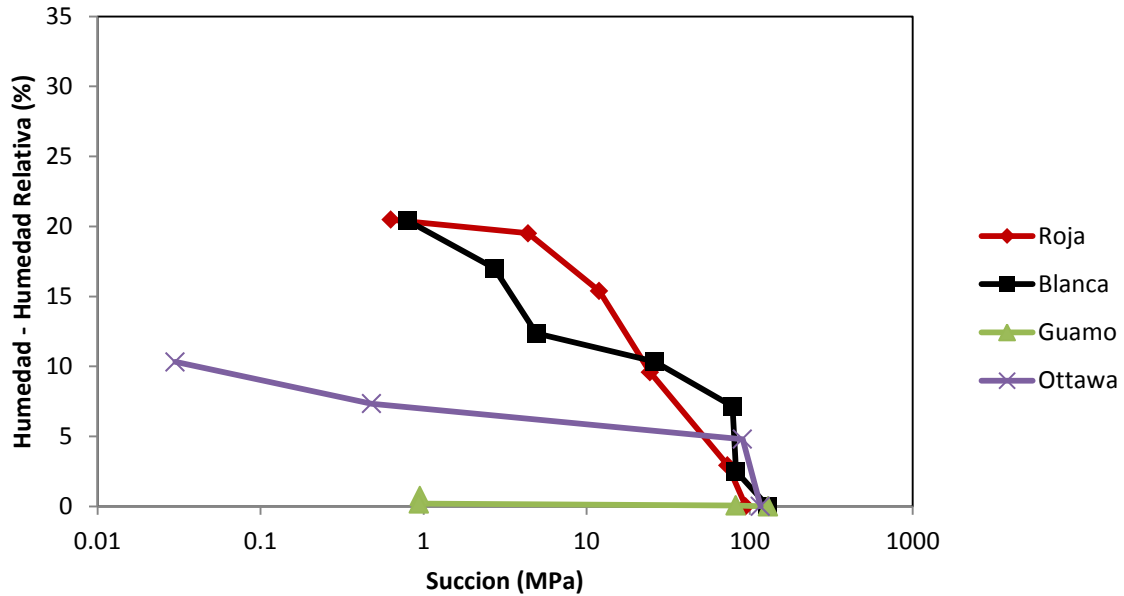


Gráfica 11. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en Lámparas Halógenas

6.2.3 Secado Horno Microondas

En el proceso de secado usando el horno microondas se evidencia en las arenas valores bajos de succión que en los geo-materiales intermedios, para un mismo contenido de humedad. Este método de secado presenta alta eficiencia comparado con los otros métodos implementados en este trabajo, ya que las muestras logran secarse en un tiempo aproximado de 30 minutos.

En la Gráfica 12 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado. Los resultados y tablas específicas se pueden observar en el **anexo I**.

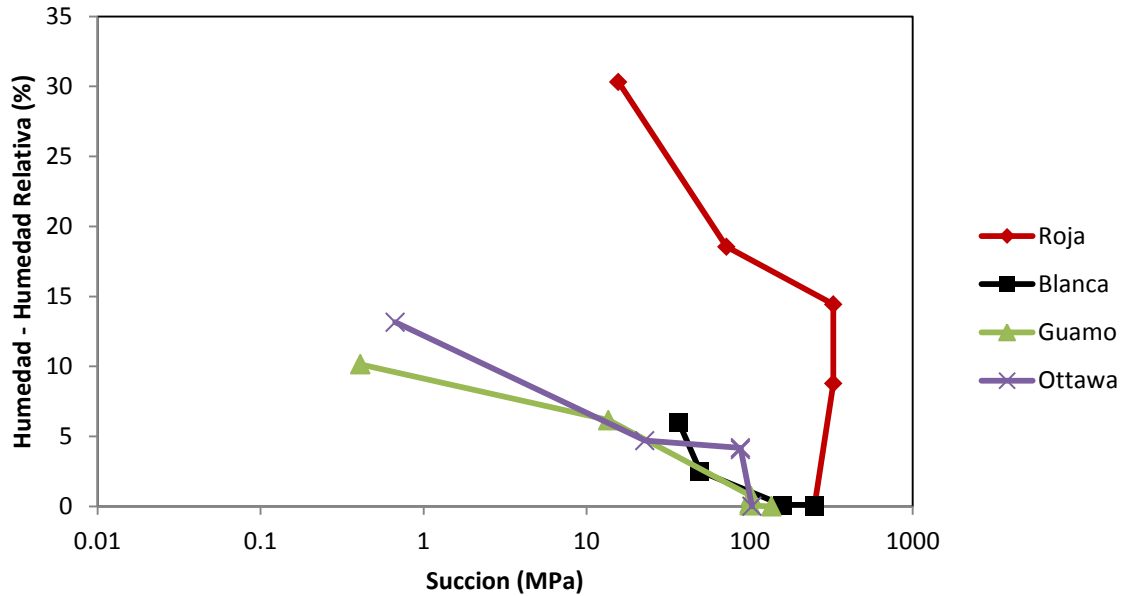


Gráfica 12. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en Horno Microondas

6.2.4 Secado Horno convencional

Contrario a los resultados logrados con el secado en horno microondas Gráfica 12, con éste método de secado se observa que las arenas presentan valores similares para iguales contenidos de humedad, con mayor dispersión de los resultados a medida que disminuye el contenido de humedad.

En la Gráfica 13 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado. En el **anexo J** se observaran de igual modo los tiempos requeridos y valores considerados en el laboratorio.

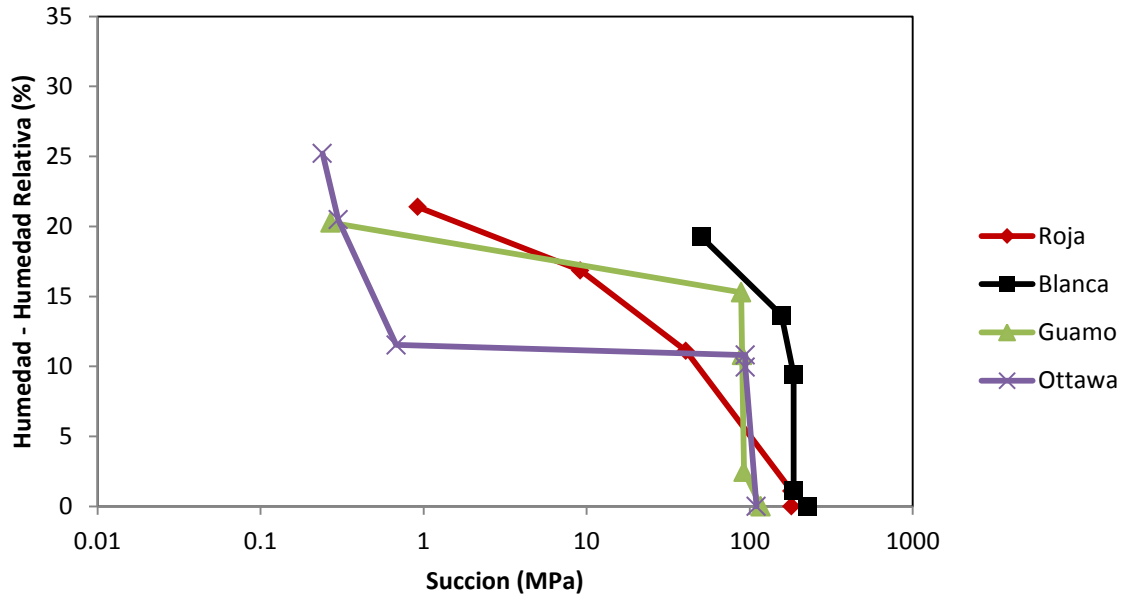


Gráfica 13. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en Horno convencional

6.2.5 Secado Cámara térmica

La implementación de este equipo como alternativa de secado, el cual es un baño María, se realizó colocando la cámara a 40 °C promedio generación de vapor (para que no se incrementara el contenido de humedad en las muestras), y sellando la cámara para que no se perdiera el calor generado.

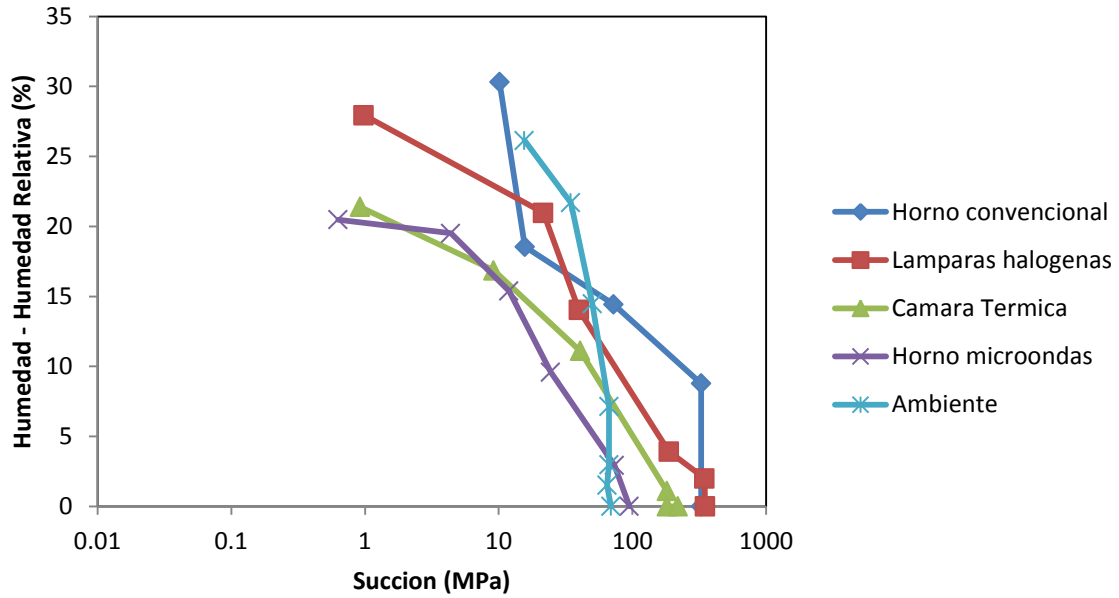
En la Gráfica 14 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con este método de secado. Los resultados y tablas específicas se muestran en el **anexo K**.



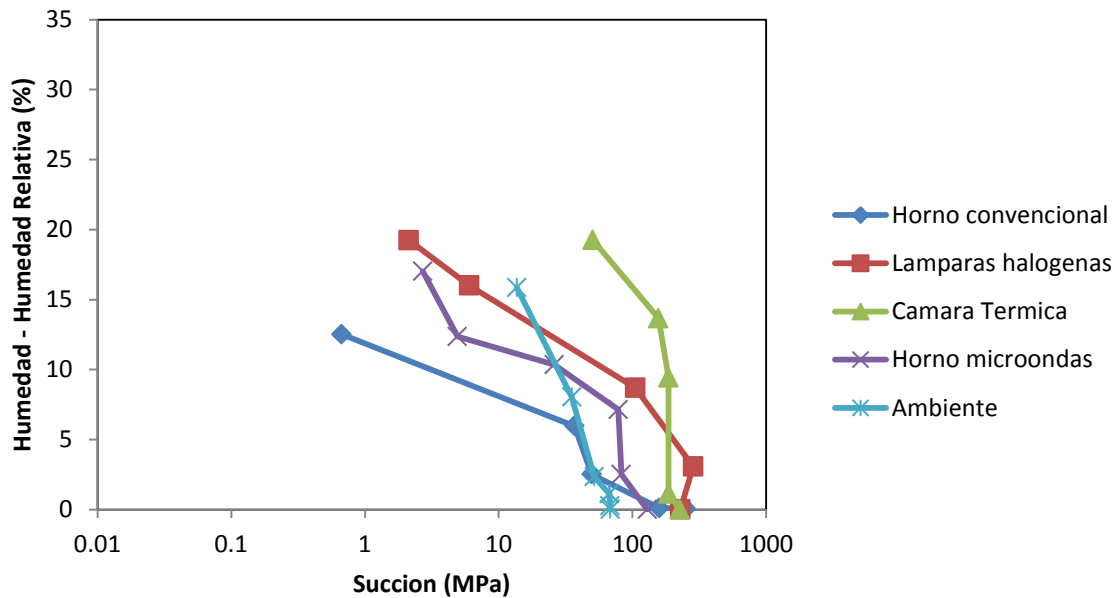
Gráfica 14. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre muestras secadas en Cámara térmica

6.2.6 Comparación de la influencia de los métodos de secado sobre el tipo de muestra

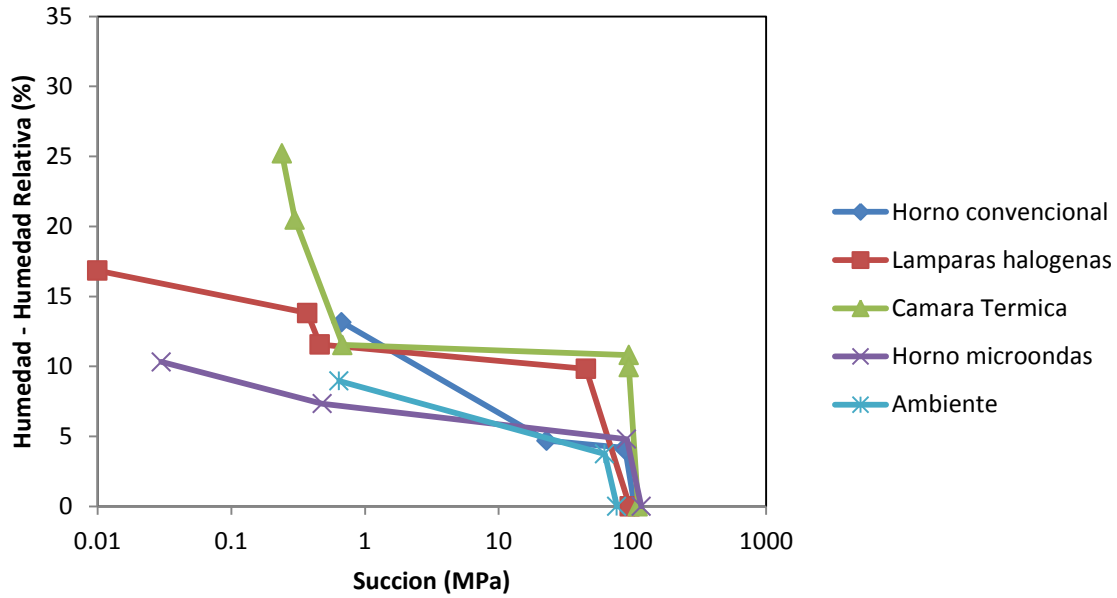
En la Gráfica 15 a la Gráfica 18 se presenta la influencia de los métodos de secado sobre el tipo de muestra para la medición de succión usando el equipo WP4C.



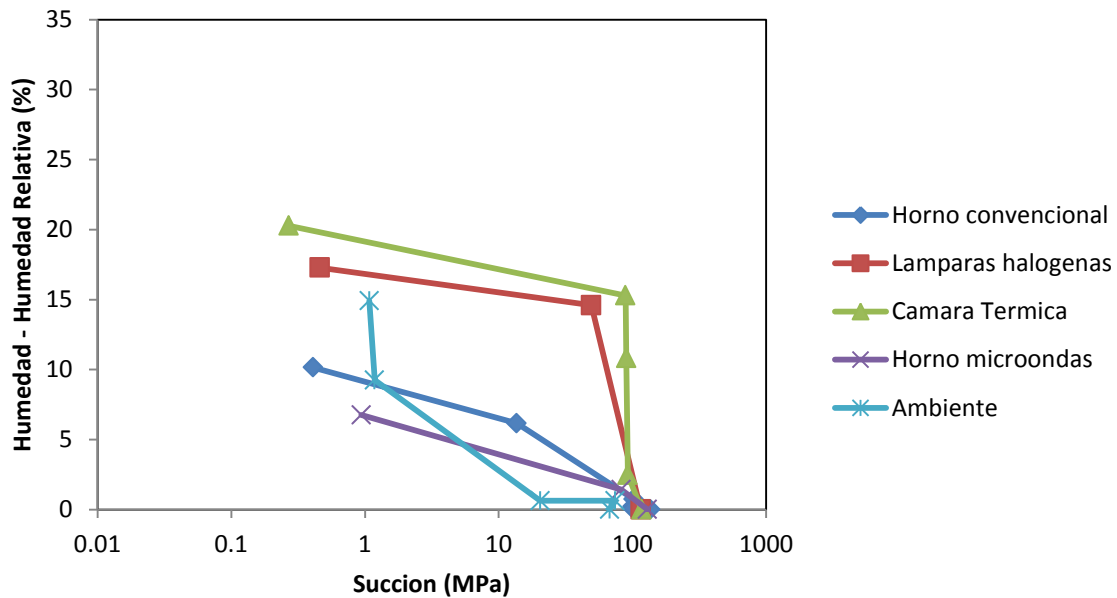
Gráfica 15. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre la muestra roja



Gráfica 16. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre la muestra blanca



Gráfica 17. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre la arena de Ottawa



Gráfica 18. Variación de la succión respecto al cambio de humedad, medición de la succión con WP4C sobre la arena del Guamo

6.3 Interpretación de resultados

En el Anexo L al Anexo O se presentan las gráficas con las curvas características de humedad de cada material en los distintos niveles de estrés térmicos generados en los métodos de secado, para succión medida con el papel filtro y el WP4C. Las características generales que se perciben en estas gráficas son:

1. En todos los métodos de secados o estrés térmico al cual fueron sometidos los materiales, se puede observar que la medida de succión determinada con el papel filtro presenta mayores valores para un mismo punto de humedad que los obtenidos con el WP4C; sin embargo, en las arenas y con el método de secado en cámara térmica, la succión obtenida con el equipo WP4C resultó ser superior que la obtenida con el papel filtro en la zona de baja succión.
2. En las arenas, y con todos los métodos de secado, la succión determinada con el papel filtro en bajos contenidos de humedad presentó valores altos comparados con los determinados con equipo WP4C.
3. Considerando la carga calorífica a la que se ve enfrentada cada muestra en el proceso de secado, se puede interpretar las curvas características de humedad.
 - El secado a temperatura ambiente cabe resaltar que es el método donde menos agresividad directa en cuanto al estrés térmico reciben las muestras, de este modo podríamos considerar un método pasivo pero con requerimiento de tiempo prolongado.
 - El secado en lámparas halógenas nos ofrece en la disposición del método una radiación directa de carga calorífica de 250W, y una tensión de 110V/60Hz de modo que en este método la muestra asume la carga de calor desde la superficie hasta la parte inferior logrando secarse en su totalidad.

- El secado en horno convencional nos brinda la seguridad de estar dentro de un ambiente uniforme donde la muestra absorbe su calor de manera homogénea, al mantener todo el horno a una temperatura de 110 grados centígrados, de este modo la muestra recibe el calor por todos sus lados.
 - El secado en horno microondas nos ofrece la eficiencia en el método de modo que la muestra es sometida a altas temperaturas, donde el estrés térmico generado es muy agresivo, considerando un rango de 500-900 watts que dispone el microondas
 - El secado en cámara térmica mantiene su temperatura a 40 grados centígrados, pero fácilmente se ve afectado por el mismo vapor generado dentro de ella, lo cual es posible que las muestras en el proceso adquieran humedad.
4. Con este trabajo de investigación se comprueba que no existe una única curva característica de succión para un suelo dado.

7 CONCLUSIONES

La finalidad en la implementación de los distintos métodos de secado fue el de comparar los efectos en la succión sobre las muestras que proporciona el estrés térmico de cada método. Respecto a este objetivo se puede concluir lo siguiente:

- El método de secado con horno convencional es el que presenta menores desventajas comparado con los otros métodos de secado implementados; esto es, no se presenta sobrecalentamiento de las muestras, el estrés térmico es relativamente uniforme sobre las muestras, y su tiempo de ejecución es considerable.
- La rapidez de ejecución en cada método de secado depende específicamente de la capacidad calorífica que disponen los métodos, el entorno y condiciones aisladas que dispone cada parámetro. Por lo anterior se concluye que el método de secado en horno microondas presenta mayor eficiencia.

En cuanto a los dos métodos de succión implementados, se concluye lo siguiente:

- El uso del papel filtro, como método de succión para determinar la curva característica de humedad, es de alta responsabilidad y cuidado con la ejecución del mismo. La manipulación del papel altera los valores de succión; esto se evidenció en los resultados con las arenas, donde en unos métodos de secado (lámparas halógenas, horno convencional) presentaron mayor contenido de humedad para misma succión que los geo-materiales intermedios.
- Como medida facilitadora y de mayor exactitud, la aplicación del método de succión WP4C permitió lograr de manera más segura y efectiva la respuesta de los resultados (un día para todos los puntos de la curva), a diferencia del papel filtro cuyos resultados eran obtenidos después de siete días por punto.

- Los resultados obtenidos a partir de equipo WP4C, generaban mayor confiabilidad, respecto a la obtención de cada curva característica de humedad.

8 DISCUSIÓN

En la mayoría de las investigaciones donde se involucra la medición de succión en suelos y rocas se ha implementado el papel filtro para determinar este parámetro debido a la confianza que tienen sobre éste los investigadores por su amplio uso a nivel mundial; sin embargo, con la implementación del equipo WP4C se logra minimizar la incertidumbre del ensayo debido a la ejecución del método. Por lo anterior, se considera que los resultados obtenidos a partir del WP4C pueden resultar más confiables que el método de succión con papel filtro; esta hipótesis se complementa con el hecho de que, al usar el papel filtro se debe tener especial cuidado en su manipulación con el fin de no alterar las mediciones.

Dentro de la literatura revisada, no se encontró información sobre estudios previos donde se determinara la curva característica de humedad para la arena del Gamo y de Ottawa, por lo que no fue posible discutir los resultados obtenidos en este trabajo; estos dos materiales fueron propuestos para este estudio por ser ampliamente estudiados, y con los que se pretendía calibrar las metodologías de medición de succión. Por otro lado, los geo-materiales intermedios utilizados en este trabajo (muestra roja y blanca) no han sido suficientemente estudiados por ser materiales locales, por lo que no se han reportado resultados de su curva característica de humedad. El método para determinar succión con el WP4C, por ser relativamente nuevo, no cuenta con bibliografía disponible. Por todo lo anterior, los resultados experimentales obtenidos en este trabajo podrán ser utilizados como punto de referencia de futuros trabajos de investigación, con el fin de mejorar y consolidar resultados sobre los materiales aquí estudiados.

Como implementación de nuevos métodos de investigación, el uso del WP4C ha sido hasta ahora poco utilizado en trabajos adelantados en la Pontificia Universidad Javeriana, por lo que se pretende aportar información del uso de este método de succión.

9 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la línea de investigación de este trabajo, considerando las facilidades que brinda el equipo WP4C para la medición de succión, y los cuidados a seguir cuando se use el método del papel filtro.

Los suelos y rocas son diversos, por lo que es apropiado continuar con su caracterización y estudio a manera local con el fin de ampliar la información disponible para su uso ingenieril.

Para futuros trabajos de investigación se sugiere trabajar con una mayor cantidad de muestras, con el objetivo de lograr un adecuado análisis estadístico que aporte mayor confiabilidad al estudio.

Finalmente, para consolidar la investigación y complementar este tema de investigación, se sugiere hacer uso de nuevos métodos como el equipo Hyprop que permite determinar tensiones en muestras de roca o suelo, lo cual, junto al método de WP4C se lograría obtener una curva de retención de humedad en un mayor intervalo de humedad.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, A. (2013). "Estudio geotécnico de arenas de Ottawa y ensayos de mejora con biocalcificación."
- Andry, H., T. Yamamoto, T. Irie, S. Moritani, M. Inoue and H. Fujiyama (2009). "Water retention, hydraulic conductivity of hydrophilic polymers in sandy soil as affected by temperature and water quality." Journal of Hydrology **373**(1): 177-183.
- Bear, J. (1972). "Dynamics of fluids in porous media." Eisevier, New York, 764p.
- Castro, A. A. G. (2009). DETERMINACION DE LA CURVA DE RETENCON DE AGUA DE SUELS GRANULARES USANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
- Ceryan, S., S. Tudes and N. Ceryan (2008). "A new quantitative weathering classification for igneous rocks." Environmental geology **55**(6): 1319-1336.
- De Gennaro, V. and J.-M. Pereira (2013). "A viscoplastic constitutive model for unsaturated geomaterials." Computers and Geotechnics **54**: 143-151.
- Diehl, D. (2013). "Soil water repellency: Dynamics of heterogeneous surfaces." Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects **432**: 8-18.
- Estabragh, A., M. Moghadas and A. Javadi (2013). "Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying." Soils and Foundations **53**(5): 617-627.
- INVÍAS (2013). Determinacion de la succion de un suelo con el metodo del papel filtro. I.N.V E-159.
- INVÍAS (2013). Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo -agregado. INVE E 122-07.
- INVÍAS (2013). Método Para Determinar La Humedad De Suelos Usando El Horno Microondas. I.N.V E-135.
- Johari, A., G. Habibagahi and A. Ghahramani (2011). "Prediction of SWCC using artificial intelligent systems: A comparative study." Scientia Iranica **18**(5): 1002-1008.
-

- Krisdani, H., H. Rahardjo and E.-C. Leong (2008). "Effects of different drying rates on shrinkage characteristics of a residual soil and soil mixtures." Engineering Geology **102**(1): 31-37.
- Mañas, F. M. d. S. O. (2005). Agua y agronomía, Mundi-Prensa Libros.
- Martínez-Fernández, J. (1995). "Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación." Avances en la investigación en la zona no saturada. Serv. Central Publ. del Gob. Vasco. Vitoria-Gasteiz: 193-202.
- Mohammadi, M. and F. Meskini-Vishkaee (2013). "Predicting soil moisture characteristic curves from continuous particle-size distribution data." Pedosphere **23**(1): 70-80.
- Nam, S., M. Gutierrez, P. Diplas, J. Petrie, A. Wayllace, N. Lu and J. J. Muñoz (2010). "Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils." Engineering Geology **110**(1): 1-10.
- Patiño Bautista, J. C. and A. Lizcano Pelaez (2006). "Parametros Hipoplásticos de la Arena del Guamo-Colombia."
- Perez Garcia, N. (2008). "Determinacion de curvas caracteristicas en suelos no saturados con celdas de presion." PUBLICACION TECNICA(313).
- Tarantino, A. and G. El Mountassir (2013). "Making unsaturated soil mechanics accessible for engineers: Preliminary hydraulic-mechanical characterisation & stability assessment." Engineering Geology **165**: 89-104.
- Turner, J. P. (2006). Rock-socketed shafts for highway structure foundations, Transportation Research Board.
- Vanapalli, S., D. Fredlund and D. Pufahl (1999). "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till." Géotechnique **49**(2): 143-159.
- Villarroya, F. (2006). "Hidrogeología." **2**.

ANEXO A – Resultados y valores específicos de los geo-materiales intermedios, muestras blanca y roja, arenas Guamo y Ottawa.

Resultado y valores específicos del geo-material intermedio, muestra roja. Valores correspondientes de humedad, relación de vacíos, porosidad y compacidad.

Muestra Roja					
	γ_w	9.81 kN/m ³			
	G_s	2.46			
	γ_d	11.58 kN/m ³			
	W_s	479.00 g			
S	w	W_s	W_w	V_w	ΔV_w
100%	44.07%	479.00 g	211.10 g	211.10 cm ³	42.22 cm ³
80%	35.26%	479.00 g	168.88 g	168.88 cm ³	42.22 cm ³
60%	26.44%	479.00 g	126.66 g	126.66 cm ³	42.22 cm ³
40%	17.63%	479.00 g	84.44 g	84.44 cm ³	42.22 cm ³
20%	8.81%	479.00 g	42.22 g	42.22 cm ³	42.22 cm ³
0%	0.00%	479.00 g	0.00 g	0.00 cm ³	0.00 cm ³
				ΣV_w	211.10 cm ³
	W	W+Pr	e	n	compacidad
	690.10 g	690.10 g	1.08416962	0.5201926	0.479807397
	647.88 g	647.88 g	1.08416962	0.5201926	0.479807397
	605.66 g	605.66 g	1.08416962	0.5201926	0.479807397
	563.44 g	563.44 g	1.08416962	0.5201926	0.479807397
	521.22 g	521.22 g	1.08416962	0.5201926	0.479807397
	479.00 g	479.00 g	0	0	0

Resultado y valores específicos del geo-material intermedio, muestra blanca. Valores correspondientes de humedad, relación de vacíos, porosidad y compacidad.

Muestra Blanca					
	γ_w	9.81 kN/m ³			
	G_s	2.63			
	γ_d	15.63 kN/m ³			
	W_s	741.30 g			
S	w	W_s	W_w	V_w	ΔV_w
100%	24.73%	741.30 g	183.35 g	183.35 cm ³	36.67 cm ³
80%	19.79%	741.30 g	146.68 g	146.68 cm ³	36.67 cm ³
60%	14.84%	741.30 g	110.01 g	110.01 cm ³	36.67 cm ³
40%	9.89%	741.30 g	73.34 g	73.34 cm ³	36.67 cm ³
20%	4.95%	741.30 g	36.67 g	36.67 cm ³	36.67 cm ³
0%	0.00%	741.30 g	0.00 g	0.00 cm ³	0.00 cm ³
				ΣV_w	183.35 cm ³
W	W+Pr	e	n	compacidad	
924.65 g	924.65 g	0.65047979	0.39411557	0.605884428	
887.98 g	887.98 g	0.65047979	0.39411557	0.605884428	
851.31 g	851.31 g	0.65047979	0.39411557	0.605884428	
814.64 g	814.64 g	0.65047979	0.39411557	0.605884428	
777.97 g	777.97 g	0.65047979	0.39411557	0.605884428	
741.30 g	741.30 g	0	0	0	

Resultado y valores específicos de la arena Ottawa. Valores correspondientes de humedad, relación de vacíos, porosidad y compacidad.

Arena Ottawa					
	γ_w	9.81 kN/m ³			
	G_s	2.5			
	γ_d	15.45 kN/m ³			
	W_s	777.10 g			
S	w	W_s	W_w	V_w	ΔV_w
100%	23.51%	777.10 g	182.73 g	182.73 cm ³	36.55 cm ³
80%	18.81%	777.10 g	146.18 g	146.18 cm ³	36.55 cm ³
60%	14.11%	777.10 g	109.64 g	109.64 cm ³	36.55 cm ³
40%	9.41%	777.10 g	73.09 g	73.09 cm ³	36.55 cm ³
20%	4.70%	777.10 g	36.55 g	36.55 cm ³	36.55 cm ³
0%	0.00%	777.10 g	0.00 g	0.00 cm ³	0.00 cm ³
				ΣV_w	182.73 cm ³
W	W+Pr	e	n	compacidad	
959.83 g	1023.23	0.58784349	0.37021501	0.62978499	
923.28 g	986.68	0.58784349	0.37021501	0.62978499	
886.74 g	950.14	0.58784349	0.37021501	0.62978499	
850.19 g	913.59	0.58784349	0.37021501	0.62978499	
813.65 g	877.05	0.58784349	0.37021501	0.62978499	
777.10 g	840.50	0	0	0	

Resultado y valores específicos de la arena Guamo. Valores correspondientes de humedad, relación de vacíos, porosidad y compacidad

Arena Guamo					
	γ_w	9.81 kN/m ³			
	G_s	2.66			
	γ_d	14.22 kN/m ³			
	W_s	799.30 g			
S	w	W_s	W_w	V_w	ΔV_w
100%	31.39%	799.30 g	250.93 g	250.93 cm ³	50.19 cm ³
80%	25.12%	799.30 g	200.75 g	200.75 cm ³	50.19 cm ³
60%	18.84%	799.30 g	150.56 g	150.56 cm ³	50.19 cm ³
40%	12.56%	799.30 g	100.37 g	100.37 cm ³	50.19 cm ³
20%	6.28%	799.30 g	50.19 g	50.19 cm ³	50.19 cm ³
0%	0.00%	799.30 g	0.00 g	0.00 cm ³	0.00 cm ³
				ΣV_w	250.93 cm ³
W	W+Pr	e	n	compacidad	
1050.23 g	1050.232	0.83508025	0.455064703	0.5449353	
1000.05 g	1000.046	0.83508025	0.455064703	0.5449353	
949.86 g	949.859	0.83508025	0.455064703	0.5449353	
899.67 g	899.673	0.83508025	0.455064703	0.5449353	
849.49 g	849.486	0.83508025	0.455064703	0.5449353	
799.30 g	799.300	0	0	0	

ANEXO B – Resultados del método de Secado ambiente, succión a partir del papel filtro.

Resultado del método de secado ambiente, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestra geo-materiales intermedios roja y blanca.

Secado ambiente								
Peso del recipiente: 14.8g				Papel filtro peso inicial: 0.2321g				
Peso del recipiente sin tapa: 7.5g				Peso inicial muestra 100% saturada: 15g				
Tiempo	roja							
	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 Dias	12.50 g	15.00 g	100.00 g	20.00%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
1 Dias	12.50 g	14.90 g	96.00 g	19.20%	0.2322 g	0.3019 g	23.09%	-3.38 MPa
3 Dias	12.50 g	14.27 g	70.80 g	14.16%	0.2318 g	0.2877 g	19.43%	-6.51 MPa
5 Dias.	12.50 g	13.85 g	54.00 g	10.80%	0.2317 g	0.2789 g	16.92%	-10.20 MPa
9 Dias	12.50 g	13.21 g	28.40 g	5.68%	0.2315 g	0.2336 g	0.90%	-180.70 MPa
11 Dias	12.50 g	12.50 g	0.00 g	0.00%	0.2325 g	0.2327 g	0.09%	-209.08 MPa
Tiempo	blanca							
	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso Final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 Dias	12.30 g	15.00 g	100.00 g	21.95%	0.2321 g	0.2321 g	0%	0.00 MPa
1 Dias	12.30 g	14.80 g	92.59 g	20.33%	0.2322 g	0.2740 g	15.26%	-13.76 MPa
3 Dias	12.30 g	14.48 g	80.74 g	17.72%	0.2318 g	0.2414 g	3.98%	-104.04 MPa
5 Dias.	12.30 g	14.17 g	69.26 g	15.20%	0.2317 g	0.2364 g	1.99%	-148.64 MPa
9 Dias	12.30 g	13.35 g	38.89 g	8.54%	0.2315 g	0.2353 g	1.61%	-158.93 MPa
11 Dias	12.30 g	12.30 g	0.00 g	0.00%	0.2325 g	0.2345 g	0.85%	-182.21 MPa

Resultado del método de secado ambiente, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestra arenas Guamo y Ottawa.

Secado ambiente

Peso del recipiente: 14.8g

Papel filtro peso inicial: 0.2321g

Peso del recipiente sin tapa: 7.5g

Peso inicial muestra 100% saturada: 20g

Tiempo	Guamo							
	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso Final	Humedad	
0 Dias	15.90 g	20.00 g	100.00 g	25.79%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
1 Dias	15.90 g	18.70 g	68.29 g	17.61%	0.2322 g	0.3833 g	39.42%	-0.18 MPa
3 Dias	15.90 g	18.50 g	63.41 g	16.35%	0.2318 g	0.3302 g	29.68%	-1.04 MPa
5 Dias.	15.90 g	17.30 g	34.15 g	8.81%	0.2317 g	0.2439 g	4.80%	-89.81 MPa
9 Dias	15.90 g	16.01 g	2.68 g	0.69%	0.2315 g	0.2353 g	1.32%	-167.64 MPa
11 Dias	15.90 g	15.90 g	0.00 g	0.00%	0.2325 g	0.2339 g	0.73%	-186.37 MPa

Tiempo	Ottawa							
	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso Final	Humedad	
0 Dias	16.90 g	20.00 g	100.00 g	18.34%	0.2321 g	0.2321	0.00%	0.00 MPa
1 Dias	16.90 g	19.40 g	80.65 g	14.79%	0.2322 g	0.2570	9.65%	-37.61 MPa
3 Dias	16.90 g	18.70 g	58.06 g	10.65%	0.2318 g	0.2502	7.19%	-58.42 MPa
5 Dias.	16.90 g	18.40 g	48.39 g	8.88%	0.2317 g	0.2434	4.60%	-93.01 MPa
9 Dias	16.90 g	17.30 g	12.90 g	2.37%	0.2315 g	0.2345	0.98%	-178.07 MPa
11 Dias	16.90 g	16.90 g	0.00 g	0.00%	0.2325 g	0.2331	0.39%	-198.12 MPa

ANEXO C – Resultados del método de Secado microondas, succión a partir del papel filtro.

Resultado del método de secado microondas, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestra geo materiales intermedios roja y blanca.

Secado microondas								
Peso del recipiente: 14.8g				Papel filtro peso inicial: 0.2321g				
Peso del recipiente sin tapa: 7.5g				Peso inicial muestra 100% saturada: 15g				
roja								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	11.50 g	15.00 g	100.00 g	30.43%	0.2321 g	0.2492 g	0.00%	0.00 MPa
2 min	11.50 g	13.40 g	54.29 g	16.52%	0.2321 g	0.2482 g	6.49%	-66.33 MPa
4 min	11.50 g	12.20 g	20.00 g	6.09%	0.2257 g	0.2370 g	4.77%	-90.28 MPa
6 min	11.50 g	12.10 g	17.14 g	5.22%	0.2255 g	0.2314 g	2.55%	-134.39 MPa
8 min	11.50 g	11.80 g	8.57 g	2.61%	0.2257 g	0.2301 g	1.91%	-150.67 MPa
10 min	11.50 g	11.50 g	0.00 g	0.00%	0.2257 g	0.2293 g	1.57%	-160.21 MPa
blanca								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	12.30 g	15.00 g	100.00 g	21.95%	0.2321 g	0.2357 g	0.00%	0.00 MPa
2 min	12.30 g	14.00 g	62.96 g	13.82%	0.2257 g	0.2345 g	3.75%	-108.31 MPa
4 min	12.30 g	13.60 g	48.15 g	10.57%	0.2257 g	0.2325 g	2.92%	-125.65 MPa
6 min	12.30 g	13.10 g	29.63 g	6.50%	0.2257 g	0.2267 g	0.44%	-196.17 MPa
8 min	12.30 g	12.60 g	11.11 g	2.44%	0.2257 g	0.2263 g	0.27%	-202.46 MPa
10 min	12.30 g	12.30 g	0.00 g	0.00%	0.2257 g	0.2259 g	0.09%	-208.98 MPa

Resultado del método de secado microondas, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestra arenas Guamo y Ottawa.

Secado microondas

Peso del recipiente: 14.8g

Papel filtro peso inicial: 0.2321g

Peso del recipiente sin tapa: 7.5g

Peso inicial muestra 100% saturada: 20g

Guamo								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	15.50 g	20.00 g	100.00 g	29.03%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
2 min	15.50 g	17.20 g	37.78 g	10.97%	0.2257 g	0.3903 g	42.17%	-0.11 MPa
4 min	15.50 g	16.50 g	22.22 g	6.45%	0.2321 g	0.3166 g	26.69%	-1.77 MPa
6 min	15.50 g	16.10 g	13.33 g	3.87%	0.2278 g	0.2392 g	4.77%	-90.31 MPa
8 min	15.50 g	15.90 g	8.89 g	2.58%	0.2317 g	0.2381 g	2.69%	-131.10 MPa
10 min	15.50 g	15.50 g	0.00 g	0.00%	0.2284 g	0.2324 g	1.72%	-155.93 MPa

Ottawa								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	16.90 g	20.00 g	100.00 g	18.34%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
2 min	16.90 g	19.40 g	80.65 g	14.79%	0.2278 g	0.4333 g	47.43%	-0.06 MPa
4 min	16.90 g	18.90 g	64.52 g	11.83%	0.2321 g	0.4153 g	44.11%	-0.08 MPa
6 min	16.90 g	17.20 g	9.68 g	1.78%	0.2321 g	0.2553 g	9.09%	-41.60 MPa
8 min	16.90 g	17.00 g	3.23 g	0.59%	0.2322 g	0.2485 g	6.56%	-65.47 MPa
10 min	16.90 g	16.90 g	0.00 g	0.00%	0.2322 g	0.2345 g	0.98%	-178.07 MPa

ANEXO D – Resultados del método de Secado lámparas halógenas, succión a partir del papel filtro.

Resultado del método de secado lámparas halógenas, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestra geo-materiales intermedios roja y blanca

Secado lámparas halógenas								
Peso del recipiente: 14.8g				Papel filtro peso inicial: 0.2321g				
Peso del recipiente sin tapa: 7.5g				Peso inicial muestra 100% saturada: 15g				
roja								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	12.50 g	15.00 g	100.00 g	20.00%	0.2321 g	2321.0000 g	0.00%	0.00 MPa
10 min	12.50 g	14.57 g	82.80 g	16.56%	0.2221 g	0.2378 g	6.60%	-64.97 MPa
20 min	12.50 g	14.02 g	60.80 g	12.16%	0.2321 g	0.2317 g	4.14%	-100.98 MPa
40 min	12.50 g	13.95 g	58.00 g	11.60%	0.2321 g	0.2311 g	3.89%	-105.59 MPa
50 min	12.50 g	13.63 g	45.20 g	9.04%	0.2321 g	0.2294 g	3.18%	-119.98 MPa
1:50 min	12.50 g	12.50 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2286 g	2.84%	-127.50 MPa
blanca								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	12.30 g	15.00 g	100.00 g	21.95%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
10 min	12.30 g	14.60 g	85.19 g	18.70%	0.2221 g	0.2570 g	13.58%	-18.58 MPa
20 min	12.30 g	13.83 g	56.67 g	12.44%	0.2321 g	0.2394 g	3.05%	-122.87 MPa
40 min	12.30 g	13.21 g	33.70 g	7.40%	0.2321 g	0.2384 g	2.64%	-132.17 MPa
50 min	12.30 g	12.78 g	17.78 g	3.90%	0.2321 g	0.2324 g	0.13%	-207.46 MPa
1:50 min	12.30 g	12.30 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2322 g	0.04%	-210.69 MPa

Resultado del método de secado lámparas halógenas, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestra arenas Guamo y Ottawa.

Secado lámparas halógenas

Peso del recipiente: 14.8g

Papel filtro peso inicial: 0.2321g

Peso del recipiente sin tapa: 7.5g

Peso inicial muestra 100% saturada: 20g

Guamo								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	15.03 g	20.00 g	100.00 g	33.07%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
10 min	15.03 g	17.89 g	57.55 g	19.03%	0.2221 g	0.2631 g	15.58%	-12.97 MPa
20 min	15.03 g	16.56 g	30.78 g	10.18%	0.2321 g	0.2467 g	5.92%	-73.45 MPa
40 min	15.03 g	15.33 g	6.04 g	2.00%	0.2321 g	0.2456 g	5.50%	-79.21 MPa
50 min	15.03 g	15.32 g	5.84 g	1.93%	0.2321 g	0.2373 g	2.19%	-143.32 MPa
1:50 min	15.03 g	15.03 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2325 g	0.17%	-205.87 MPa

Ottawa								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	15.70 g	20.00 g	100.00 g	27.39%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
10 min	15.70 g	18.90 g	74.42 g	20.38%	0.2221 g	0.2879 g	22.86%	-3.52 MPa
20 min	15.70 g	17.80 g	48.84 g	13.38%	0.2321 g	0.2683 g	13.49%	-18.88 MPa
40 min	15.70 g	17.60 g	44.19 g	12.10%	0.2321 g	0.2543 g	8.73%	-44.36 MPa
50 min	15.70 g	16.80 g	25.58 g	7.01%	0.2321 g	0.2409 g	3.65%	-110.26 MPa
1:50 min	15.70 g	15.70 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2356 g	1.49%	-162.66 MPa

ANEXO E – Resultados del método de Secado horno convencional, succión a partir del papel filtro.

Resultado del método de secado horno convencional, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestra geo materiales intermedios roja y blanca.

Secado horno convencional								
Peso del recipiente: 14.8g				Papel filtro peso inicial: 0.2321g				
Peso del recipiente sin tapa: 7.5g				Peso inicial muestra 100% saturada: 15g				
roja								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
17:00	12.65 g	15.00 g	100.00 g	18.58%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
17:20	12.65 g	14.90 g	95.74 g	17.79%	0.2322 g	0.2489 g	6.71%	-63.73 MPa
18:20	12.65 g	14.30 g	70.21 g	13.04%	0.2323 g	0.2455 g	5.38%	-80.94 MPa
19:20	12.65 g	13.20 g	23.40 g	4.35%	0.2323 g	0.2421 g	4.05%	-102.72 MPa
20:20	12.65 g	13.01 g	15.32 g	2.85%	0.2321 g	0.2356 g	1.49%	-162.66 MPa
10:00	12.65 g	12.87 g	9.36 g	1.74%	0.2321 g	0.2343 g	0.94%	-179.41 MPa
12:00	12.65 g	12.65 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2325 g	0.17%	-205.87 MPa
blanca								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
17:00	12.55 g	15.00 g	100.00 g	19.52%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
17:20	12.55 g	14.98 g	99.18 g	19.36%	0.2322 g	0.2462 g	5.69%	-76.56 MPa
18:20	12.55 g	14.34 g	73.06 g	14.26%	0.2323 g	0.2408 g	3.53%	-112.73 MPa
19:20	12.55 g	13.98 g	58.37 g	11.39%	0.2323 g	0.2345 g	0.94%	-179.44 MPa
20:20	12.55 g	13.44 g	36.33 g	7.09%	0.2321 g	0.2326 g	0.21%	-204.29 MPa
10:00	12.55 g	12.89 g	13.88 g	2.71%	0.2321 g	0.2323 g	0.09%	-209.07 MPa
12:00	12.55 g	12.55 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2322 g	0.04%	-210.69 MPa

Resultado del método de secado horno convencional, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestras arenas Guamo y Ottawa.

Secado horno convencional

Peso del recipiente: 14.8g

Papel filtro peso inicial: 0.2321g

Peso del recipiente sin tapa: 7.5g

Peso inicial muestra 100% saturada: 20g

Guamo								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
17:00	15.32 g	20.00 g	100.00 g	30.55%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
17:20	15.32 g	19.90 g	97.86 g	29.90%	0.2322 g	0.2745 g	15.41%	-13.38 MPa
18:20	15.32 g	18.78 g	73.93 g	22.58%	0.2323 g	0.2685 g	13.48%	-18.91 MPa
19:20	15.32 g	18.32 g	64.10 g	19.58%	0.2323 g	0.2595 g	10.48%	-32.39 MPa
20:20	15.32 g	16.80 g	31.62 g	9.66%	0.2321 g	0.2476 g	6.26%	-69.08 MPa
10:00	15.32 g	15.40 g	1.71 g	0.52%	0.2321 g	0.2342 g	0.90%	-180.78 MPa
12:00	15.32 g	15.32 g	0.00 g	0.00 g	0.2321 g	0.2322 g	0.04%	-210.69 MPa

Ottawa								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
17:00	15.30 g	20.00 g	100.00 g	30.72%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
17:20	15.30 g	19.80 g	95.74 g	29.41%	0.2322 g	0.3371 g	31.12%	-0.80 MPa
18:20	15.30 g	19.40 g	87.23 g	26.80%	0.2323 g	0.2965 g	21.65%	-4.37 MPa
19:20	15.30 g	17.60 g	48.94 g	15.03%	0.2323 g	0.2645 g	12.17%	-23.91 MPa
20:20	15.30 g	16.56 g	26.81 g	8.24%	0.2321 g	0.2376 g	2.31%	-140.18 MPa
10:00	15.30 g	16.02 g	15.32 g	4.71%	0.2321 g	0.2329 g	0.34%	-199.64 MPa
12:00	15.30 g	15.30 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2323 g	0.09%	-209.07 MPa

ANEXO F – Resultados del método de Secado cámara térmica, succión a partir del papel filtro.

Resultado del método de secado cámara térmica, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestras geo-materiales intermedio roja y blanca.

Secado cámara térmica								
Peso del recipiente: 14.8g				Papel filtro peso inicial: 0.2321g				
Peso del recipiente sin tapa: 7.5g				Peso inicial muestra 100% saturada: 15g				
roja								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	11.64 g	15.00 g	100.00 g	28.89%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
30 min	11.64 g	14.80 g	94.05 g	27.17%	0.2321 g	0.2713 g	14.45%	-15.90 MPa
60 min	11.64 g	13.68 g	60.74 g	17.55%	0.2320 g	0.2448 g	5.23%	-83.12 MPa
90 min	11.64 g	13.48 g	54.79 g	15.83%	0.2317 g	0.2421 g	4.30%	-98.26 MPa
120 min	11.64 g	12.51 g	26.07 g	7.53%	0.2291 g	0.2340 g	2.09%	-145.84 MPa
150 min	11.64 g	11.64 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2322 g	0.04%	-210.69 MPa
blanca								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	12.19 g	15.00 g	100.00 g	23.10%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
30 min	12.19 g	14.30 g	75.13 g	17.36%	0.2321 g	0.2406 g	3.53%	-112.67 MPa
60 min	12.19 g	13.98 g	63.76 g	14.73%	0.2320 g	0.2395 g	3.13%	-121.07 MPa
90 min	12.19 g	13.47 g	45.53 g	10.52%	0.2322 g	0.2391 g	2.89%	-126.53 MPa
120 min	12.19 g	12.87 g	24.45 g	5.65%	0.2321 g	0.2370 g	2.07%	-146.53 MPa
150 min	12.19 g	12.19 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2353 g	1.36%	-166.36 MPa

Resultado del método de secado cámara térmica, resultados del papel filtro a los 7 días de ejecución y porcentaje de humedad a determinados tiempos de desarrollo del método. Muestras arenas Guamo y Ottawa.

Secado cámara térmica

Peso del recipiente: 14.8g

Papel filtro peso inicial: 0.2321g

Peso del recipiente sin tapa: 7.5g

Peso inicial muestra 100% saturada: 20g

Guamo								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	15.96 g	20.00 g	100.00 g	25.34%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
30 min	15.96 g	17.60 g	40.64 g	10.30%	0.2321 g	0.5586 g	58.45%	-0.04 MPa
60 min	15.96 g	19.68 g	92.04 g	23.32%	0.2320 g	0.5025 g	53.83%	-0.05 MPa
90 min	15.96 g	18.56 g	64.28 g	16.29%	0.2322 g	0.4128 g	43.75%	-0.08 MPa
120 min	15.96 g	16.35 g	9.69 g	2.46%	0.2321 g	0.2398 g	3.21%	-119.36 MPa
150 min	15.96 g	15.96 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2394 g	3.05%	-122.87 MPa

Ottawa								
Tiempo	Muestra				Papel Filtro			Succión
	Peso inicial	Peso final	Saturacion	Humedad	Peso inicial	Peso final	Humedad	
0 min	16.77 g	20.00 g	100.00 g	19.24%	0.2321 g	0.2321 g	0.00%	0.00 MPa
30 min	16.77 g	19.00 g	69.01 g	13.28%	0.2321 g	0.5038 g	53.93%	-0.05 MPa
60 min	16.77 g	18.20 g	44.22 g	8.51%	0.2320 g	0.4933 g	52.97%	-0.05 MPa
90 min	16.77 g	17.87 g	33.99 g	6.54%	0.2322 g	0.4388 g	47.08%	-0.06 MPa
120 min	16.77 g	17.58 g	25.09 g	4.83%	0.2321 g	0.2397 g	3.17%	-120.23 MPa
150 min	16.77 g	16.77 g	0.00 g	0.00%	0.2321 g	0.2324 g	0.13%	-207.46 MPa

**ANEXO G – Resultados del método de Secado ambiente, succión a partir del
WP4C.**

Resultados del método de secado ambiente, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para los geo-materiales intermedios, muestras roja y blanca.

SECADO AMBIENTE

Muestra Roja

		WP-4C			Peso recipnt:	1.6
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
0 Dias	punto 1	1.24	0	23.8	2	8.8
1 Dias	punto 2	-8.45	4.36	23.6	2	8.3
2 Dias	punto 3	-15.56	4.68	23.7	2	7.6
3 Dias.	punto 4	-34.64	5.55	23.6	2	7
4 Dias	punto 5	-50.25	5.72	23.7	2	6.7
5 Dias	punto 6	-66.81	5.84	22.7	2	6.6
9 Dias	punto 7	-61.26	5.8	23.7	2	6.5
11 Dias	punto 8	-64.73	5.83	23.8	2	6.53
13 Dias	punto 9	-69.15	5.85	23.3	2	6.53

Muestra Blanca

		WP-4C			Peso recipnt:	1.6
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
0 Dias	punto 1	0.67	0	24.5	2	10.1
1 Dias	punto 2	-1.23	4.2	24.5	2	9.4
2 Dias	punto 3	-13.68	5.04	24.5	2	8.6
3 Dias.	punto 4	-35.311	5.56	24	2	8.1
4 Dias	punto 5	-51.87	5.73	23.7	2	8
5 Dias	punto 6	-67.16	5.84	23.7	2	8
9 Dias	punto 7	-63.5	5.82	22	2	7.93
11 Dias	punto 8	-66.23	5.84	22.4	2	7.91
13 Dias	punto 9	-66.29	5.82	23.6	2	7.91

Resultados del método de secado ambiente, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para las arenas Guamo y Ottawa.

SECADO AMBIENTE

Arena Guamo

		WP-4C			Peso recipnt: 1.6	
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso g
0 Dias	punto 1	1.34	0	23.5	2.01	20.1
1 Dias	punto2	1.26	0	23.4	2	19.23
2 Dias	punto 3	1.18	0	23.4	2	18.45
3 Dias.	punto 4	1.08	0	23.4	2	17.3
4 Dias	punto 5	-20.45	5.33	23.5	2	15.8
5 Dias	punto 6	-74.42	5.89	23.6	2	15.8
9 Dias	punto 7	-67.52	5.84	23.4	2	15.7
11 Dias	punto 8	-67.06	5.84	23.6	2	15.76
13 Dias	punto 9	-72.76	5.88	23.6	2	15.76

Arena Ottawa

		WP-4C			Peso recipnt: 1.6	
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso g
0 Dias	punto 1	1.32	0	24.3	2	24.1
1 Dias	punto 2	0.87	0	24.3	2	23.45
2 Dias	punto 3	0.72	0	24.3	2	21.87
3 Dias.	punto 4	0.64	0	23.5	2	20.3
4 Dias	punto 5	-62.03	5.91	23.7	2	19.2
5 Dias	punto 6	-76.6	5.9	23.4	2	18.48
9 Dias	punto 7	-73.1	5.88	23.6	2	19.1
11 Dias	punto 8	-72.02	5.87	20.8	2	19.12
13 Dias		-73.88	5.88	23.8	2	19.13

ANEXO H – Resultados del método de Secado lámparas halógenas, succión a partir del WP4C.

Resultados del método de secado lámparas halógenas, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para los geomateriales intermedios, muestras roja y blanca.

SECADO LAMPARAS HALOGENAS

Muestra Roja

		WP-4C			Peso recipnt:	24.1
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
0 min	punto 1	1.24	0	23.8	2	7.2
10 min	punto 2	0.98	0	24	2	6.8
20 min	punto 3	-21.56	5.35	24	2.01	6.2
40 min	punto 4	-39.8	5.58	24	2	5.7
50 min	punto 5	-187.48	6.29	24.7	2	5.1
1:50 min	punto 6	-346.36	6.55	24.2	2	5
3:05 min	punto 7	-311.48	6.51	24.4	2	4.9

Muestra Blanca

		WP-4C			Peso recipnt:	24.6
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
0 min	punto 1	0.67	0	24.5	2	8.1
10 min	punto 2	-1.37	4.34	24.5	2	7.8
20 min	punto 3	-2.13	4.34	23.9	2.01	7.5
40 min	punto 4	-6.03	4.93	24.2	2	6.9
50 min	punto 5	-105	6.04	24.8	2	6.5
1:50 min	punto 6	-285.02	6.47	24.1	2	6.3
3:05 min	punto 7	-228.51	6.37	24.1	2	6.3

Resultados del método de secado lámparas halógenas, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para las arenas Guamo y Ottawa.

SECADO LAMPARAS HALOGENAS

Arena Guamo

		WP-4C			Peso recipnt: 13.7	
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso g
0 min	punto 1	1.34	0	23.5	2.01	20
10 min	punto 2	1.26	0	23.5	2	19.8
20 min	punto 3	0.98	0	23.4	2	19.4
40 min	punto 4	0.57	0	23.4	2	19.1
50 min	punto 5	0.46	0	23.4	2	18.5
1:50 min	punto 6	-49.27	5.71	23.6	2	15.8
3:05 min	punto 7	-115.39	6.08	23.8	2	15.8

Arena Ottawa

		WP-4C			Peso recipnt: 13.7	
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso g
0 min	punto 1	1.32	0	24.3	2	19.5
10 min	punto 2	1.28	0	24.3	2	18.76
20 min	punto 3	0.01	0	23.6	2	18.1
40 min	punto 4	0.37	0	23.2	2	17.64
50 min	punto 5	0.46	0	23.5	2	17.3
1:50 min	punto 6	-44.93	5.67	23.6	2	15.6
3:05 min	punto 7	-95.54	6	23.7	2	15.6

ANEXO I – Resultados del método de Secado horno microondas, succión a partir del WP4C.

Resultados del método de secado horno microondas, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para los geomateriales intermedios, muestras roja y blanca.

SECADO HORNO MICROONDAS

Muestra Roja

		WP-4C			Peso recipnt:	24.1
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
0 min	punto 1	1.24	0	23.8	2	9.2
2 min	punto 2	0.08	0	24.4	2	8.7
4 min	punto 3	-0.63	3.82	23.9	2	8.3
6 min	punto 4	-4.38	4.66	25.5	2	8.2
10 min	punto 5	-11.96	5.09	25.7	2	7.8
15 min	punto 6	-24.48	5.04	23.2	2	7.3
20 min	punto 7	-73.31	5.88	23.1	2	6.8
25 min	punto 8	-94.78	5.99	24.3	2	6.6

Muestra Blanca

		WP-4C			Peso recipnt:	13.8
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
0 min	punto 1	0.67	0	24.5	2	9.4
2 min	punto 2	-0.8	3.92	24.9	2	9.2
4 min	punto 3	-2.71	4.45	24.8	2	8.9
6 min	punto 4	-4.92	4.71	24.6	2	8.7
10 min	punto 5	-26.07	5.43	24.5	2	8.4
15 min	punto 6	-78.36	5.91	24.2	2	8
20 min	punto 7	-82.65	5.93	23.7	2	7.8
25 min	punto 8	-129.56	6.13	24.5	2	7.8

Resultados del método de secado horno microondas, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para las arenas Guamo y Ottawa.

SECADO HORNO MICROONDAS

Arena Guamo

		WP-4C			Peso recipnt:		24.6
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra	
0 min	punto 1	1.34	0	23.5	2.01	18.5	
2 min	punto 2	-0.55	3.75	24.9	2	16.3	
4 min	punto 3	-0.37	3.58	24.3	2	15.9	
6 min	punto 4	-2.26	4.37	25.3	2	15.8	
8 min	punto 5	-0.95	3.99	24.8	2	15.3	
10 min	punto 6	-0.94	3.99	23.5	2	14.8	
15 min	punto 7	-82.38	5.93	23.8	2	14	
20 min	punto 8	-129.9	6.13	24.5	2	13.8	

Arena Ottawa

		WP-4C			Peso recipnt:		13.7
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra	
0 min	punto 1	1.32	0	24.3	2	17.4	
2 min	punto 2	-0.01	2.12	24.8	2	16.2	
4 min	punto 3	-0.27	3.45	24.4	2	15.8	
6 min	punto 4	-1.38	4.15	25.1	2	15.5	
10 min	punto 5	-0.03	2.46	23.7	2	15	
15 min	punto 6	-0.48	3.7	23.3	2	14.6	
20 min	punto 7	-90.63	5.97	23.9	2	13.9	
22 min	punto 8	-116.75	6.08	24.3	2	13.9	

ANEXO J – Resultados del método de Secado horno convencional, succión a partir del WP4C.

Resultados del método de secado horno convencional, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para los geo materiales intermedios, muestras roja y blanca.

SECADO HORNO CONVENCIONAL						
Muestra Roja						
		WP-4C			Peso recipnt:	24.2
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
17:20	punto 1	1.24	0	23.8	2	9.7
18:20	punto 2	-10.16	5.02	23.3	2	8.3
19:20	punto 3	-15.68	5.34	24	2	7.9
20:20	punto 4	-72.12	5.88	23.7	2	7.41
10:00	punto 5	-326.37	6.56	24.6	2	6.76
12:00	punto 6	-326.37	6.56	24.6	2	6.78
17:20	punto 7	-249.96	6.41	24.1	2	6.85
Muestra Blanca						
		WP-4C			Peso recipnt:	13.9
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
17:20	punto 1	0.67	0	24.5	2	11.7
18:20	punto 2	-36.85	5.58	23	2	10.63
19:20	punto 3	-49.68	5.98	23.8	2	9.89
20:20	punto 4	-159.13	6.22	24.5	2	9.54
10:00	punto 5	-249.19	6.41	24.2	2	9.31
12:00	punto 6	-249.19	6.41	24.2	2	9.31
17:20	punto 7	-240.75	6.4	24.28	2	9.3

Resultados del método de secado horno convencional, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para las arenas Guamo y Ottawa.

SECADO HORNO CONVENCIONAL

Arena Guamo

		WP-4C			Peso recipnt:	24
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
17:20	punto 1	1.34	0	23.5	2.01	18.6
18:20	punto 2	-0.41	0	23.6	2	16.46
19:20	punto 3	-13.65	5.64	23.6	2	15.76
20:20	punto 4	-102.19	6.02	23.9	2	14.9
10:00	punto 5	-100.49	6.02	24.1	2	14.82
12:00	punto 6	-100.49	6.02	24.1	2	14.8
17:20	punto 7	-136.34	6.15	24	2	14.79

Arena Ottawa

		WP-4C			Peso recipnt:	24
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
17:20	punto 1	1.32	0	24.3	2	18.4
18:20	punto 2	0.98	0	23.4	2	17.35
19:20	punto 3	0.67	0	23.5	2	16.35
20:20	punto 4	-22.85	5.37	23.9	2	14.9
10:00	punto 5	-88.25	5.96	24.4	2	14.82
12:00	punto 6	-88.25	5.96	24.4	2	14.8
17:20	punto 7	-103.47	6.03	23.9	2	14.2

ANEXO K – Resultados del método de Secado cámara térmica, succión a partir del WP4C.

Resultados del método de secado cámara térmica, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para los geomateriales intermedios, muestras roja y blanca

SECADO CAMARA TERMICA

Muestra Roja

		WP-4C			Peso recipnt:	24.1
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
17:00	punto 1	1.24	0	23.8	2	10.2
18:00	punto 2	0.92	0	23.8	2	9.16
19:00	punto 3	-9.17	4.98	23.8	2	8.66
20:20	punto 4	-40.74	5.63	23.5	2	8.1
10:00	punto 5	-180.96	6.27	24.3	2	7.28
12:00	punto 6	-180.96	6.27	24.3	2	7.2
17:20	punto 7	-218.57	6.37	24.1	2	7.2

Muestra Blanca

		WP-4C			Peso recipnt:	13.7
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
17:00	punto 1	0.67	0	24.5	2	11.9
18:00	punto 2	-1.38	0	24.3	2	11.13
19:00	punto 3	-50.64	5.72	23.6	2	10.61
20:20	punto 4	-156.52	6.21	34.6	2	9.72
10:00	punto 5	-186.35	6.29	24.4	2	9.61
12:00	punto 6	-186.35	6.29	24.4	2	9.6
17:20	punto 7	-226.33	6.37	24.1	2	9.6

Resultados del método de secado cámara térmica, succión a partir del WP4C, resultados de potencial mátrico en unidades de mega pascales y pF para las arenas Guamo y Ottawa.

SECADO CAMARA TERMICA

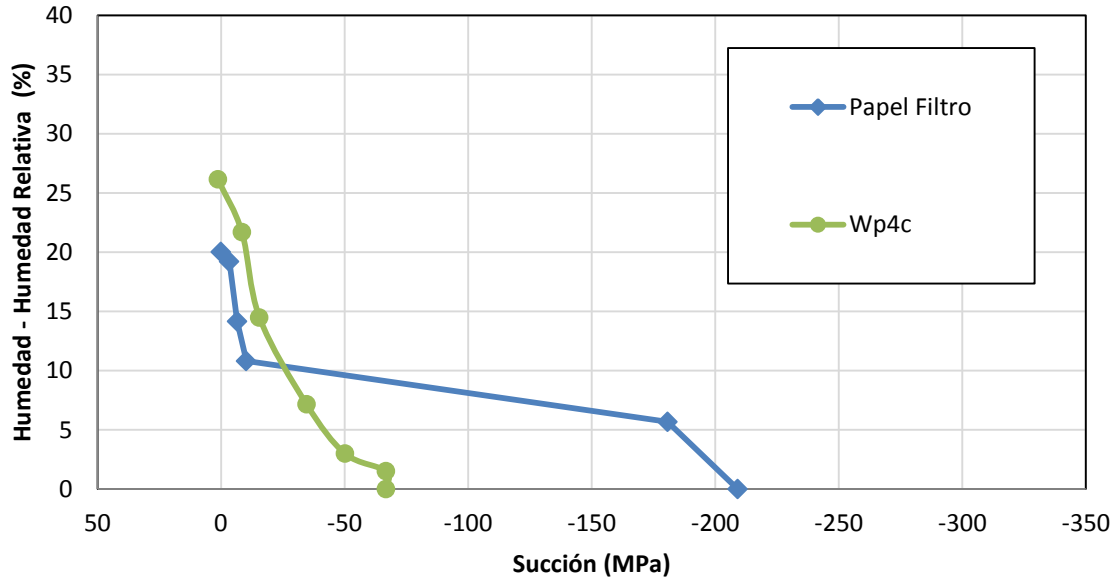
Arena Guamo

		WP-4C			Peso recipnt:	25.51
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
17:00	punto 1	1.34	0	23.5	2.01	18.9
18:00	punto 2	0.98	0	23.5	2	17.65
19:00	punto 3	0.27	0	24.6	2	15.29
20:20	punto 4	-89.72	5.97	24.1	2	14.39
10:00	punto 5	-90.02	5.94	24.6	2	12.67
12:00	punto 6	-90.02	5.94	24.6	2	12.6
17:20	punto 7	-117.2	6.08	23.8	2	12.19

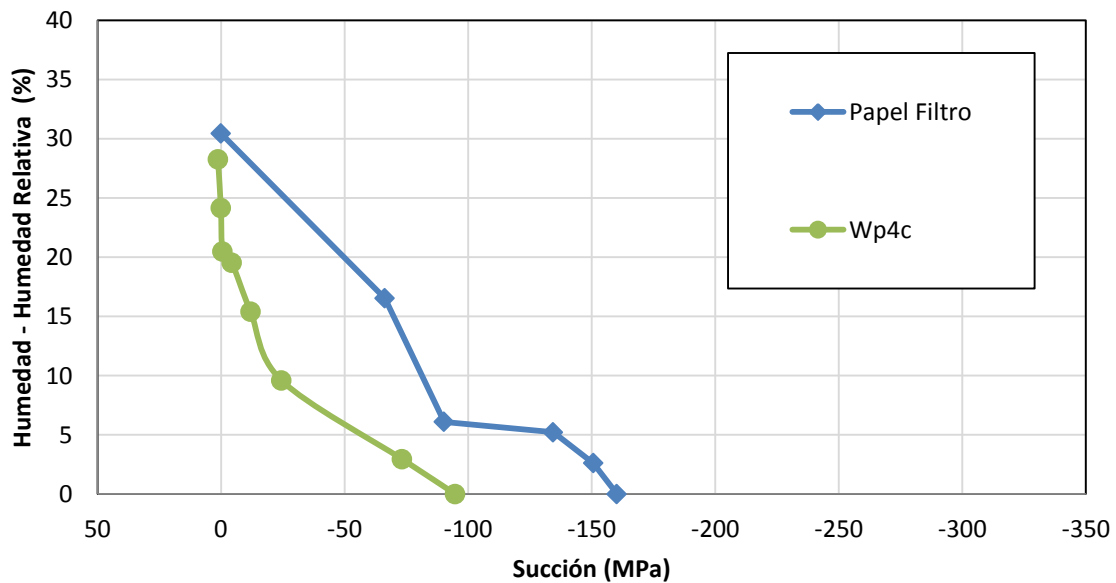
Arena Ottawa

		WP-4C			Peso recipnt:	24.6
		Mp	Pf	temperatura	ts-tb	peso muestra
17:00	punto 1	1.32	0	24.3	2	18.9
18:00	punto 2	0.24	0	24.3	2	17.65
19:00	punto 3	0.3	0	23.9	2	16.6
20:20	punto 4	0.68	0	23.6	2	14.92
10:00	punto 5	-94.11	5.99	24.1	2	14.8
12:00	punto 6	-94.11	6	24.1	2	14.66
17:20	punto 7	-110.05	6.06	24.1	2	13.2

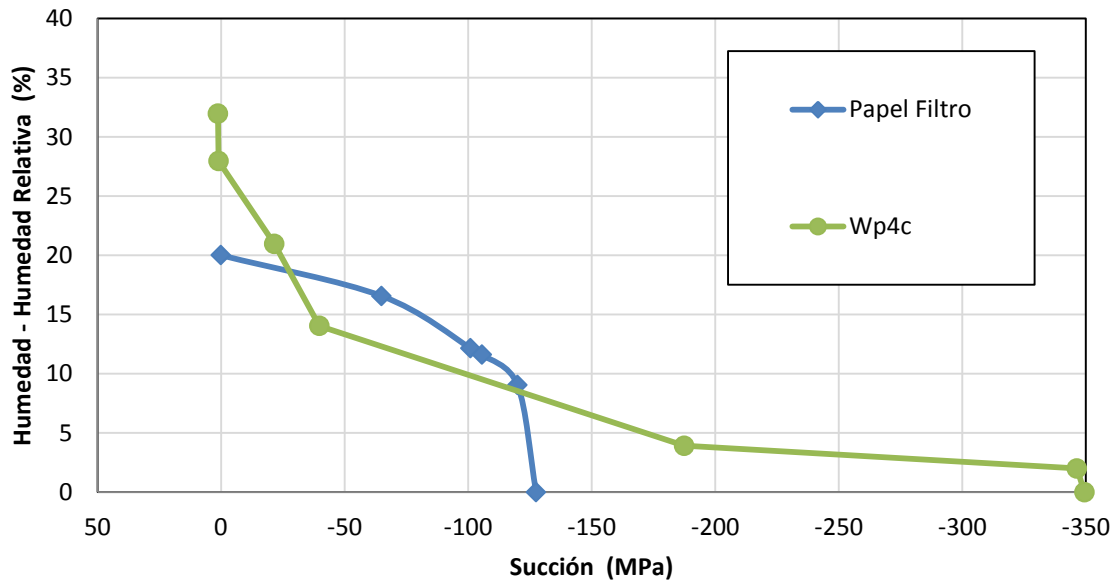
ANEXO L – Muestra roja, Gráficas curva característica de humedad.



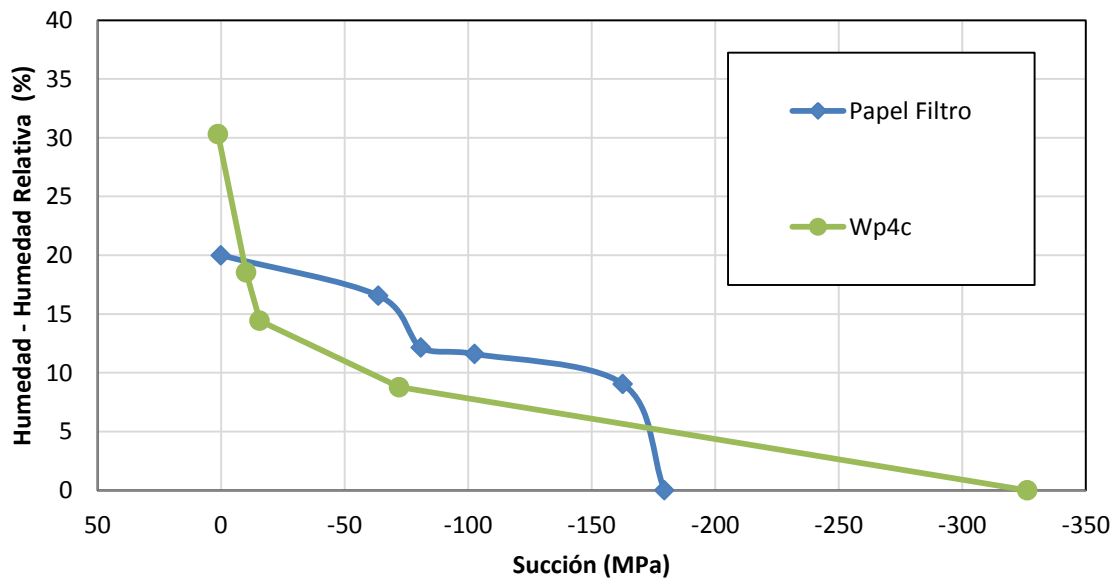
Grafica 19. Secado Ambiente en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



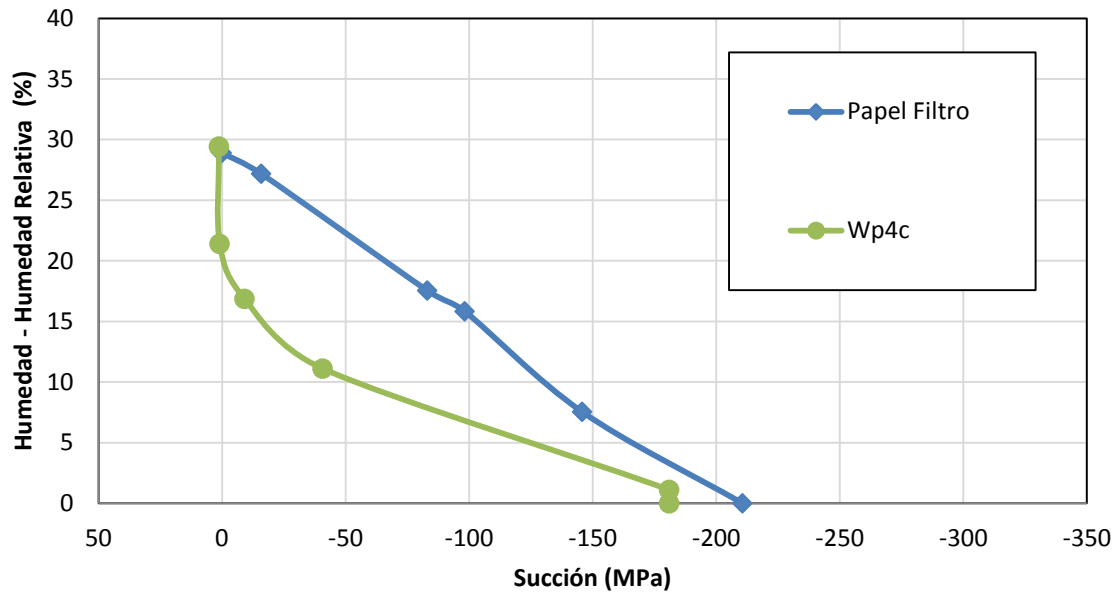
Grafica 20. Secado Horno Microondas en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



Grafica 21. Secado Lámparas Halógenas en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

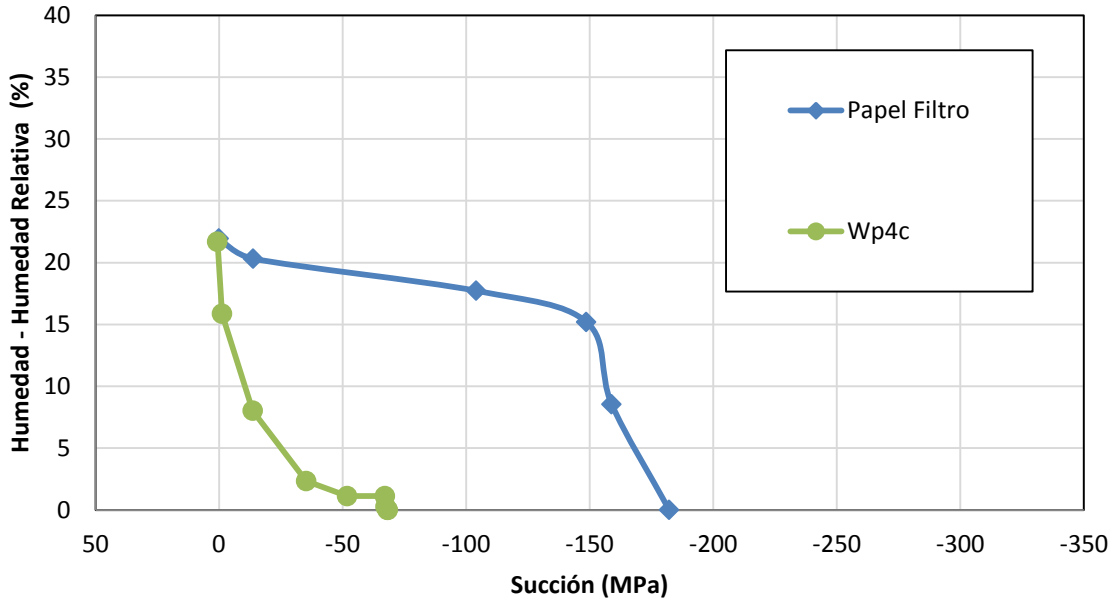


Grafica 22. Secado Horno convencional en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

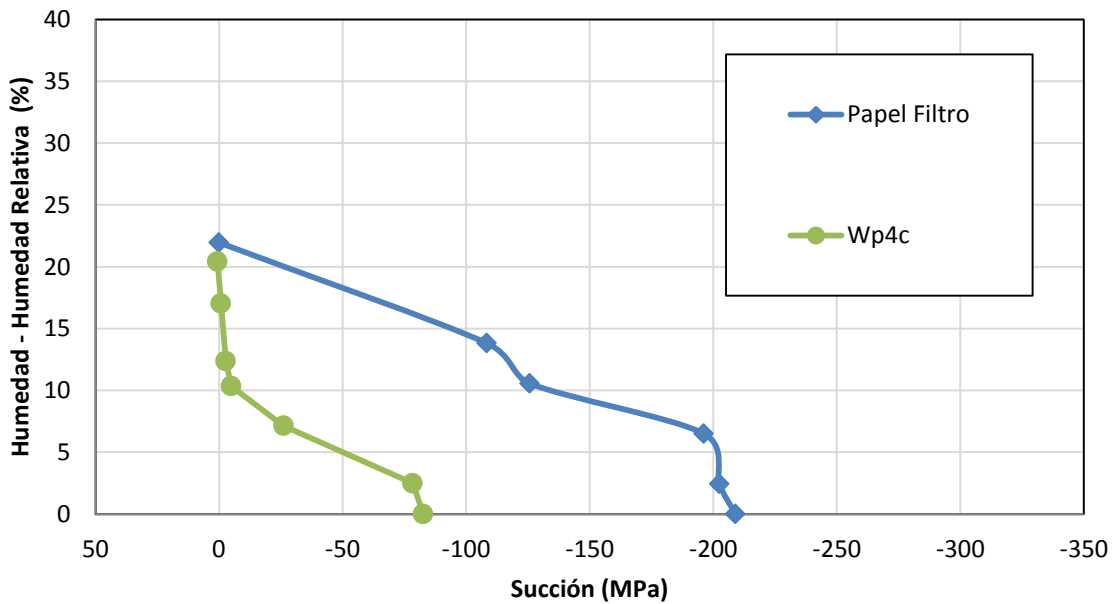


Grafica 23. Secado Cámara Térmica en la muestra roja, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

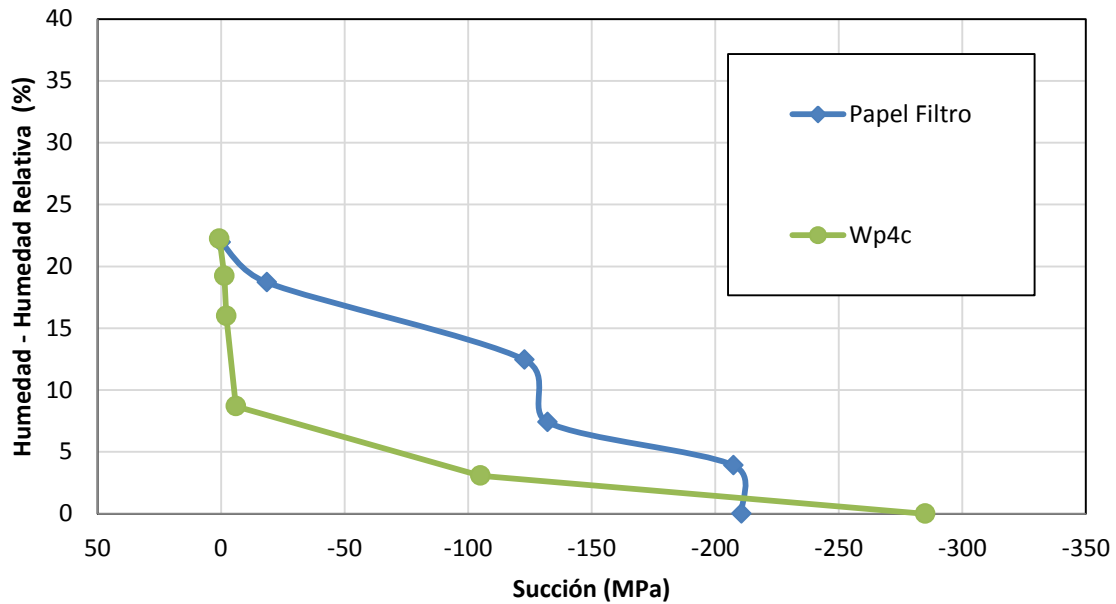
ANEXO M – Muestra blanca, Graficas curva característica de humedad.



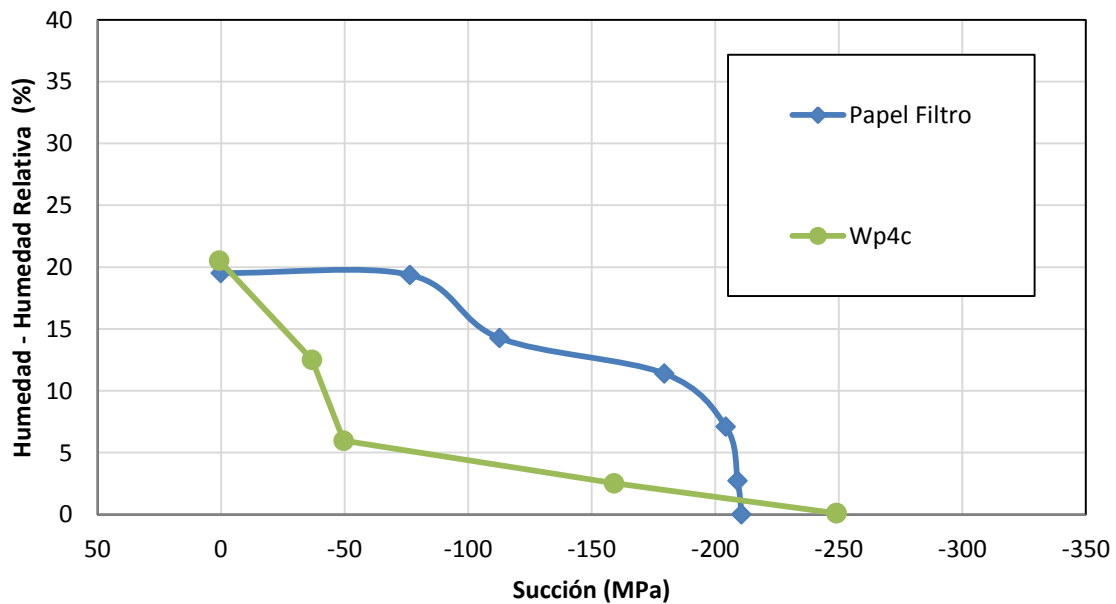
Grafica 24. Secado Ambiente en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



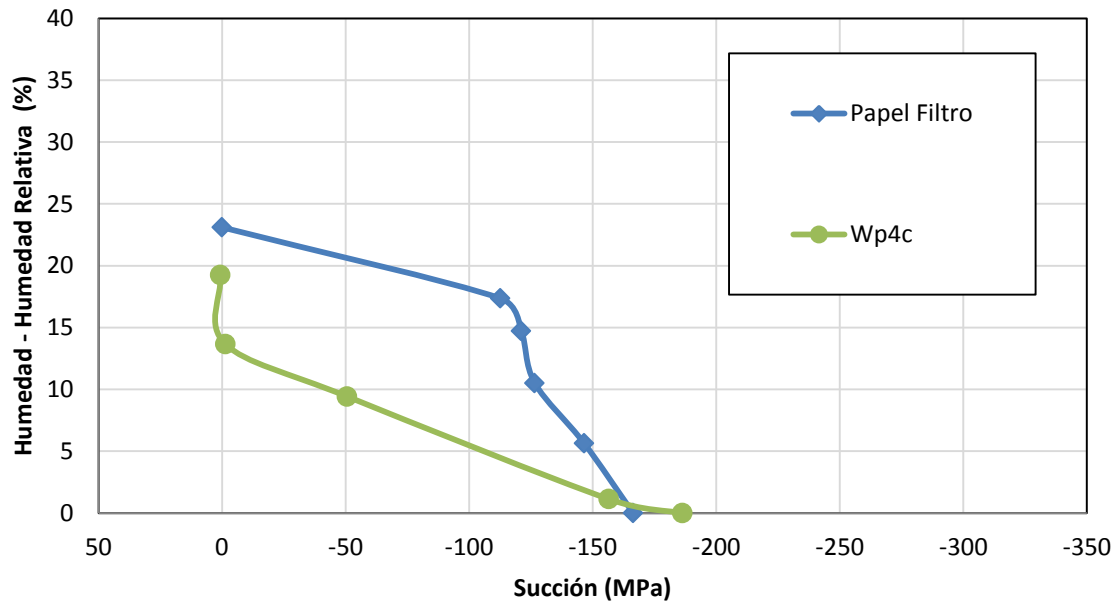
Grafica 25. Secado Horno Microondas en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



Gráfica 26. Secado Lámparas Halógenas en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

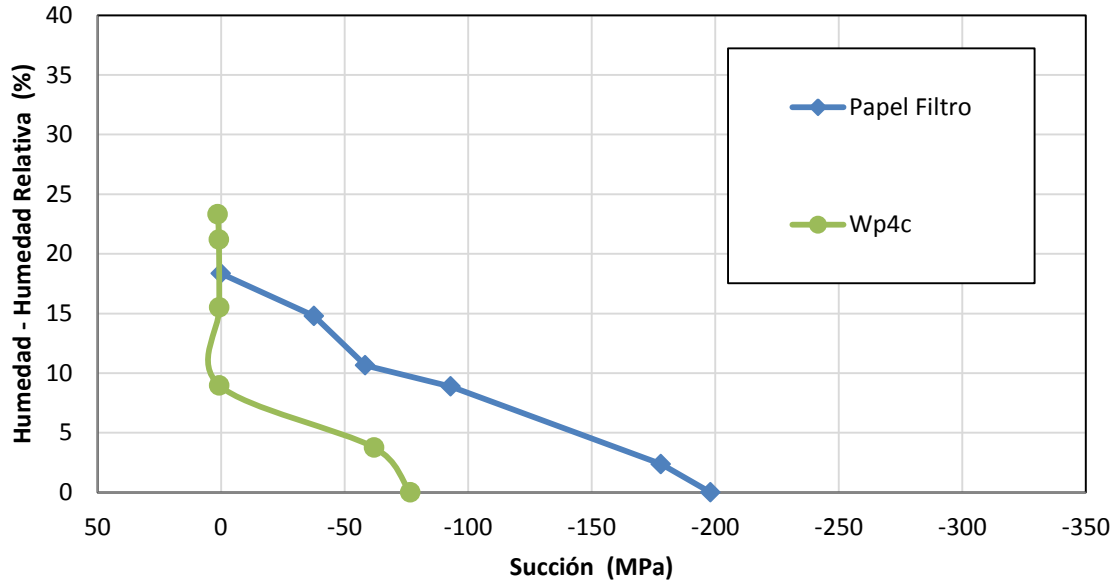


Gráfica 27. Secado Horno convencional en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

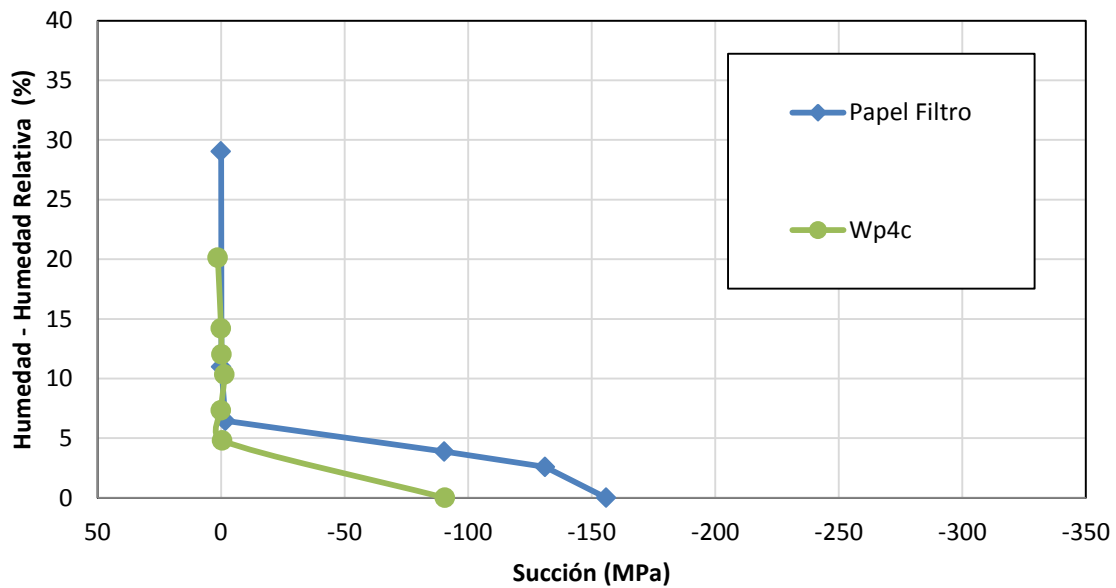


Grafica 28. Secado Cámara Térmica en la muestra blanca, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

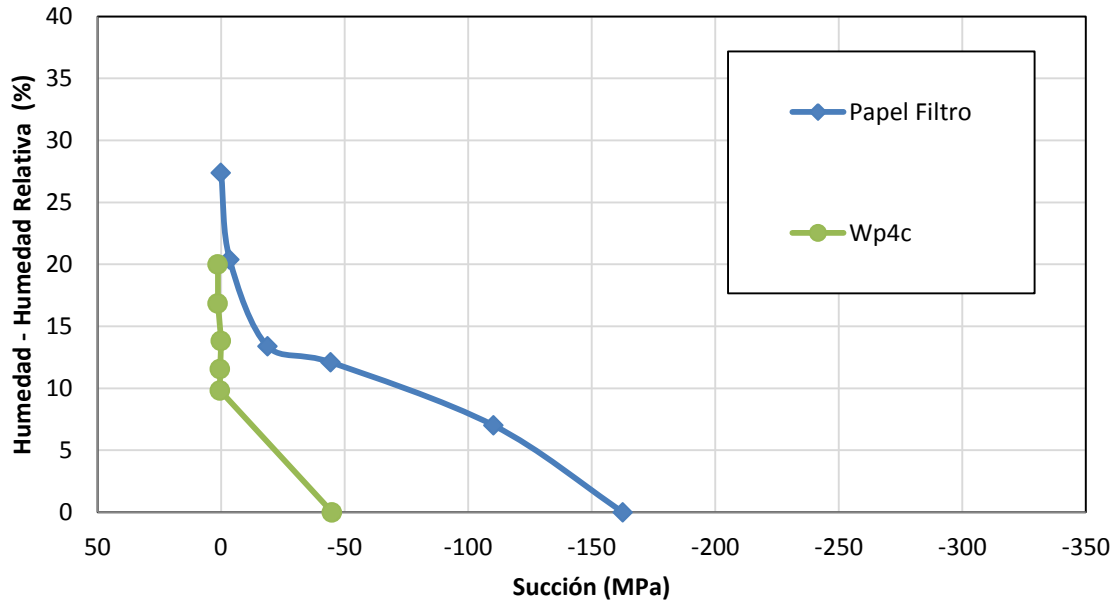
ANEXO N – Arena de Ottawa, Graficas curva característica de humedad.



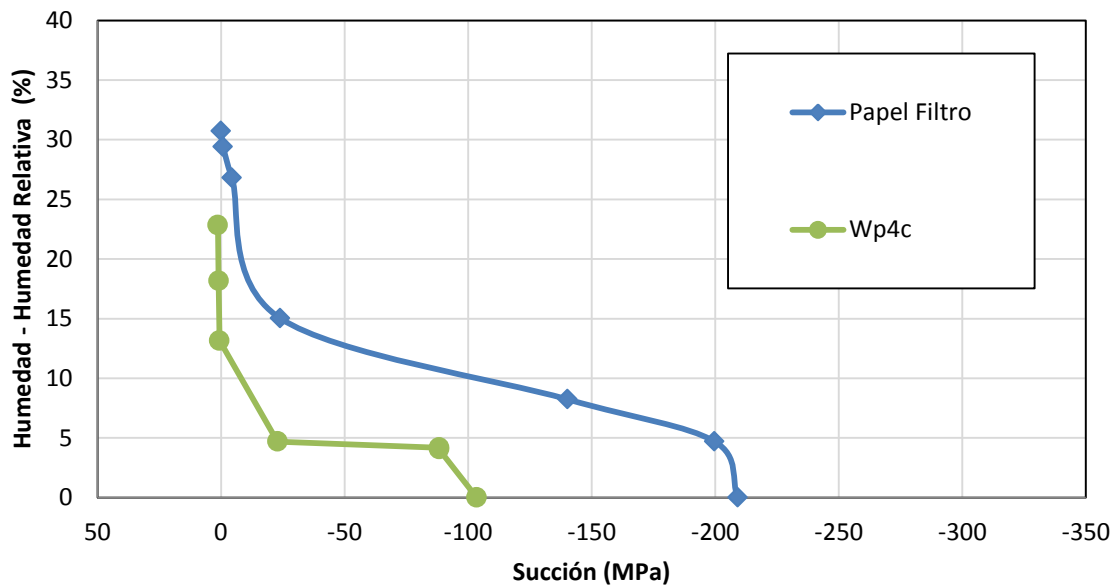
Grafica 29. Secado Ambiente en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



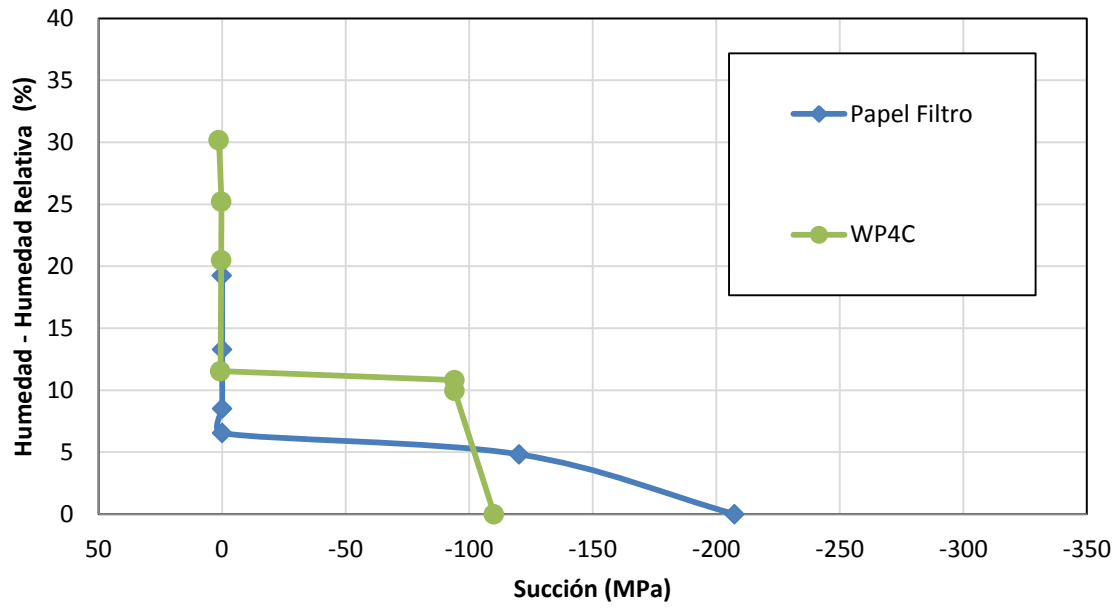
Grafica 30. Secado Horno Microondas en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



Grafica 31. Secado Lámparas Halógenas en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

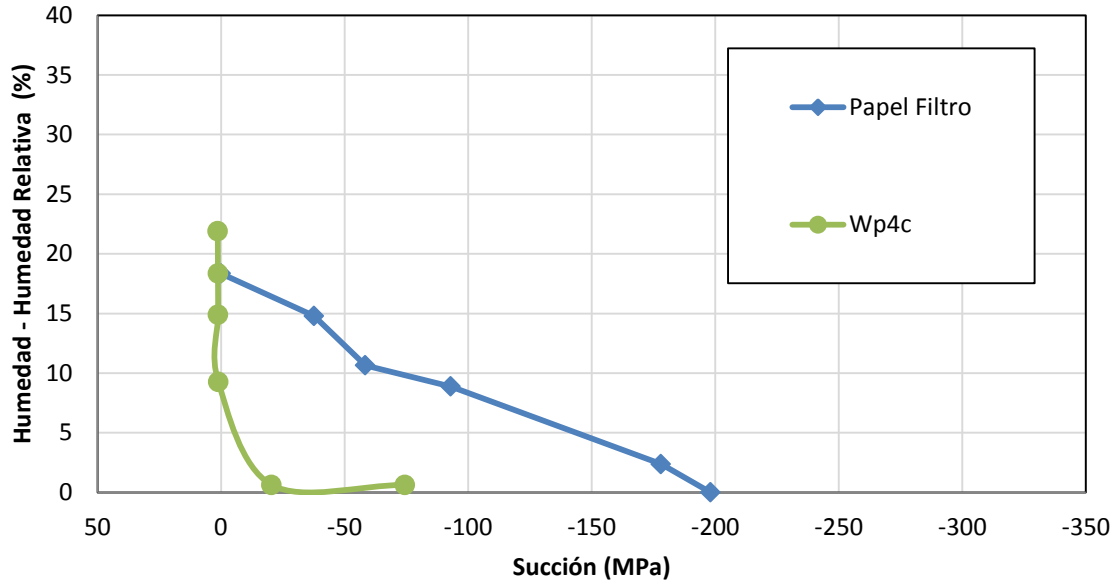


Grafica 32. Secado Horno convencional en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

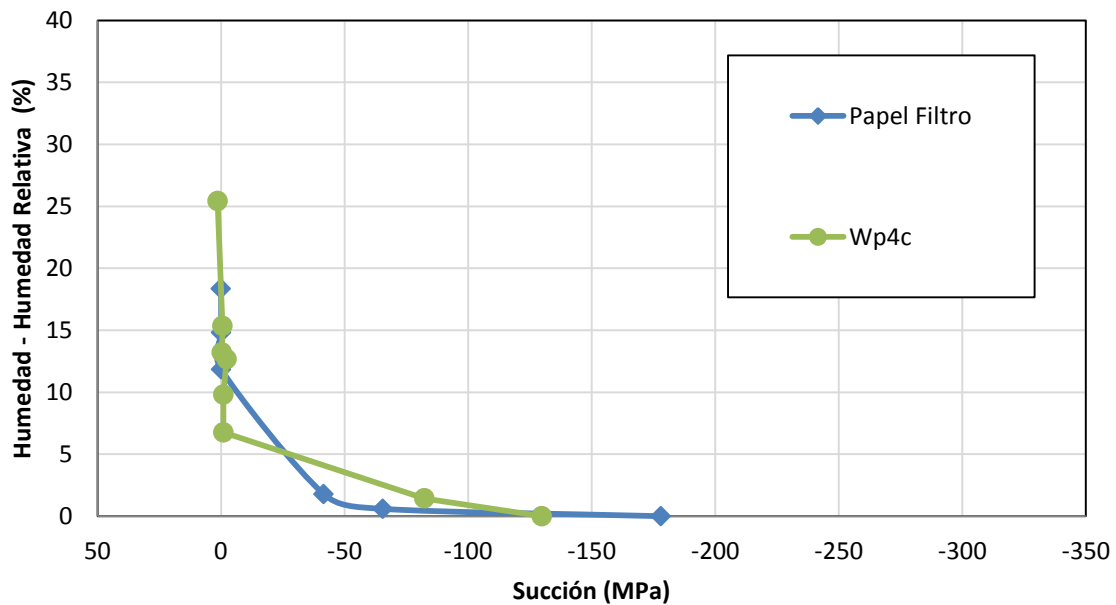


Grafica 33. Secado Cámara Térmica en la arena de Ottawa, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C

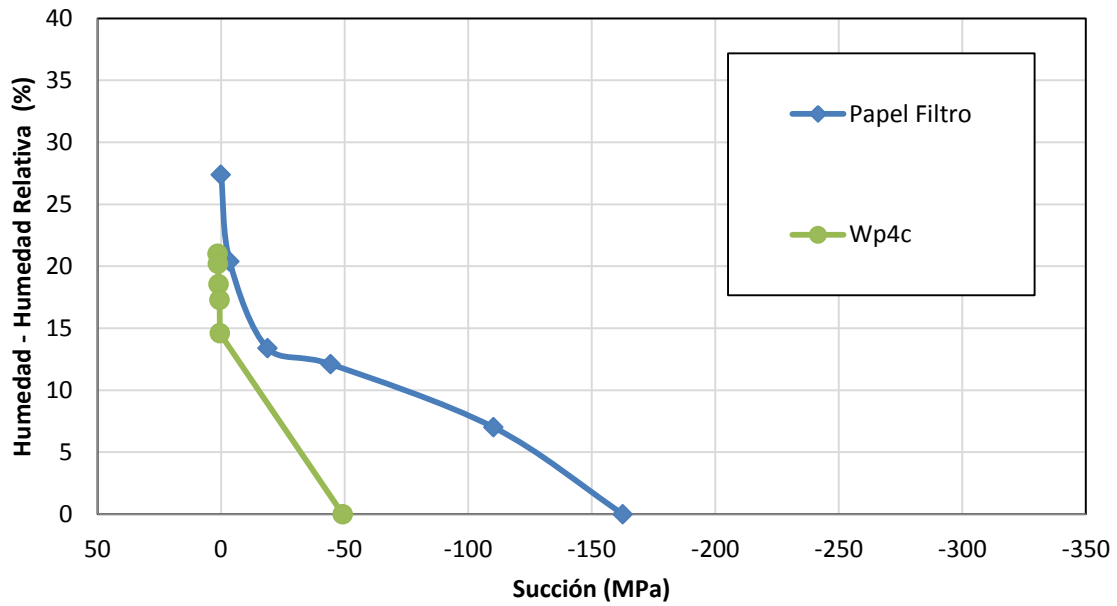
ANEXO O – Arena de Guamo, Graficas curva característica de humedad.



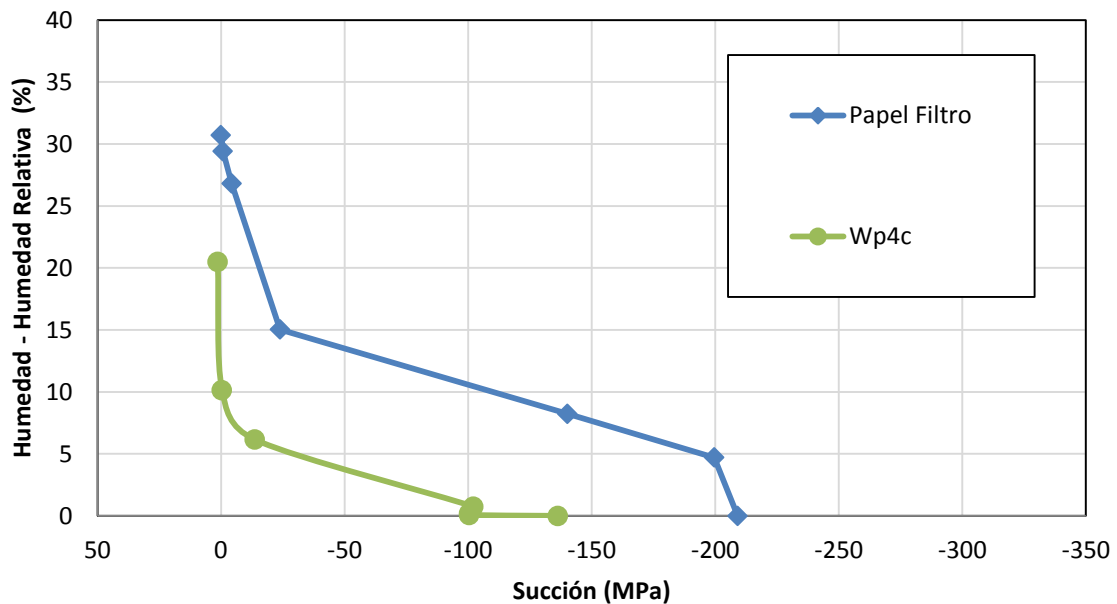
Grafica 34. Secado Ambiente en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



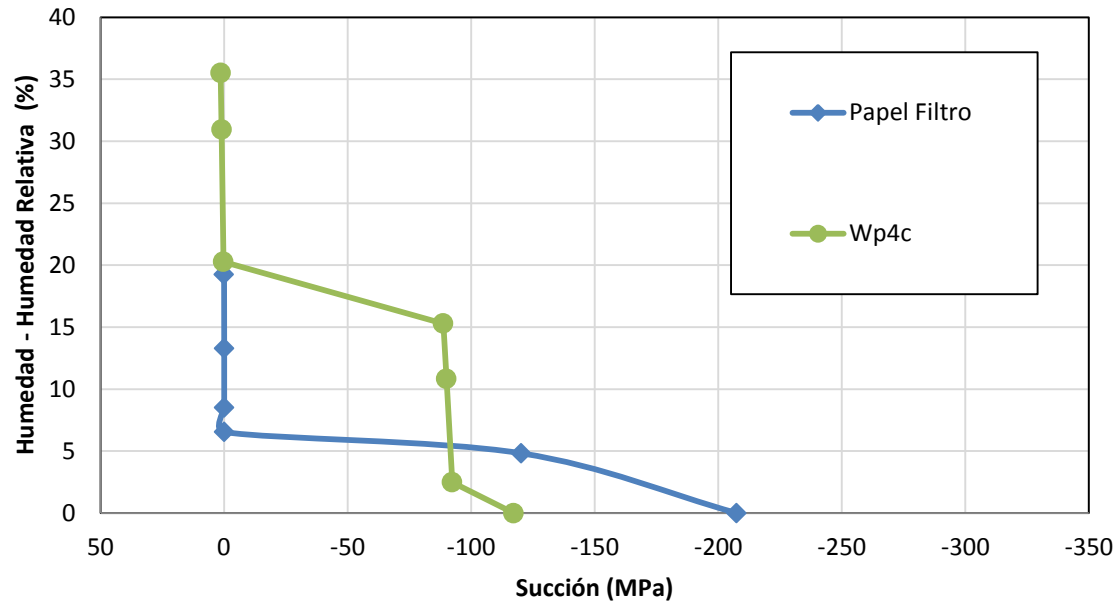
Grafica 35. Secado Horno Microondas en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



Gráfica 36. Secado Lámparas Halógenas en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



Gráfica 37. Secado Horno convencional en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C



Grafica 38. Secado Cámara Térmica en la arena de Guamo, a partir de los dos métodos de succión ejecutados, papel filtro y WP4C