DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN MUESTRAS DE SUELO, ROCA MEDIANTE AIR FRYER (FREIDORA DE AIRE)



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

PRESENTADO POR:

SERGIO ESTEBAN USME ZARATE - 20211379034

DARYAN NATALIA MEJIA SUAREZ -20211379123

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

FACULTAD TECNOLOGICA

TECNOLOGIA EN CONSTRUCCIONES CIVILES

BOGOTA D.C

2024

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma docente tutor:

Harol León Zambrano Urbano

ÍNDICE

INRODUCCIÓN 5

JUSTIFICACIÓN 6

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 7

PREGUNTA PROBLEMA 8

ANTECEDENTES 9

OBJETIVOS 15

MARCO TÉORICO 16

MARCO NORMATIVO 26

METODOLOGÍA 30

DISCUSIÓN DE RESULTADOS 44

CONCLUSIONES 53

RECOMENDACIONES 54

BIBLIOGRAFÍA 55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Cuadro normativas / Fuente: Propia 26
Tabla 2. Densidad y absorción / Fuente: Propia 32
Tabla 3. Equivalente de arenas de suelos y agregados finos / Fuente: Propia 32
Tabla 4.Requisitos sobre la masa mínima de los especímenes de ensayo y la lectura de las balanzas /Fuente: INV E-122-13 33
Tabla 5. Error semana 1 /Fuente: Propia 37
Tabla 6. Error semana 2 / Fuente: Propia 38
Tabla 7. Resultados semana 2 / Fuente Propia 38
Tabla 8. Semana / Fuente: Propia 40
Tabla 9. Margen de error semana 3 / Fuente: Propia 44

ÍNDICE DE FIGURAS

Gráfico 1.Caracterizacion física de agregados / Fuente: CEMEX 31
Gráfico 2. Semana 1 / Fuente: Propia 37
Gráfico 3. Semana 2 P4-P3 / Fuente: Propia 39
Gráfico 4. Semana 2 P1-P2 /Fuente: Propia 39
Gráfico 5. Semana 3 / Fuente: Propia 40
Gráfico 6. Semana 4 /Fuente: Propia 41
Gráfico 7. Semana 5 / Fuente: Propia 42

Ilustración 1.Fases del proyecto / Fuente: Propia 30
Ilustración 2. Material testigo / Fuente: Propia 31
Ilustración 3. / Fuente: Propia 34
Ilustración 4. Horno y muestras proceso de secado /Fuente: Propia 34
Ilustración 5. Freidora de aire ccon muestra / Fuente: Propia 35

Diagrama 1. Trabajo de laboratorio /Fuente: Propia 33

INRODUCCIÓN

La ingeniería civil comprende realizar una gran diversidad de ensayos de campo y laboratorio valiosos para la ejecución de obras civiles. En la ejecución de pruebas para proyectos de ingeniería, la selección y realización de los ensayos depende del tipo de proyecto en cuestión. Sin embargo, existe un requisito común a casi todos los proyectos: la determinación de la humedad del suelo. Este ensayo es clave, ya que la humedad es una propiedad física y química que refleja la capacidad del suelo para retener agua.

La determinación de la humedad es fundamental tanto para suelos como para agregados, ya que los valores obtenidos permiten proyectar mejoras en el terreno, establecer dosificaciones precisas para agregados en la fabricación de concretos y realizar otras actividades esenciales en la ingeniería. Por esta razón, este ensayo se considera indispensable en diversos contextos y aplicaciones.

La adquisición de estos datos es un proceso que implica tiempo y costos por lo cual se pretende mejorar con el avance de la tecnología surgiendo así la oportunidad de crear procesos inexistentes con equipos relativamente nuevos que tienen capacidad de generar calor y poseen dispositivos de recirculación de aire y regulación de temperatura como lo es la freidora de aire combinando procesos ya existentes y estandarizados.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de esta investigación es relevante porque busca mejorar la eficacia de procesos ya estandarizados mediante la incorporación de equipos tecnológicos emergentes, promoviendo su adopción como parte de una evolución natural en la ejecución de tareas en ingeniería. Esta iniciativa pretende simplificar y optimizar procesos, desde los más sencillos hasta los más complejos, aportando innovación al sector.

El principal resultado esperado de este trabajo es la obtención de datos confiables y rápidos sobre el contenido de humedad del suelo, utilizando la freidora de aire como equipo principal. Además, se busca establecer un procedimiento que permita reducir tanto los costos como los tiempos asociados en obra, contribuyendo así a una mayor eficiencia y competitividad en proyectos de ingeniería.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La gestión eficiente del tiempo y el rendimiento es crucial para llevar a cabo tareas claves en campo y laboratorio como la determinación del contenido de humedad de un suelo, ya que esta información es fundamental para la toma de decisiones en proyectos de obras civiles.

El método en la INV E-122-13 describe el proceso en laboratorio para la determinación del contenido de agua que posee un suelo, sin embargo, este es exigente en cuanto a tiempo ya que consta con tiempos de secado entre 8 a 24 horas generando una espera para la obtención de datos que se reflejan en el avance y costo de una obra en proceso. Por otro lado, se tiene otra norma de ensayo, la INV E-135-13 que describe el procedimiento para la obtención de los mismos datos con un horno microondas secándolos en incrementos de tiempo más cortos, no obstante, se tiene una menor precisión en cuanto a los datos obtenidos.

Esto abre una ventana de mejora para la implementación de un nuevo método igual de efectivo a lo estándar en la INV E-122-13 con un horno convencional y la rapidez de la INV E-135-13 con un horno microondas, por lo cual se pretende usar las innovaciones tecnológicas de hoy en día como lo es la freidora de aire para evaluar su viabilidad en el campo y obtención de datos precisos.

PREGUNTA PROBLEMA

¿Es posible utilizar una freidora de aire como método alternativo para la determinación del contenido de humedad en suelos, que combine la rapidez del horno microondas con la precisión del horno convencional, sin comprometer la calidad de los resultados obtenidos en comparación con las normativas INV E-122-13 e INV E-135-13?

ANTECEDENTES

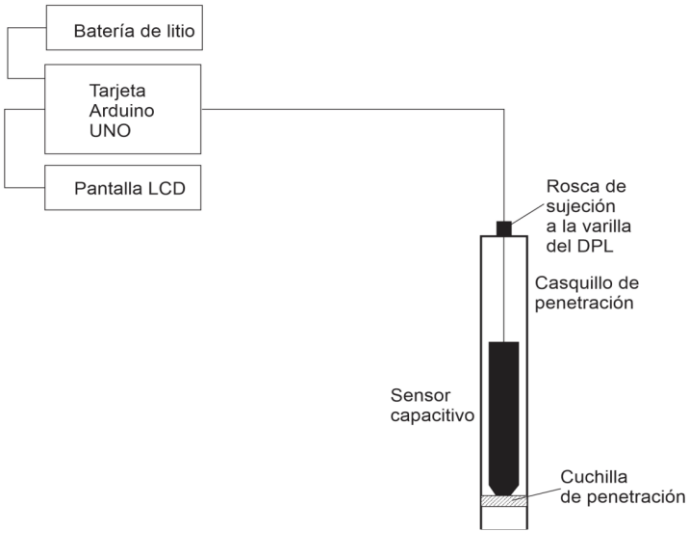
La implementación de nuevos métodos para la obtención de datos indispensables como lo es el contenido de humedad en el suelo o de un agregado destinado para un diseño de concreto, pavimentos entre otros usos; Surge de dos tipos de métodos predecesores: directos e indirectos.

Como base de este proyecto se usa el método termogravimétrico, el cual es conocido como un método tradicional y el punto de comparación de los distintos métodos ya existentes y que se desarrollan y evolucionan a través del tiempo.

Al momento de investigar métodos para medición del contenido de agua en los suelos se encontró un proyecto de grado de Vladymir Efrain Madera (2024) donde expone que a través de los sensores capacitivos de humedad pueden llegar a ser herramientas útiles a la hora de obtener datos en tiempo real, estos generalmente son usados en invernaderos para controlar los tiempos de riego a través de las lecturas de humedad, esto se genera a partir de ondas enviadas a través del suelo tomando lecturas cada 10 centímetros creando así un perfil de humedades del suelo; sin embargo esto requiere un mantenimiento y una instalación adecuada para que los resultados sean lo más acertados.

Este método alternativo es significativo a la hora de compararlo con el método gravimétrico, puesto que este lo genera en tiempos reales sin comprometer la integridad del suelo y poder realizar un seguimiento continuo de la cantidad de agua que este contiene. Se destaca por su bajo costo y bajo consumo de energía; sin embargo, se resaltan las limitaciones, como lo es la sensibilidad al tipo de suelo, salinidad y temperatura.

El dispositivo usado para este procedimiento es una sonda de 15 cm de longitud fabricada de un tubo de acero, la cual en su interior contiene un sensor capacitivo y en su inferior una cuchilla de penetración, esto conectado con una tarjeta Arduino y a su vez una batería de litio y una pantalla LCD.



Sensor capacitivo. (Rayon Encinas E, 2020)

Este dispositivo mide la permisividad del suelo la cual esta ligada con el contenido de humedad que posee el suelo. Esto opera bajo un termino conocido como efecto Seebeck el cual explica que si un conductor metálico posee mas temperatura en un extremo, genera una diferencia del potencial eléctrico. (Rayón Encinas, E, 2020).

Para la implementación de un método alternativo se debe tener de base los métodos ya existentes y respaldado por las áreas donde se desarrollará su uso frecuente, entre estos tenemos en su mayoría los llamados métodos indirectos como lo son la reflectometría de dominio del tiempo, tensiómetria, radar entre otros.

El articulo publicado por Sri Lanka journal if applied Sciences (2023) realiza una comparación de métodos de estimación de contenido de agua en el suelo:

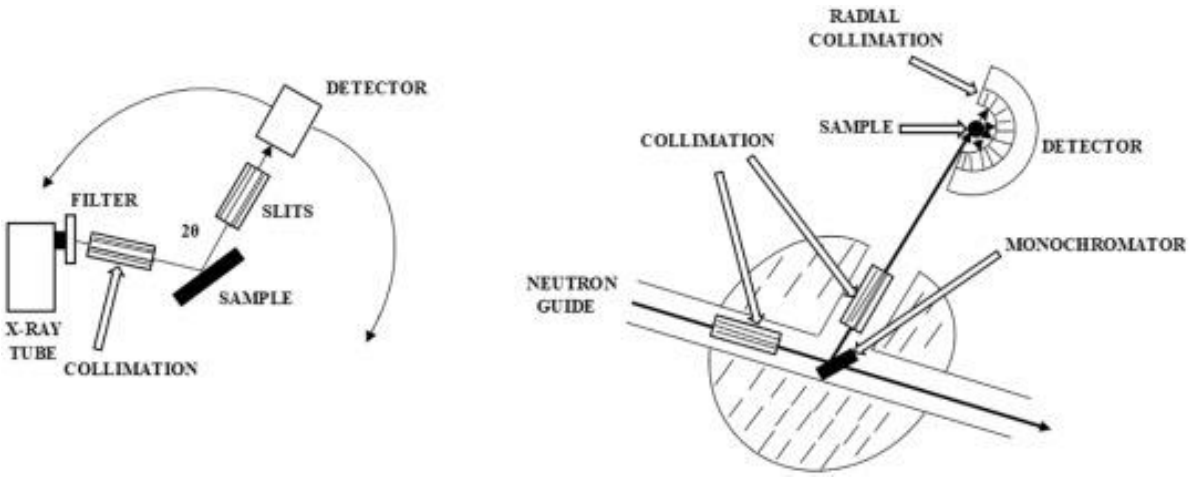
Iniciando por la tensiómetro, lo cual ha señalado que los tensiómetros de alta capacidad son los único en generar un dato de medicion directa; esto funciona por medio de una succión que es ejercida por el agua presente en el suelo por medio de la cerámica del tensiómetro, esto se ve reflejado en un vacuómetro registrando la succión presente, a la hora de analizar los datos se tiene que , entre mas alta la lectura significa que el suelo esta seco por lo tanto la succión fue mayor.

En otro artículo presentado por University of Pretoria en Sur África,(2021) indica que el método ha tenido una implementación limitada debido a la necesidad de medir el volumen

de la muestra para generar un consolidado de características del suelo como lo es su comportamiento hidráulico y volumétrico. En este mismo articulo presenta el uso del tensiómetro aplicado a 5 diferentes tipos de suelos analizándolo en relación con el método del papel filtro.

Como segundo método tenemos la dispersión de neutrones; el cual es capaz de obtener propiedades mecánicas como lo son los poros y su textura. Puede captar la presencia de estructuras ricas en hidrogeno. Un buen artículo de referencia es Neutron scattering: A subsurface application review (2021) de Abu Dhabi, indica que un neutron por su carga imparcial pueden penetrar una muestra y examinar a así mismo muestras de rocas grandes. Para este proceso existen tres etapas representativas: emisión de neutrones los cuales surgen desde una fuente radioactiva, dispersión de neutrones y absorción de neutrones. La trasferencia de energía antre el neutron y el hidrogeno desatan una disminución de energía desacelerando su movimiento desde el momento que sale de la fuente radioactiva. A partir de las lecturas de estos neutrones ya desacelerados se puede observar por un detector de neutrones tipo cámara 2D.

Esta forma de determinar contendió de agua y parámetros que caracterizan a una roca se ven en desventaja puesto que solo se puede centrar en muestras con tamaños pequeñas, dispersión para el detector de humedad y una calibración específica para una matriz de hidrogeno presente para así mismo mantener la veracidad de los datos obtenidos.

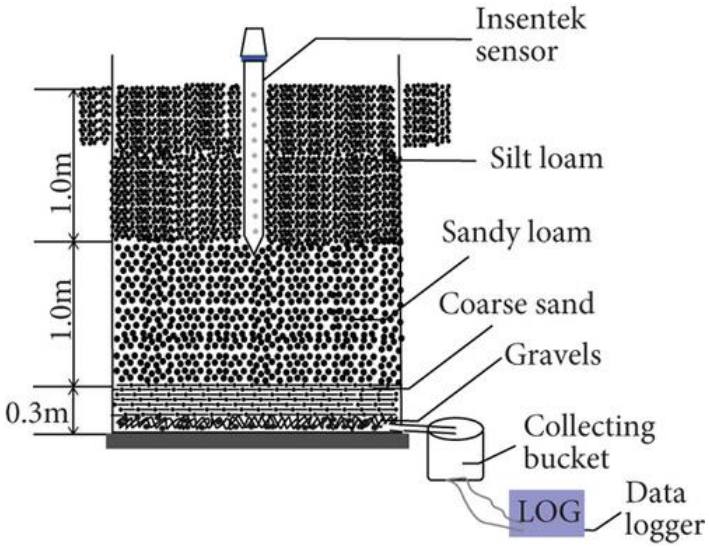


Neutron scattering.). Measurement of soil bulk density and water content with time domain reflectometry: Algorithm implementation and method analysis. Journal of Hydrology, 598, 126389.

La revista de hidrología vol.598 de la autoría de Bittell,Tomei.Anbazhagan entre otros (2021), el método de la reflectometría en el dominio del tiempo; este es un principio la cual puede medir la densidad en una zona de estudio geotécnico amplio, a partir de relaciones matemáticas se logró descifrar varias ecuaciones para derivar al agua presente en un suelo a través de la permitividad gestionando un análisis a distintos materiales.

En el articulo "Estimating soil water and salt contents from field measurements with time domain reflectometry using machine learning algorithms" (2023) se desarrolla una relación entre la salinidad del suelo y su propiedad dieléctrica través de la gravimetría y conductimetría; se señala que presenta desventajas significativas respecto a los sobre tamaños presentes en el área de estudio, la densidad aparente y la temperatura de este.

Como practica alternativa encontramos una comparativa entre el sensor FDR (Frequency domain decomposition) y un lisímetro de micro pesaje programado para medir los cambios de peso de una columna de suelo cada dos horas .Como conclusión se vio envuelto en mejor desempeño los sensores en suelos arcillosos y francos. Anzhenqin, Ning de Dongfeng (2021)



nonweighing lysimeter system.

El progreso de investigaciones en el campo de la ingeniería civil es indispensable para la obtención de datos diseñados para la toma de decisiones en obra o incluso antes del desarrollo de un proyecto, como ejemplo de esto se tiene otro articulo donde recopila la información presentada y genera una comparación entre métodos aceptados y notan recurrentes en el área de construcciones civiles y agricultura puesto que demás campos hacen uso diario de esta propiedad del suelo.

- Monitoreo a gran escala con el uso de sensores capacitivos en huertos de bayas para identificar los cambios de humedad que se presentan durante su crecimiento.
- Método de secado, este es en esencia, el que aquí llamamos método tradicional puesto que esta respaldado por normativa y estudios comprobables, es decir el respaldo es indudable a la hora de aplicarlo.
- Sensores del suelo: Estudios que a día de hoy siguen en contante evolución puesto que tienen mucha franja a la hora de elegir el equipo adecuado para la toma de humedades puesto que aun no se tiene condiciones ni parámetros establecidos.
- Propiedades eléctricas: Existen propiedades del suelo que se pueden medir a través de sus propiedades electroquímicas como lo son la salinidad y humedad, sin embargo, esto solo proporciona bases teóricas.
- Tensiómetro: El principio de este método es el uso de dos electrodos incrustados en una matriz del suelo, donde el cambio de resistencia entre estos es medida de la humedad, a pesar de su principio fundamentado, una de sus desventajas es su alto costo de mantenimiento y su poco alcance.
- Sonda de neutrones: Es una forma no destructiva de conocer la humedad, generando riesgos de radiación a su uso y su costo es alto.

Método de rayos gamma: Este principio es similar a la sonda de neutrones en una versión mejorada puesto que la resolución vertical es mayor, con respecto a la obtención de datos, pero igual de riesgosa por la radiación que emite, siendo un inconveniente para su aplicación. Limin Yu1,2, (2021)

En las pruebas de laboratorio y relaciones entre métodos encontramos un trabajo de grado de Miriam Ticona (2019) donde expone de manera cuantitativa y experimental la

correlación entre horno microondas y un sensor resistivo encontrando un rango de ±14.0%, adicional comparando costos y llegando a la conclusión de ser más económico el uso del sensor; este también tiene en cuenta las variables que pueden afectar las lecturas, como lo son la temperatura, el contenido de sales presentes y su composición mineralógica.

Por otro lado, en el ámbito de la agricultura, la implementación de radiación infrarroja el cual es un método no destructivo, usado para recopilar datos sobre características del suelo entre ellos su humedad. Este método funciona según la interacción de la radiación con el suelo ya que al momento de atravesar la onda parte de ella es absorbida por las moléculas de agua que presenta el suelo, lo que genera que la radiación no absorbida se refleje al sensor. Cuanto mayor sea el contenido de agua presente genera una menor reflectancia. Las ventajas de este método según Carranza Diaz, A,K ; Camacho Tamayo, J,H y Rubiano Sanabria, Y (2023) son la efectividad y asertividad conforme a los datos arrojados en el estudio con tres tipos de suelo en su artículo científico.

OBJETIVOS

General:

Evaluar la viabilidad del uso de la freidora de aire para determinar el contenido de agua de un suelo en laboratorio y en campo.

Específicos:

- Comparar la precisión entre el método alternativo presentado y el método que se indica en la norma INV E-122-13.

- Determinar los tiempos que se pueden emplear en este método alternativo, el tipo de muestras y que recomendaciones se deben tener a la hora de implementarlo.

- Evaluar la viabilidad de los resultados obtenidos para la adaptación e implementación de la freidora de aire como equipo valido para la obtención de datos de humedades.

- *Contenido de agua*: La relación entre la cantidad de agua que el material contiene y la masa seca de la muestra. Comúnmente se representa como un porcentaje y es crucial para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.

- *Masa húmeda*: El peso de una muestra antes de haber sido secada, incluyendo el contenido de agua y material sólido.

- *Masa seca*: El peso de la muestra secada en horno (110 ± 5 °C) después de que toda la humedad ha sido eliminada. Esta masa es solo del material sólido.

- *Horno de secado*: Se emplea para calentar y secar a temperatura controlada (usualmente 110 ± 5 °C) hasta peso constante, confirmando que toda el agua en la muestra ha sido eliminada.

- *Masa constante*: La condición de la muestra cuando su masa no cambia significativamente entre intervalos consecutivos de secado y pesaje (es decir, toda el agua ha sido eliminada).

- *Crisol*: Contenedor resistente al calor, usado para sostener las muestras durante el proceso de secado en el horno. Su material debe asegurarse de no mojarse ni afectar el resultado.

- *Porcentaje de humedad*: Relación de la masa de agua extraída: Humedad (%) = (Masa de agua / Masa seca) × 100

- *Norma técnica*: Son procedimientos operativos estándar definidos para las operaciones de laboratorio para asegurar consistencia, precisión y reproducibilidad en el laboratorio. Por ejemplo, la INV E-122 especifica los procedimientos para la determinación de la humedad en varios materiales.

- *Margen de error:* Magnitud de la variación que se permite entre los resultados obtenidos y los valores verdaderos.
- *Tamiz y tamizado*: Herramienta para separar partículas sólidas en variedad de tamaño. Este proceso proporciona información de la distribución de tamaño de partículas del suelo.

- *Muestra representativa:* Cantidad de material que es representativo de una muestra mayor y que conserva las mismas características y propiedades del total.

- *Freidora de aire*: Equipo el cual calienta el aire a la temperatura requerida y lo dirige a una segunda cámara que contiene el horno de secado mediante un procedimiento de filtro de aire.

Las discusiones previas han evidenciado que, en numerosos proyectos de infraestructura vial, y geotécnicas, las propiedades del material están condicionadas por diversos factores, siendo la humedad uno de los más influyentes. Este parámetro afecta directamente el comportamiento mecánico y la estabilidad de los materiales, destacando su relevancia en la planificación y ejecución de dichas obras.

El contenido de humedad es el factor más importante en el establecimiento de las características mecánicas de los suelos y todos los materiales en la industria de la construcción de carreteras, incluyendo la compactación, la resistencia y la durabilidad. En este marco, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) ha definido normas técnicas y procedimientos para garantizar el desempeño y estabilidad de los materiales utilizados.

Esto aclara la importancia de un muestreo y análisis adecuado del contenido de humedad en el proyecto no solo para asegurar los límites de viabilidad técnica, sino también la económica y ambiental del proyecto al evitar el sobrecosto por fallas estructurales o ajustes en la vida útil del proyecto.

El contenido de humedad es la cantidad de agua presente en una unidad de masa de material, y se expresa comúnmente como un porcentaje respecto al peso seco del material (por ejemplo, suelos). Se divide en tipos según su naturaleza y el grado de adherencia al material las cuales se menciona a continuación:

- *Adsorción de humedad*: Agua adherida a la superficie de las partículas de material y no se puede eliminar a temperatura ambiente.

- *Humedad capilar:* Agua retenida en los poros por tensión superficial.

- *Humedad libre:* Agua no asociada con la reacción, presente en las vacuolas entre las partículas.

Para las obras geotécnicas y viales, una de las propiedades mecánicas más críticas de los suelos influenciadas por el contenido de humedad es su capacidad portante, densidad seca máxima, ángulo de fricción interna y cohesión.

El contenido de humedad impacta las obras de infraestructura vial:

- *Compactación de suelos*: El proceso de compactación debe tener un contenido de humedad óptimo para maximizar la densidad seca del suelo incrementando así su capacidad de soporte y disminuyendo su deformabilidad.

- *Estabilidad de capas estructurales:* Un aumento en los contenidos de humedad puede llevar al debilitamiento de materiales granulares y/o suelos estabilizados causando fallas de la base o subbase del pavimento.

- *Drenaje y durabilidad*: La presencia incrementada de humedad en los materiales puede crear procesos que pueden contribuir a procesos de deterioro (por ejemplo, formación de grietas, asentamientos o la pérdida de soporte).

En obras geotécnicas tiene incidencia en:

- *Los ángulos de fricción y la cohesión*: son parámetros fundamentales en la geotecnia ya que describen las propiedades de resistencia al corte del material estos parámetros están estrechamente relacionados con el contenido de humedad del suelo y su comportamiento puede variar significativamente en función de este
- *Ángulo de fricción (φ):* Resistencia al deslizamiento entre partículas del suelo relacionado con la fricción interna de las partículas que componen el suelo. y está influenciado por varios factores, incluida la humedad, así, para suelos secos para humedades bajas, el ángulo de fricción suele ser mayor; Al aumentar el contenido de agua, el ángulo de fricción disminuye y en suelos saturados, el ángulo de fricción puede disminuir considerablemente debido a la presión de poros que reduce el contacto efectivo entre partículas.

En cuanto a la Cohesión en suelos secos tiene valores bajos, para humedades intermedias, la cohesión aumenta debido a las fuerzas capilares que se generan cuando el agua actúa como un "pegamento" entre las partículas y en suelos saturados, la cohesión disminuye drásticamente, ya que el agua excedente elimina las fuerzas capilares.

En las especificaciones de construcción del INVIAS, a través de sus normas de ensayo y manuales técnicos, establece el procedimiento requerido para asegurar el muestreo adecuado y análisis de humedad como resultado de la construcción vial. Adoptan normas internacionales, como las ASTM y AASHTO, a las condiciones de materiales y climas de nuestro territorio.

En el contexto de geología y la ingeniería geotécnica, material sólido generalmente se refiere a partículas minerales de suelo y roca que no son solubles en agua y que se han formado naturalmente. Por lo tanto, el contenido de agua de materiales que contienen materia extraña (cemento, etc.) puede necesitar ser definido como objetivamente calificado. Sin embargo, algunos de los materiales orgánicos pueden descomponerse si se secan en el horno a la temperatura normalmente usada para esta prueba (110° C). Los materiales hidratados (por ejemplo, yeso—sulfato de calcio dihidrato, etc.) u otros que contienen grandes cantidades de

agua hidratada pueden crear dificultades especiales debido a su forma mineralógica, ya que se deshidratan muy lentamente a temperatura de secado normalizada (110° C) y muy baja humedad relativa, compuesto secundario (como el hemihidrato de sulfato de calcio) que ni existe en la naturaleza ni está presente en materiales naturales, salvo en suelos desértico.

Para disminuir el grado de deshidratación del yeso en los materiales que lo incluyen o para minimizar la descomposición en los suelos ricos en materia orgánica, probablemente sea beneficioso secar tales materiales una vez a 60° C (140° F) o en un desecador a temperatura ambiente. Por esta razón, cuando se utiliza una temperatura de secado diferente de la definida para este método de prueba, el contenido de agua resultante puede no ser el obtenido usando la temperatura de secado normalizada de 110° C.
INVIAS recomienda que la selección de puntos utilizados para el muestreo sea representativo del área investigada, teniendo en cuenta las condiciones geotécnicas del terreno. Los tipos y número de muestras también deben determinarse de acuerdo con los propósitos del análisis como el grado de compactación en capas de pavimento de construcción, profundidad de cimentación en estructuras, dimensionamiento de los cortes en taludes, entre otras. Por otra parte, para detener la pérdida o absorción de humedad antes del análisis de laboratorio, las muestras para en sayo se deben almacenar en recipientes herméticos y en cuartos húmedos.

> *Secado en horno:* Este método de referencia, en laboratorio se usa para determinar el contenido de humedad de un material, secando el agua a una temperatura precisa (110 ± 5 °C) hasta que el peso sea constante. Este método se encuentra en las normas de ensayo del INVIAS y la especificación ASTM D2216.
>
> *Método de carburo de calcio (Speedy):* Un método de campo en el mismo día que hace que el agua reaccione químicamente con el carburo de calcio para dar gas acetileno. La cantidad de gas producido es proporcional al contenido de agua.

Sensores electrónicos de humedad: Equipo portátil para realizar mediciones aproximadas de campo del desarrollo del país.

Métodos rápidos de campo

- *Carburo de calcio:* Se coloca una pequeña cantidad de material (25 gramos) en un contenedor hermético con carburo de calcio. Esto lleva a una reacción química que produce gas acetileno, resultando en presión que se puede medir en relación con el contenido de humedad.

- *Higrómetros electrónicos:* Estos meden la conductancia eléctrica o la capacitancia para medir el contenido de humedad.

Por otra parte, se habla de sellos de niebla formados por emulsiones de betún. Mostrando los mismos comportamientos operacionales, en algunas investigaciones realizadas en Colombia, el cumplimiento con las especificaciones de INVIAS en relación con el contenido de humedad ha llevado a la estabilidad y permanencia de cargas principales y caminos rurales. Por ejemplo:

- El control de la humedad ha sido fundamental en la región andina ya que aborda el problema existente de deslizamientos en suelos arcillosos.

- En la costa atlántica, las mediciones de humedad se utilizaron para optimizar el uso de materiales granulares en alta humedad ambiental.

- El análisis de humedad se utiliza en múltiples etapas en el proceso de construcción, incluyendo: Control de compactación del suelo en capas de la subrasante, subbase y base. Caracterización de propiedades de mezclas asfálticas y materiales

La importancia del contenido de agua en los geo materiales radica en su influencia directa sobre las propiedades físicas, mecánicas y químicas de estos. El contenido de agua está estrechamente relacionado con el grado de saturación, que es una medida de la proporción de los poros del material que están llenos de agua en relación con el volumen total de poros.

Esta relación es crucial para entender el comportamiento de los geomateriales en diversas aplicaciones de ingeniería geotécnica, geológica y ambiental.

1. Propiedades Físicas y Mecánicas:

    - *Resistencia al corte:* El grado de saturación afecta la resistencia al corte de los geomateriales. En suelos no saturados, la succión matricial (diferencia entre la presión del aire y la presión del agua en los poros) contribuye a la resistencia al corte. A medida que el grado de saturación aumenta, la succión disminuye, lo que puede reducir la resistencia al cortante.

    - *Compresibilidad:* El contenido de agua influye en la compresibilidad de los geomateriales. Suelos saturados pueden experimentar consolidación alta bajo carga, lo que lleva a asentamientos de las estructuras a lo largo del tiempo.

    - *Permeabilidad:* El grado de saturación afecta la permeabilidad del material. Un mayor grado de saturación generalmente aumenta la permeabilidad, facilitando el flujo de agua a través del material.

2. Comportamiento Hidráulico:

    - *Retención de agua:* El grado de saturación determina la capacidad de un geomaterial para retener agua, lo que es importante en aplicaciones como barreras hidráulicas.

    - *Flujo de agua subterránea:* En acuíferos y otros medios porosos, el grado de saturación influye en el flujo de agua subterránea y en la recarga de acuíferos.

3. Impacto Ambiental:

- *Contaminación:* El contenido de agua y el grado de saturación afectan la movilidad de contaminantes en el subsuelo. Un mayor grado de saturación puede facilitar la migración de contaminantes disueltos en el agua.

- *Erosión:* En suelos no saturados, la erosión puede ser más pronunciada debido a la menor cohesión entre partículas, lo que es relevante en la gestión de cuencas hidrográficas y la conservación del suelo.

4. Diseño y Construcción:

    - *Cimentaciones:* El contenido de agua y el grado de saturación son consideraciones clave en el diseño de cimentaciones. Suelos saturados pueden requerir técnicas especiales de drenaje o consolidación para garantizar la estabilidad de las estructuras.

    - *Materiales de construcción:* En la construcción de terraplenes, presas y otras estructuras de tierra, el control del contenido de agua es esencial para lograr la compactación adecuada y la estabilidad a largo plazo.

La determinación del contenido de agua en materiales especiales como cenizas volcánicas, suelos residuales, suelos orgánicos y suelos estabilizados presenta desafíos únicos debido a sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas particulares.

1. Cenizas Volcánicas

    - Composición heterogénea: Las cenizas volcánicas tienen una composición variable que depende del tipo de erupción y la fuente magmática. Esto dificulta la estandarización de los métodos de medición del contenido de agua.

- Alta porosidad y permeabilidad: Su estructura porosa y altamente permeable puede llevar a una rápida pérdida de agua durante el muestreo y transporte, lo que afecta la precisión de las mediciones.

- Presencia de minerales higroscópicos: Algunas cenizas contienen minerales que absorben agua de la atmósfera, lo que puede alterar las mediciones si no se controlan las condiciones ambientales durante el análisis.

- Limitaciones en métodos tradicionales: Métodos como el horno de secado pueden subestimar el contenido de agua debido a la posible pérdida de agua estructural o la descomposición de minerales a altas temperaturas.

2. Suelos Residuales

- Variabilidad mineralógica: Los suelos residuales se forman por la meteorización in situ de rocas, lo que resulta en una gran variabilidad en su composición mineralógica y estructura. Esto afecta la relación entre el contenido de agua y otras propiedades como la succión matricial.

- Presencia de arcillas expansivas: Algunos suelos residuales contienen arcillas expansivas que cambian de volumen con variaciones en el contenido de agua, lo que complica la medición precisa.

- Dificultad en la toma de muestras representativas: Debido a su naturaleza heterogénea, es difícil obtener muestras representativas que reflejen el contenido de agua real del suelo.

- Efecto de la meteorización: La meteorización puede crear poros y fracturas que retienen agua de manera no uniforme, lo que dificulta la interpretación de los resultados.

3. Suelos Orgánicos

    - Alta capacidad de retención de agua: Los suelos orgánicos, como las turbas, tienen una alta capacidad de retención de agua debido a su estructura fibrosa y porosa. Esto puede llevar a mediciones inexactas si no se considera la pérdida de agua durante el secado.
    - Descomposición térmica: Durante el secado en horno, los suelos orgánicos pueden sufrir descomposición térmica, lo que lleva a una sobreestimación del contenido de agua debido a la pérdida de materia orgánica.

    - Variabilidad en la composición orgánica: La proporción de materia orgánica y su grado de descomposición varían ampliamente, lo que afecta la relación entre el contenido de agua y otras propiedades del suelo.

4. Suelos Estabilizados

    - Efecto de los aditivos: Los suelos estabilizados con cal, cemento u otros agentes químicos pueden experimentar reacciones que alteran su contenido de agua. Por ejemplo, la hidratación de la cal o el cemento consume agua, lo que puede llevar a mediciones inexactas.

    - Cambios en la estructura del suelo: La estabilización modifica la estructura del suelo, afectando su capacidad de retención de agua y la distribución de la humedad.

5. Limitaciones Generales de los Métodos de Medición

    - Método del horno de secado: Aunque es el método más común, puede no ser adecuado para materiales que contienen minerales higroscópicos, materia orgánica o que sufren descomposición térmica.

- **NACIONAL:**

NORMA	DESCRIPCIÓN	SÍNTESIS
INV E - 122	Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo - agregado	Se extrae una muestra del material húmedo y se coloca en un horno a 110 ± 5°C (230 ± 9°F), donde se deseca hasta obtener una masa constante. Se asume que la masa eliminada durante el proceso de desecación es agua, y la masa remanente corresponde a la muestra desecada. El contenido de agua se determina relacionando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra desecada.
INV E - 135	Método para determinar la humedad de los suelos usando el horno microondas	El microondas se ha utilizado para medir la humedad en suelos utilizando el siguiente método: Se coloca una muestra de suelo húmeda en un recipiente apropiado y se registra su masa. Se seca en un horno microondas a intervalos, durante los cuales se mide y registra la masa después de cada período de secado hasta que la masa no varíe más. El cambio de peso durante el secado es igual a la masa inicial (húmeda) menos la masa final (seca) e indica el agua originalmente presente en la muestra.
INV E - 103	Conservación y transporte de muestras de suelos	Su objetivo es lograr las condiciones en las que estas muestras se transfieren del campo al laboratorio sin sufrir cambios que puedan alterar sus estados originales y, por lo tanto, sin perder su representatividad y fiabilidad.

INV E - 123	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.	Se realiza utilizando métodos para clasificar y medir partículas por su tamaño. El tamizado y la sedimentación son los procedimientos más comunes. Estos enfoques proporcionan una descripción detallada del tamaño y la distribución de las partículas en el suelo.
INV E -133	Equivalente de arena de suelos y agregados finos.	El método consiste en tamizar una fracción de suelo o agregado y mezclarla con un reactivo. Después de dar tiempo suficiente para que el material fino se asiente, se mide la cantidad de material fino separado y se calcula el índice de equivalente de arena. Se debe poder juzgar a partir de este índice, ya que un menor contenido de finos es preferido en aplicaciones, en construcciones de pavimentos y cimentaciones.
INV E - 222	Densidad, densidad relativa (gravedad especifica) y absorción del agregado fino	La densidad de un agregado fino es la masa del agregado fino por unidad de volumen; se determina pesando una muestra de agregado y dividiendo su masa por el volumen de la muestra. Es la relación entre la densidad del agregado y la densidad del agua y no tiene unidades; compara el material con el agua como referencia. La absorción de agua del agregado fino indica la capacidad de retención de agua del agregado fino en forma porosa, lo cual se encuentra sumergiendo el agregado fino en agua por un período de tiempo limitado y anotando la diferencia de masa después de secarlo. Estos

		parámetros son significativos para la evaluación de las propiedades del agregado utilizado en la producción de concreto y otros materiales de construcción.
INV E – 121	Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición	Una muestra de suelo se calienta en una mufla a alta temperatura alrededor de 500-550°C para quemar la materia orgánica presente. Se mide el peso de la muestra antes y después del calentamiento. La diferencia en masa es la quema de compuestos orgánicos perdidos de la muestra, expresada como un porcentaje del peso de la muestra. Esta prueba proporciona una estimación cuantitativa la cantidad de materia orgánica presente en su suelo, lo cual es útil para determinar las propiedades y el comportamiento del suelo.

INTERNACIONAL:

NORMA	DESCRIPCION	SINTESIS
ASTMD 2216	Método de prueba estándar para la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo y rocas.	Este método se ha aplicado para medir el contenido de humedad del suelo utilizando el secado en horno. Se registra la masa de la muestra de suelo, se coloca en un horno a una temperatura establecida hasta que toda la humedad se haya evaporado, y se vuelve

		a pesar. Luego, se puede calcular el contenido de humedad como un porcentaje basado en la diferencia de peso. Es una prueba fundamental para evaluarlos atributos físicos del suelo en los campos de la ingeniería, la geotecnia y la agricultura.
NMX-C-166-ONNCCE-2018	Industria de la Construcción-Agregados-Contenido de agua por secado-Método de ensayo	Esta Norma Mexicana establece el procedimiento para la determinación del contenido de agua en una muestra de agregado mediante el proceso de secado. Los resultados obtenidos son fundamentales para calcular las cantidades exactas de los materiales involucrados en la elaboración de una mezcla de concreto, permitiendo así un control preciso en la dosificación de los componentes del concreto.
NTP 339.185	Método de ensayo normalizado para contenido de humedad evaporable de agregados por secado.	Define el procedimiento para determinar el contenido de agua en agregados gruesos y finos por medio de sacado donde se retira la humedad superficial y en sus poros; dejando de lado el agua que se liga químicamente a algún componente del agregado.
ASTM D4643-17	Método de ensayo estándar para la determinación del contenido de agua (humedad) en suelos y rocas mediante calentamiento en horno de microondas.	Este procedimiento de ensayo detalla los pasos para determinar el contenido de agua (humedad) en suelos mediante el secado progresivo del suelo en un horno de microondas.

Tabla 1.Cuadro normativas / Fuente: Propia

Fases del proyecto

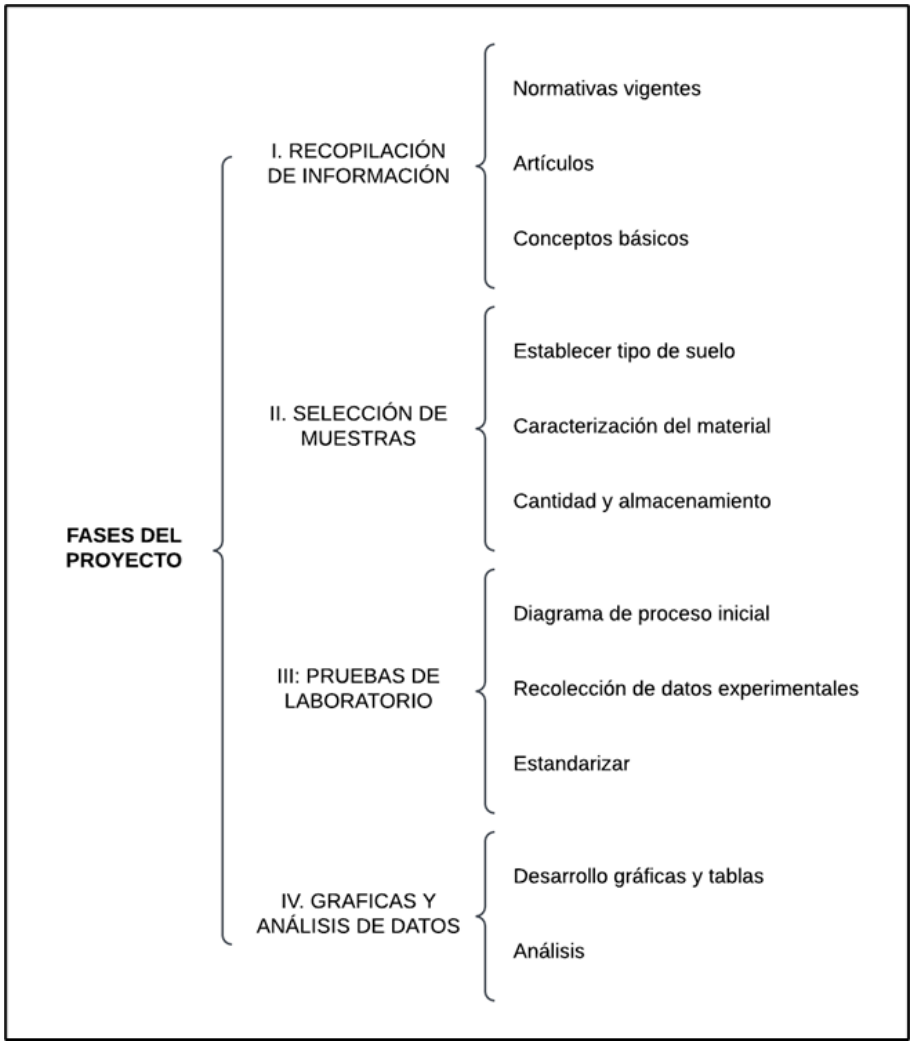


Ilustración 1.Fases del proyecto / Fuente: Propia

1. Recopilación de información

Para el desarrollo de esta investigación se recolecto un grupo de artículos y proyectos relacionados con la implementación del microondas para la obtención del contenido de humedad de un suelo donde se desarrolló distintos métodos y comparaciones en base a la INV E 122-13. También se implementó las normativas vigentes aplicables para esta investigación de carácter experimental.

2. Selección y recolección de muestras

El material testigo o suelo patrón para someter a prueba proviene de la mina Córame, caracterizado en la empresa Cemex y donada como material de estudio en esta investigación experimental.



Ilustración 2. Material testigo / Fuente: Propia

Los resultados de la caracterización física del material según la norma INV E 123-13 realizada en laboratorio certificado, permite clasificar este material como una arena gruesa con un módulo de finura de 2.25

RESULTADOS

ABERTURA TAMIZ mm	ABERTURA TAMIZ in	MASA RETENIDA (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASA (%)	LIMITE INFERIOR (%)	LIMITE SUPERIOR (%)
12.5	1/2	0	0	0	100	100	100
9.5	3/8	0	0	0	100	100	100
4.76	N° 4	61	6.69	6.69	93.31	85	100
2.38	N° 8	102.4	11.23	17.92	82.08	60	80
1.19	N° 16	103.8	11.38	29.3	70.7	45	65
0.6	N° 30	98	10.75	40.05	59.95	30	55
0.3	N° 50	120.7	13.24	53.29	46.71	15	35
0.15	N° 100	219.8	24.1	77.39	22.61	2	10
0.075	N° 200	75.5	8.28	85.67	14.33	0	7
	Fondo	130.7	14.33	100	0	0	0

GRANULOMETRÍA

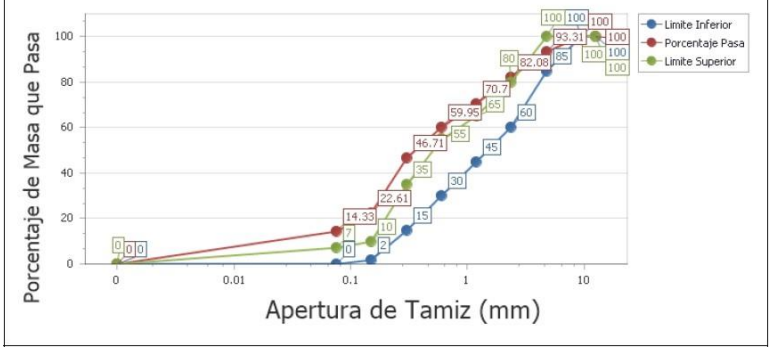


Gráfico 1.Caracterizacion física de agregados / Fuente: CEMEX

Así mismo, se realizó el ensayo de contenido de materia orgánica según la INV E 121, obteniendo un resultado de 1% y según la INV E 131-13 se determinó un resultado de pH de los suelos de 4 clasificándolo como ácido.

En cuanto caracterización de la densidad y absorción del suelo patrón se realizó el procedimiento descrito en la norma INV E 222-13 arrojando los siguientes resultados:

Densidad aparente (g/cm3)	2,41
Densidad SSS (g/cm3)	2,48
Densidad nominal (g/cm3)	2,60
Absorción	2,92%

Tabla 2. Densidad y absorción / Fuente: Propia

Finalmente se realizó la determinación de proporciones de material arcilloso por medio de la norma INV E 133-13 denominado “Equivalente de arenas de suelos y agregados finos”

Arcilla	**Arena**	**Equivalente %**
13,8	3,5	25
13,7	3,5	26
13,6	3,4	25
Equivalente promedio %		25

Tabla 3. Equivalente de arenas de suelos y agregados finos / Fuente: Propia

Para la conservación y preservación de muestras se tuvo en cuenta la normativa INV E 103-13 clasificada en el grupo B; por medio de bolsas herméticas se mantuvo la muestra reservada y adicional a esto la bolsa mantuvo dentro de un recipiente hermético para evitar la pérdida de humedad para el ensayo experimental. En su totalidad se ejecutó el proceso experimental en 70 muestras de 20 gramos cada una.

3. Trabajo de laboratorio

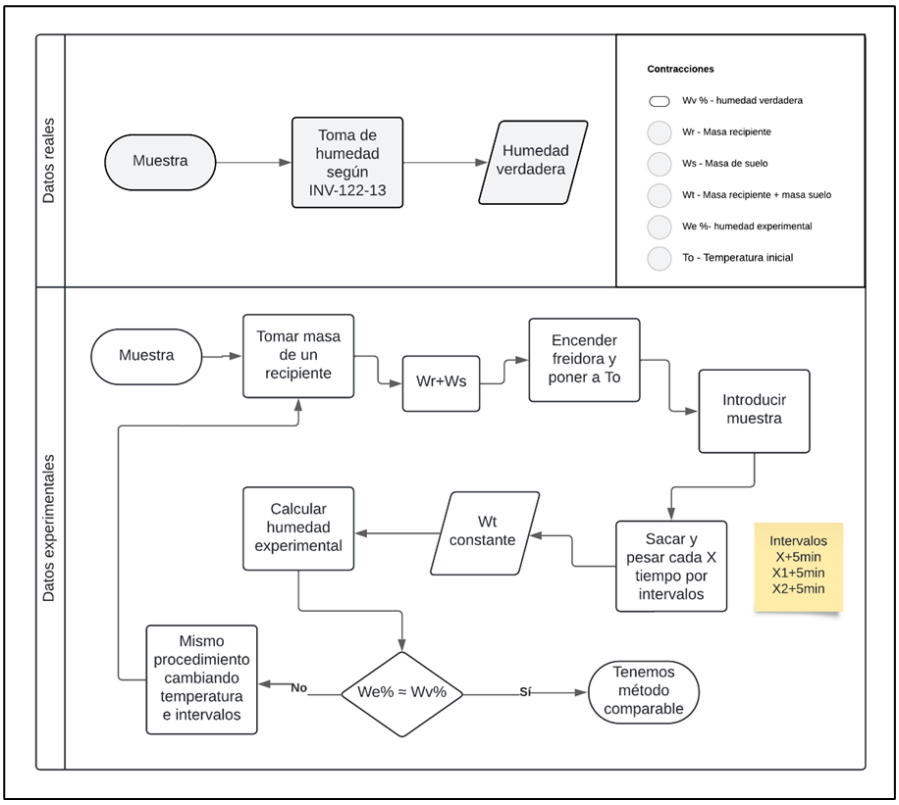


Diagrama 1. Trabajo de laboratorio /Fuente: Propia

El proceso inicia tomando una cantidad especifica de suelo patrón especificado en la norma INV E 122-13 según la tabla 122-1. Donde para el material objeto de estudio se determina que debemos tomar 20 gramos de material ya que de acuerdo con la granulometría del mismo requirió que fuera tamizado por las mayas No.4 y No.10 con el objetivo de estandarizarlo para suelos finos y obtener una mayor precisión a la hora de comparar resultados.

TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA (PASA 100 %)		MÉTODO A		MÉTODO B	
		CONTENIDO DE AGUA REGISTRADO CON APROXIMACIÓN DE ± 1 %		CONTENIDO DE AGUA REGISTRADO CON APROXIMACIÓN DE ± 0.1 %	
TAMAÑO TAMIZ (MM)	TAMAÑO TAMIZ ALTERNATIVO	MASA DEL ESPÉCIMEN	LECTURA DE LA BALANZA (g)	MASA DEL ESPÉCIMEN	LECTURA DE LA BALANZA (g)
75.0	3"	5 kg	10	50 kg	10
37.5	1½"	1 kg	10	10 kg	10
19.0	¾"	250 g	1	2.5 kg	1
9.5	3/8"	50g	0.1	500 g	0.1
4.75	No. 4	20 g	0.1	100 g	0.1
2.00	No. 10	20 g	0.1	20 g	0.01

Tabla 4.Requisitos sobre la masa mínima de los especímenes de ensayo y la lectura de las balanzas /Fuente: INV E-122-13



Ilustración 3. / Fuente: Propia

Como recipiente de muestras se usaron crisoles con una capacidad máxima de 100 ml, a los cuales se les determino su masa y se les asigno una numeración para su identificación.

posteriormente se iniciaron las pruebas iniciales realizando una humedad del material con el horno convencional a una temperatura de 110 ± 5°C siguiendo el procedimiento INV 122-13 para así tener la humedad del suelo la cual es la humedad de referencia que sirvió de comparación con las pruebas de humedad realizadas en la freidora de aire.



Ilustración 4. Horno y muestras proceso de secado /Fuente: Propia

una vez depositados los 20 gramos de material en cada crisol nombrados como prueba 1, 2, 3 y 4, se llevan las muestras a una temperatura inicial de 180°C en la freidora de aire inicialmente en intervalos de tiempo de 3 minutos para tomar sus respectivas masas y obtener el tiempo necesario que se encuentre a masa constante.



Ilustración 5. Freidora de aire ccon muestra / Fuente: Propia

La variación de intervalo de tiempo y temperaturas son variables en el procedimiento según los resultados que se fueron obteniendo.

4. Análisis de resultados

A lo largo de varias semanas, se realizó un exhaustivo trabajo de laboratorio en la determinación del método más eficiente para medir la humedad del suelo utilizando una freidora de aire. El objetivo principal fue lograr determinar la temperatura óptima y el tiempo adecuado de exposición de las muestras que permita tener el valor de humedad lo que implico realizar una gran cantidad de pruebas variando la metodología y ajustando tanto las condiciones de temperatura como los tiempos de sometimiento para garantizar resultados confiables, precisos y reproducibles para material, a continuación, se describe el proceso ejecutado en cada semana.

- Semana 1. ¿A qué temperatura es más eficiente empezar?

La temperatura inicial más eficiente para un proceso depende del objetivo específico y de las propiedades del material. En el caso de utilizar una freidora de aire para determinar el contenido de humedad en suelos, es fundamental establecer una temperatura que sea lo suficientemente alta

para evaporar el agua sin alterar las propiedades del material teniendo en cuenta algunas consideraciones como:

I. *Punto de evaporación del agua:* La temperatura debe ser superior a los 100 °C para asegurar que el agua se evapore completamente.
II. *Evitar alteraciones del suelo:* Temperaturas excesivamente altas (>200 °C) podrían modificar la estructura química o mineralógica de algunos suelos, especialmente los arcillosos.
III. *Uniformidad del secado:* La temperatura debe garantizar un secado uniforme en toda la muestra.

Esto nos llevó a realizar unas pruebas preliminares para determinar la temperatura óptima en la freidora de aire, es recomendable realizar pruebas preliminares:

a. *Verificar resultados:* Comparar los valores de humedad obtenidos con los de un horno convencional.
b. *Observar efectos:* Analizar cualquier cambio en la textura o propiedades del suelo después del secado.

Una vez teniendo en cuenta lo anteriormente descrito se determinaron las condiciones iniciales de la muestra fueron 180°C comparado con la potencia máxima de la freidora de aire de 200°C donde se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

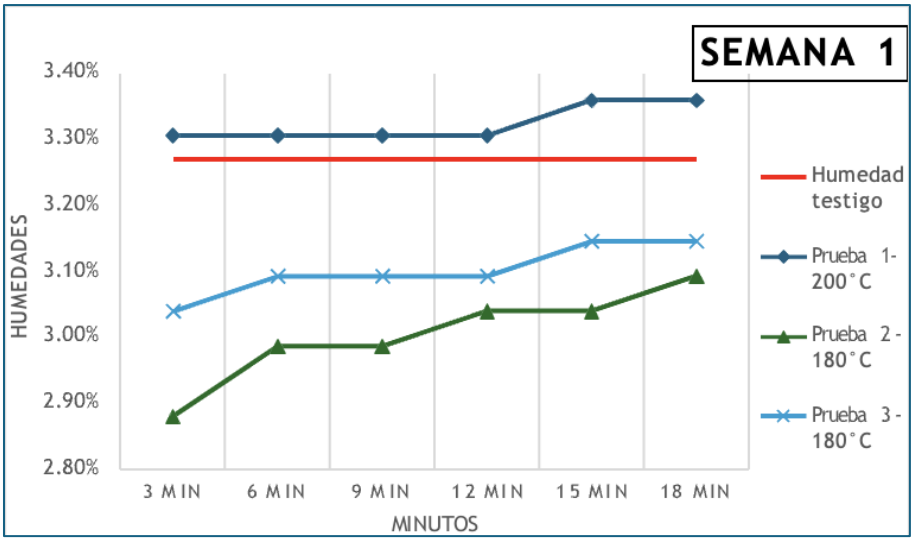


Gráfico 2. Semana 1 / Fuente: Propia

El resultado de humedad para el suelo testigo fue de de 3.27%, en la gráfica 1, podemos verse reflejada que la tendencia más cercana es la condición de temperatura más elevada al resultado testigo fue la prueba 1 a una temperatura de 200°C y la muestra que presento el menor error relativo.

To	Error Relativo
200°C	2,7%
180°C	5,4%
	3,8%

Tabla 5. Error semana 1 /Fuente: Propia

Sin embargo debíamos analizar por que la mencionada muestra supero el valor de humedad superiores a la muestra testigo ya que en condiciones normales debería coincidir por el limite inferior pero no superar el valor de la muestra testigo, después de una verificación del equipo se logro tener sospecha de que la ventilación que realiza el equipo se da mediante un ventilador ubicado en la parte superior de este y puede que este de alguna manera sacando la muestra mientras se encuentra más seca, así que en la segunda semana para corroborar la inquietud se decidió iniciar con ensayos colocando a unos crisoles tapa y a otros no.

- Semana 2 ante los análisis de los primeros resultados debíamos responder a la pregunta ¿Puedo incrementar lo intervalos de tiempo sin afectar la muestra?

Lo que se decidió realizar un incremento en el doble de tiempo con la temperatura optima verificada en la semana 1, es decir a una temperatura de 200°C y someter las muestras a tiempos de 6 minutos iniciando en 3 minutos, obteniendo los resultados presentados a continuación.

	Error Absoluto	Error Relativo
Sin cambio	0,001060443	3,6%
	0,000529857	1,8%
Cambio intervalo	0,052329505	178,4%
	0,049412392	168,4%

Tabla 6. Error semana 2 / Fuente: Propia

SEMANA 2 (Sin tapa)							
Testigo	Recipiente	Temperatura	Tiempo	Wo	Wf	W %	W% final
	3	110±5	24 h	20	19,42	2,99%	2,93%
	4			20	19,44	2,88%	
	1			20	19,43	2,93%	
Prueba	3	200	3 min	20	19,43	2,93%	3,04%
			6 min	20	19,43	2,93%	
			9 min	20	19,42	2,99%	
			12 min	20	19,41	3,04%	
			15 min	20	19,41	3,04%	
			18 min	20	19,41	3,04%	
Prueba	4	200	3 min	20	19,44	2,88%	2,99%
			6 min	20	19,44	2,88%	
			9 min	20	19,43	2,93%	
			12 min	20	19,42	2,99%	
			15 min	20	19,42	2,99%	
			18 min	20	19,42	2,99%	
Prueba con cambio de intervalos de tiempo	3	200	3 min	20	18,71	6,89%	8,17%
			9 min	20	18,6	7,53%	
			15 min	20	18,55	7,82%	
			21 min	20	18,49	8,17%	
Prueba con cambio de intervalos de tiempo	4	200	3 min	20	19,51	2,51%	7,87%
			9 min	20	18,64	7,30%	
			15 min	20	18,61	7,47%	
			21 min	20	18,54	7,87%	

Tabla 7. Resultados semana 2 / Fuente Propia

En la tabla 7, se presenta la totalidad de las pruebas realizadas en la segunda semana, en donde se puede evidenciar que en las pruebas 3 y 4, los resultados obtenidos fueron desfavorables debido a la exposición del material ya que se colocó en el equipo sin protección contra el posible arrastre de partículas (tapa) debido a la circulación de aire del equipo que la realiza con ventilador, sin ningún

tipo de protección para minimizar las ráfagas de viento emitidas. Esto, sumado a la proximidad de la muestra al ventilador de la freidora y al tiempo prolongado de tratamiento, resultó en una inevitable pérdida de material fino. Como consecuencia, en la gráfica 2, se observan errores significativos: un 178.4% en la prueba 3 y un 168.4% en la prueba 4.

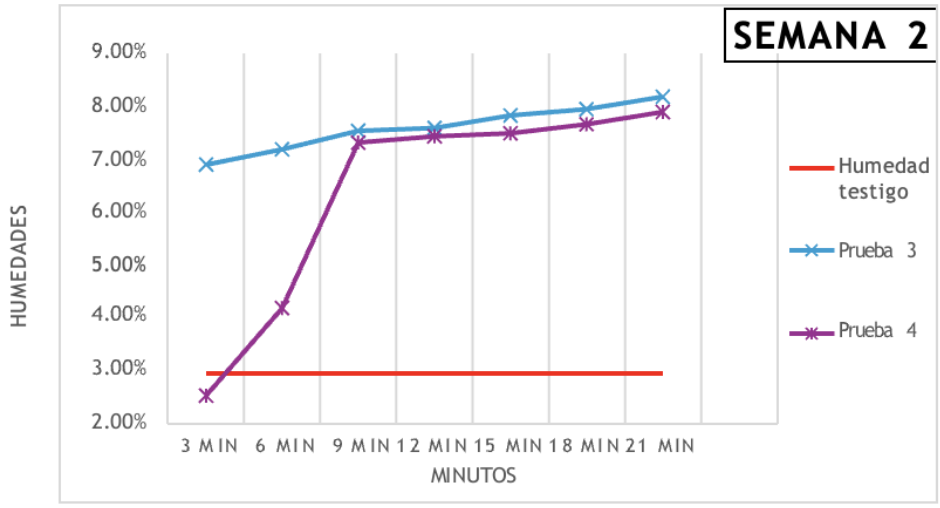


Gráfico 3. Semana 2 P4 - P3 / Fuente: Propia

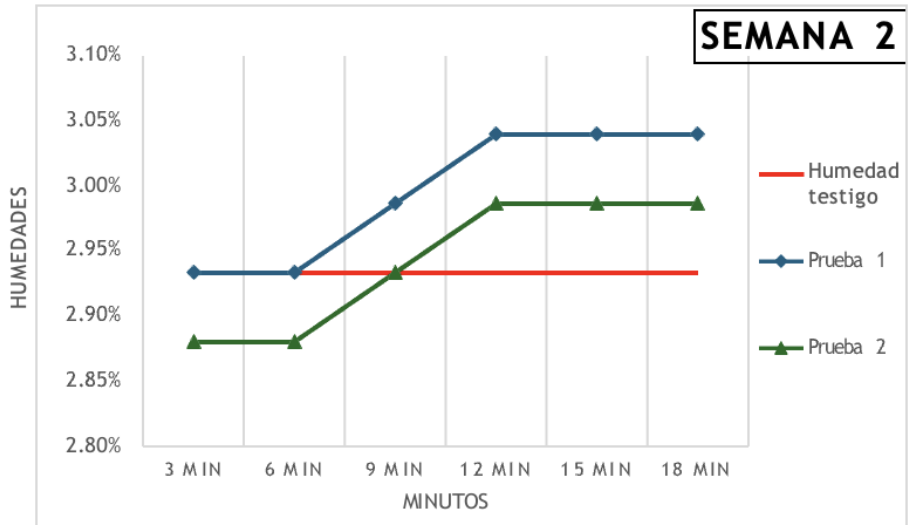


Gráfico 4. Semana 2 P1-P2 /Fuente: Propia

En la gráfica 3, se presentan los resultados de las pruebas 1 y 2 que contenían tapa que permitía la protección contra el arrastre de partículas, pero al mismo tiempo permitía la circulación de aire caliente. En el resultado se evidencio más precisión, puesto que los intervalos eran los mismos a los iniciales, cada tres minutos. El error de la prueba 1 fue de 3.6% y de la prueba 2 corresponde a un 1.8% siendo así más cercano a la humedad testigo.

- Semana 3 ¿Si contengo el material en el recipiente para evitar pérdidas puedo obtener mejores resultados?

Se realizaron dos pares de pruebas donde se cambiaban las condiciones para impedir la perdida de material independientemente del tiempo que se expusiera en la freidora de aire.

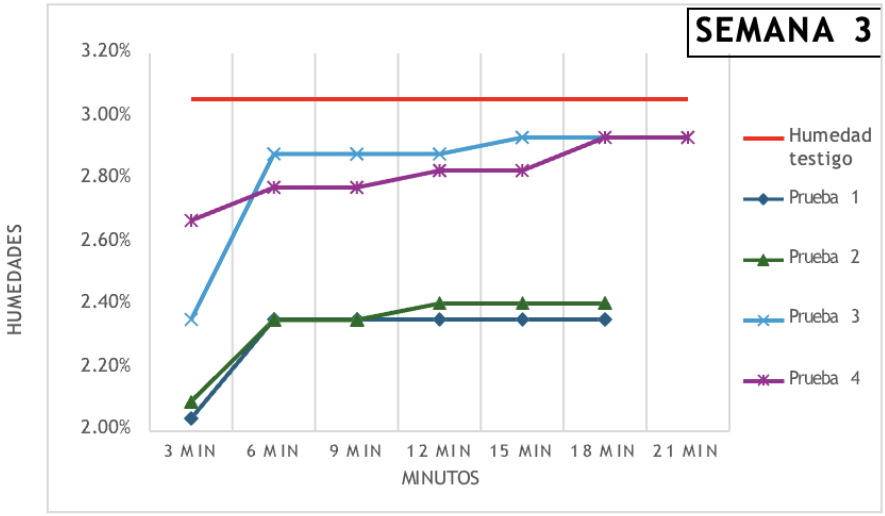


Gráfico 5. Semana 3 / Fuente: Propia

El error detectado en el porcentaje de humedad de las pruebas anteriores evidencia la necesidad de realizar ajustes en el procedimiento. Es fundamental trabajar con una tapa adecuada durante el secado, ya que esta ayuda a evitar la pérdida de material, especialmente en muestras de suelos con partículas finas susceptibles de dispersarse por la circulación de aire.



	Error Relativo
Sin tapa	22,9%
	21,2%
Con tapa	3,9%
	3,9%

Tabla 8. Semana / Fuente: Propia

Implementar este ajuste permitirá obtener mediciones más precisas y reproducibles, mejorando la confiabilidad de los resultados y minimizando las variaciones causadas por pérdidas accidentales durante el proceso.

.

Al finalizar las pruebas con y sin tapa, surgió una nueva interrogante: al cubrir el crisol, el recipiente se volvía hermético, lo que provocaba que el vapor de agua se condensara en la tapa y cayera nuevamente sobre la muestra. Para solucionar este problema, se propuso utilizar pequeñas cuñas de madera para elevar ligeramente la tapa. Esto permitió evitar la pérdida de material fino, mantener una circulación adecuada de aire y facilitar la salida del vapor de agua, optimizando así el proceso.

- Semana 4 – una vez estandarizado el procedimiento de ensayo se debía dar respuesta a la pregunta ¿La temperatura que maneja el horno microondas estipulado en la norma INV E- 135-13 será igual de efectiva en freidora de aire?

Ya con todos los obstáculos solucionados y con ánimo de comparar con el método de la norma INV E-135-13 se realizó un cambio de variable; Dado que la norma explica que se debe usar un horno microondas con un rango de potencia de 700W lo cual equivale en temperatura a 175°C cuando se calientan líquidos en un tiempo de 5 minutos aproximadamente.
Se realiza esta comparación. La prueba 1 y 2 son elaboradas a una temperatura de 200°C y la prueba 3-4 a 175°C.

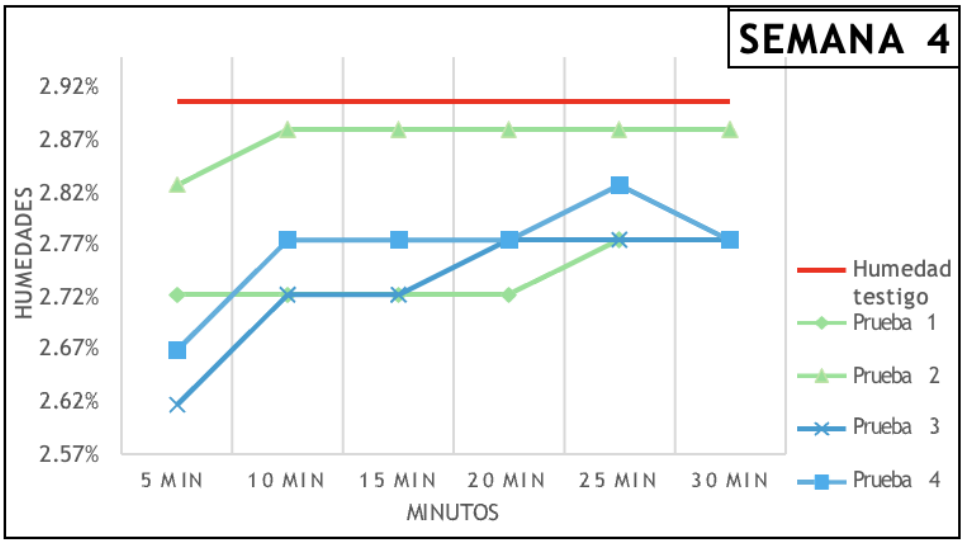


Gráfico 6. Semana 4 /Fuente: Propia

El análisis de los resultados obtenidos permitió determinar que, entre las pruebas realizadas, el error al trabajar a 200 °C es del 2.7%, mientras que, al emplear una temperatura de 175 °C, el error asciende al 4.3%. Esto confirma que la temperatura óptima de ensayo para este tipo de equipos es de 200 °C, ya que garantiza mayor precisión en la determinación del contenido de humedad, minimizando los errores asociados al procedimiento.

- Semana 5 – finalmente para estandarizar y dar confiabilidad al procedimiento definido se buscó dar respuesta a la pregunta ¿Puedo seguir aumentando el tiempo en la freidora aplicando las correcciones de las semanas anteriores y aun así obtener un resultado más acertado?

En la última semana se llevó a cabo un análisis comparativo de intervalos de tiempo, aplicando las correcciones derivadas de los resultados obtenidos en semanas anteriores. Este enfoque permitió ajustar los procedimientos de manera más precisa, asegurando una evaluación más confiable de los datos y optimizando los parámetros establecidos para futuros ensayos.

Para esta semana, se incrementaron los intervalos de tiempo en las pruebas: 5 minutos para las pruebas 3 y 4, y 10 minutos para las pruebas 1 y 2.

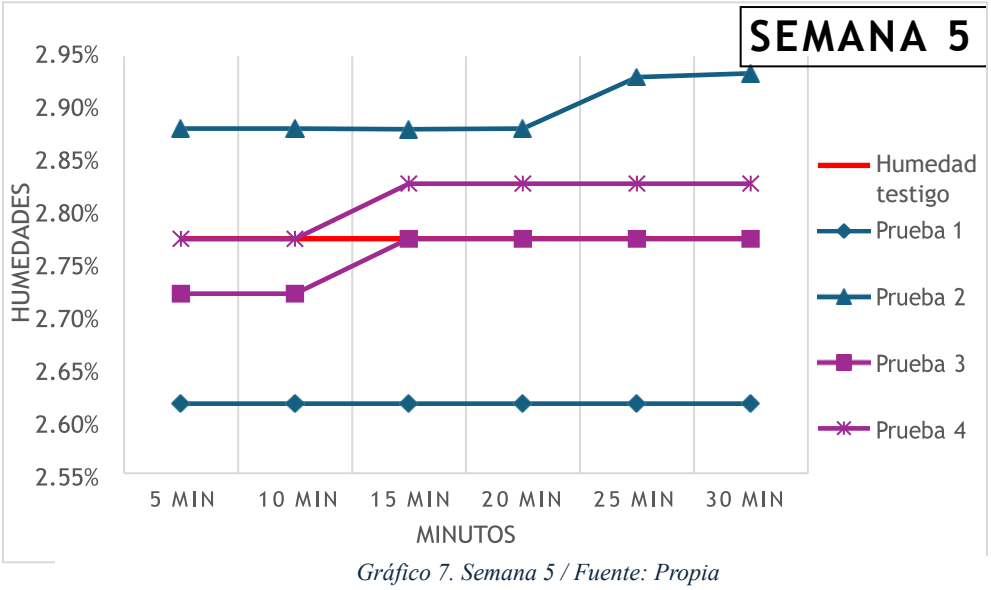


Gráfico 7. Semana 5 / Fuente: Propia

Los resultados se presentan en la gráfica 7, donde se observan diferencias en los tiempos de secado y en la estabilidad de los valores de humedad obtenidos, lo que permitió identificar un rango de tiempo óptimo para mejorar la precisión del ensayo.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante el desarrollo del proyecto, se evidenciaron diferencias significativas en el análisis de los datos obtenidos, dependiendo del método utilizado para la recolección y el procesamiento de las muestras. Al emplear crisoles sin tapa, se observó que parte del material se perdía en forma de partículas finas, lo que afectó la precisión de los resultados.

Este hallazgo resalta la importancia de utilizar equipos y procedimientos adecuados, como crisoles con tapa, para minimizar la pérdida de material y garantizar mediciones más confiables y representativas.

En contraste, el uso de crisoles con tapa provocó la formación de agua condensada en la superficie interna de la misma. Aunque esta agua eventualmente retornaba a la muestra, este fenómeno alteraba el contenido de humedad medido, resultando en datos inexactos.

Por otro lado, los resultados obtenidos mediante el método de cierre con cuñas de madera fueron significativamente más homogéneos, con valores más consistentes y cercanos a los establecidos en el método de secado en horno normalizado, según la norma **INV E-122**. Este método permitió una ventilación controlada del material, evitando tanto la pérdida de partículas como la condensación directa de la humedad sobre la muestra.

Estos hallazgos destacan la importancia de implementar un control adecuado de la ventilación durante el ensayo, lo que mejora significativamente la precisión en la determinación del contenido de agua en las muestras y asegura que los resultados sean más representativos y confiables.

	Error Absoluto	Error Relativo
Sin tapa	0,006988717	22,9%
	0,00646463	21,2%
Con tapa	0,001194092	3,9%
	0,001194092	3,9%

Tabla 9. Margen de error semana 3 / Fuente: Propia

Comparación de métodos investigados con la propuesta:

Método Capacitivo:

A la hora de comparar el método que Madera (2024, Perú) menciona, es notorio una gran diferencia puesto que son conceptos muy diferentes a la hora de identificar los principios que les respaldan. El método planteado por el autor designa que la obtención de datos se da por efectos termodinámicos llevándolo a lenguajes de voltajes y temperaturas mientras que la técnica presentada aquí es por método gravimétricos es decir diferencias en masas, mientras que una similitud que presenta es que ambos se pueden determinar en campo de una manera más rápida que el tradicional.

Método tradicional:

El método termogravimétrico es una técnica tradicional utilizada para la medición precisa del contenido de humedad en suelos o materiales. De hecho, es el método con el que se compararon los resultados, sin embargo, el objetivo fue optimizar esta práctica, reduciendo el tiempo de ensayo, pero manteniendo la precisión y seguridad de los datos. Cosa que se logro parametrizar y llegar a comparar, demostrando ventajas y limitaciones como un método considerado valido en un futuro.

Tensiómetros de Alta capacidad:

Este método genera datos de la humedad que posee un suelo de manera superficial, tiene un alcance de hasta 30 cm máximos de la capa del suelo, mientras que en lo planteado en este trabajo es indiferente esto puesto que puede ser una sección de cualquier parte del perfil que se presenta; La precisión que presenta el método presentado es mayor a la que se puede obtener en un tensiómetro puesto que es por gravimetría , mas respaldado y demostrado. El costo que refleja la obtención de un tensiómetro es casi 10 veces mas costoso que una freidora de aire.

Dispersión de Neutrones:

Aunque se puede generar una recopilación de datos amplia como la textura y porosidad del material a parte de su humedad, se debe recordar que es un método radiactivo que puede poner en peligro al operador en su desarrollo, en cuanto a costos, representa un capital mayor a la hora de obtenerlo.

Reflectometría en dominio del tiempo (TDR):

Es un método donde obtiene datos a través de pulsos de energía sin considerar que la presencia de sales podría causar una afectación en el resultado mientras que en los métodos gravimétricos no afectaría su composición mineralógica ni el resultado obtenido. El tema económico vuelve a estar de parte del uso de la freidora para obtención de humedades puesto que el equipo que complementa el TDR cuesta aproximadamente 9.7 lo que costaría una freidora convencional. Las limitaciones presentadas en el TDR son la influencia de tamaños de las partículas presentes en el suelo, la densidad que posea y la temperatura, por lo tanto en comparación al uso de la freidora es mas ventajoso.

Método de Rayos Gamma:
Aunque es un método mejorado respecto a la sonda de neutrones sigue siendo peligroso para el operador ya que utiliza el principio de la radiación, aunque se debe destacar que se obtiene una mejor resolución del perfil que se esta tomando, pero siendo un riesgo para su uso continuo.

Horno microondas:
El horno microondas en su momento fue una innovación sin embargo se presentan desventajas, una de ellas es la poca precisión que tiene para ajustar una temperatura especifica, lo que genera menos control y parametrización del método la escrito en la norma puesto que las condiciones se desconoce si se están igualando o no ; mientras que la freidora de aire tiene la opción de introducir la temperatura y no lleva el uso de disipador mientras que el microondas lo solicita. En precisión como también es gravimétrico no presenta tanta diferencia con el método tradicional.

Cada método tiene sus ventajas y limitaciones dependiendo de las necesidades que se quiera suplir, si se requiere la preservación del suelo, existen los métodos indirectos los cuales no intervienen en su configuración, si se requiere métodos más económicos el uso del microondas, sensores y freidora de aire son precisos, y si se necesita un método donde se complementé con resultados mas a detalle se puede seleccionar por ejemplo, el uso de rayos gamma. La selección del método será también dependiendo de la especificación que se requiera en obra y si será de uso civil o agricultor.

Ventajas del método propuesto:

1. Practicidad: Al ser una herramienta compacta y portátil, elimina la necesidad de transportar muestras a laboratorios para su análisis. Esto facilita y agiliza la toma de muestras de humedad directamente en campo, optimizando el tiempo y los recursos, ayudando a que las muestras no sufran alteraciones.

2. Reducción de costos: El método propuesto es más económico en comparación con los métodos tradicionales, como el uso de hornos de secado y el microondas. Esto se debe a que el equipo no es costoso, el sistema de recirculación de aire es similar al de los hornos e laboratorio y no requiere de grandes espacios físicos ni instalaciones especializadas, lo que lo hace accesible para proyectos con presupuestos limitados.

3. Eficiencia en campo: Permite obtener resultados de humedad de manera rápida y tener el equipo en el lugar de muestreo, lo que es especialmente útil en proyectos que requieren decisiones inmediatas o en áreas de difícil acceso.

4. Facilidad de uso: Su diseño intuitivo y sencillo reduce la curva de aprendizaje, permitiendo que técnicos y profesionales lo utilicen sin necesidad de capacitación extensa sobre su operación.

5. Ahorro de tiempo: Al eliminar el transporte de muestras y reducir los tiempos de secado en hornos tradicionales, el proceso se agiliza notablemente, lo que incrementa la productividad en proyectos de ingeniería o investigación. Además, al minimizar el transporte, se preserva mejor la integridad de las muestras, garantizando resultados más confiables. Un sistema de transporte eficiente y seguro es esencial para asegurar que las muestras lleguen en óptimas condiciones al laboratorio y evitar situaciones que puedan comprometer la salud de las personas o del medio ambiente.

Limitaciones para considerar:

1. Capacidad limitada: Debido a la capacidad del equipo, este método no es adecuado para grandes volúmenes de muestras.

2. Calibración necesaria: Debe verificarse que la temperatura y el tiempo de secado sean equivalentes a los del método estándar (horno de secado).

3. Materiales específicos: Algunos suelos, como los altamente orgánicos, aún pueden requerir métodos más especializados.

La determinación del contenido de agua en materiales especiales, como cenizas volcánicas, suelos residuales, suelos orgánicos y suelos estabilizados, presenta desafíos significativos cuando se utiliza el método de la freidora de aire. Este método, que se basa en la evaporación rápida del agua mediante el calentamiento con aire caliente, es ampliamente utilizado por su rapidez y simplicidad. Sin embargo, tiene limitaciones inherentes que pueden afectar la precisión y confiabilidad de los resultados en estos materiales específicos.

1. Composición química compleja

- Cenizas volcánicas: Estas pueden contener minerales y compuestos volátiles que se descomponen o liberan gases a temperaturas elevadas, lo que puede interferir con la medición del contenido de agua. Además, la presencia de materiales vítreos o amorfos puede retener agua de manera no convencional, dificultando su evaporación completa.

- Suelos orgánicos: Contienen materia orgánica que puede descomponerse térmicamente a las temperaturas utilizadas en la freidora de aire, liberando gases y vapor de agua que no provienen únicamente del contenido de humedad. Esto puede llevar a una sobreestimación del contenido de agua.

- Suelos residuales: Estos suelos pueden contener contaminantes o compuestos químicos que reaccionan o se volatilizan durante el calentamiento, lo que también puede distorsionar los resultados.

2. Retención de agua en microporos

   En materiales como suelos estabilizados o cenizas volcánicas, el agua puede estar retenida en microporos o estructuras cristalinas, lo que dificulta su evaporación completa incluso a altas temperaturas. Esto puede llevar a una subestimación del contenido de agua.

3. Temperaturas de descomposición

   Algunos materiales, especialmente los suelos orgánicos, pueden comenzar a descomponerse a temperaturas inferiores a las utilizadas en la freidora de aire. Esto puede generar pérdidas de masa que no están relacionadas con la evaporación del agua, lo que afecta la precisión del método.

4. Heterogeneidad del material

   La heterogeneidad de los materiales, como en el caso de suelos residuales o cenizas volcánicas, puede dificultar la obtención de una muestra representativa. Esto puede llevar a variabilidad en los resultados, especialmente si la distribución del agua no es uniforme.

5. Limitaciones en la calibración

   El método de la freidora de aire requiere una calibración adecuada para cada tipo de material, ya que la tasa de evaporación y la pérdida de masa pueden variar significativamente. Sin embargo, en materiales especiales, esta calibración puede ser complicada debido a la falta de estándares de referencia o a la variabilidad en las propiedades del material.

6. Interferencia de otros líquidos

En suelos residuales o contaminados, la presencia de otros líquidos (como solventes orgánicos) puede interferir con la medición del contenido de agua, ya que estos líquidos también se evaporan a altas temperaturas, lo que puede llevar a una sobreestimación del contenido de humedad.

7. Limitaciones en la reproducibilidad

Debido a las variaciones en las propiedades de los materiales especiales, la reproducibilidad de los resultados puede ser baja, especialmente si no se controlan adecuadamente las condiciones de calentamiento y la preparación de la muestra.

Los tiempos de exposición de los materiales finos y gruesos en la freidora de aire no son iguales, y esto se debe a diferencias en las propiedades físicas y la dinámica de secado de cada tipo de material. Los cuales varían según los siguientes factores:

1. Superficie expuesta al calor

- Materiales finos: Tienen una mayor superficie específica (superficie por unidad de masa) en comparación con los materiales gruesos. Esto permite que el calor penetre más rápidamente y que el agua se evapore de manera más eficiente. Por lo tanto, los materiales finos suelen requerir menos tiempo de exposición en la freidora.

- Materiales gruesos: Presentan una menor superficie específica y una estructura más compacta, lo que dificulta la penetración del calor hacia el interior de las partículas. Como resultado, el secado es más lento y se requiere más tiempo de exposición para asegurar que toda el agua se evapore.

2. Distribución del agua en el material

- Materiales finos: El agua tiende a distribuirse de manera más uniforme en la superficie de las partículas, lo que facilita su evaporación rápida.

- Materiales gruesos: El agua puede estar retenida en el interior de las partículas o en poros más grandes, lo que requiere más tiempo para que el calor llegue a estas zonas y evapore el agua.

3. Conductividad térmica

- Materiales finos: Al tener partículas más pequeñas, el calor se transfiere más rápidamente a través del material, lo que acelera el proceso de secado.

- Materiales gruesos: Las partículas más grandes actúan como aislantes térmicos, lo que retarda la transferencia de calor hacia el interior y prolonga el tiempo de secado.

4. Agregación y compactación

- Materiales finos: Tienden a formar agregados menos compactos, lo que permite una mejor circulación del aire caliente y una evaporación más rápida.

- Materiales gruesos: Pueden formar estructuras más compactas o densas, lo que dificulta la circulación del aire caliente y aumenta el tiempo necesario para secar el material.

5. Riesgo de sobrecalentamiento

- Materiales finos: Debido a su rápida evaporación, existe un mayor riesgo de sobrecalentamiento si el tiempo de exposición es excesivo, lo que podría alterar las propiedades del material o causar la descomposición de componentes orgánicos.

- Materiales gruesos: El riesgo de sobrecalentamiento es menor debido a la lenta transferencia de calor, pero el tiempo de exposición debe ser lo suficientemente largo para asegurar un secado completo.

Aunque varias muestras alcanzaron una masa constante antes de los 10 minutos establecidos como tiempo de referencia, se observó que, en promedio, este periodo era el más consistente para garantizar resultados precisos y confiables. Por lo tanto, se estipulo que 10 minutos es el tiempo óptimo para asegurar que todas las muestras alcancen una masa constante y, con ello, obtener mediciones de humedad más precisas. Este enfoque permitió estandarizar el proceso, asegurando repetibilidad y precisión en los resultados del ensayo.

CONCLUSIONES

- Con base en el análisis realizado, se concluye que el método de determinación de humedad utilizando una freidora de aire es una alternativa viable. Los resultados obtenidos fueron consistentes, sin mostrar variaciones significativas en función de la cantidad de muestra analizada. Además, se determinó que empleando un tiempo de 10 minutos y una temperatura de 200 °C y en crisoles con tapa, es posible medir con precisión el contenido de humedad del suelo, lo que valida la eficacia de este método de ensayo propuesto.

Sobre los márgenes de error relativos observados:

- Al trabajar en un rango de temperaturas entre 180 °C y 200 °C, el margen de error osciló entre el 2.7% y el 5.4%.
- Comparando el uso de crisoles con tapa y sin tapa, el margen de error fue más reducido, variando entre el 2.9% y el 3.9%.
- Dependiendo de la temperatura utilizada, entre 175 °C y 200 °C, el margen de error fluctuó entre el 2.7% y el 4.3%.

Estos resultados confirman que la freidora de aire es una herramienta válida y confiable para la determinación de la humedad del suelo, con márgenes de error relativamente bajos. Además, este dispositivo común, aplicado de manera innovadora, amplía su potencial uso en análisis de laboratorio, contribuyendo a la ingeniería y la geotecnia con una solución eficiente y económica.

RECOMENDACIONES

El desarrollo de este proyecto permitió identificar varios aspectos clave que podrían optimizar los procesos de investigación y mejorar la calidad de los resultados. Entre las recomendaciones más destacadas se encuentran:

1. Utilización de contenedores de cerámica:
   Los contenedores de cerámica presentan ventajas significativas, ya que no absorben agua, son extremadamente resistentes al calor y ofrecen mayor durabilidad y estabilidad durante el proceso.
2. Diseño de cuñas de madera como tapa:
   Este diseño permite una ventilación adecuada, evitando la acumulación de humedad en la tapa y la pérdida de material debido al ventilador. Esto resulta en mediciones más precisas y confiables.
3. Tamizado de la muestra:
   Es esencial tamizar las muestras según el estándar INV E-122, ajustando la cantidad y el tamaño de las partículas al tipo de tamiz utilizado. Esto asegura que las pruebas sean estandarizadas, repetibles y comparables.
4. Calibración de equipos:
   La calibración periódica de la freidora de aire es fundamental para garantizar resultados confiables y consistentes.
5. Uso de una balanza de precisión:
   Una balanza de alta precisión reduce los márgenes de error y mejora la fiabilidad de los resultados finales.

La adopción de estas recomendaciones permitirá un mayor control, consistencia y precisión en pruebas futuras, fortaleciendo el rigor y la efectividad del proceso investigativo.

BIBLIOGRAFÍA

- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *INV E-122: Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo- agregado*. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *INV E-135: Método para determinar la humedad de los suelos usando el horno microondas*. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *INV E-103: Conservación y transporte de muestras de suelos*. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *INV E-201: Muestreo de agregados para construcción de carreteras*. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *INV E-123: Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos*. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *INV E-133: Equivalente de arena de suelos y agregados finos*. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *INV E-222: Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino*. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- American Society for Testing and Materials. (s.f.). *ASTM D2216: Método de prueba estándar para la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo y rocas por masa*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *INV E-121: Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición*. Bogotá, Colombia: INVIAS
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. Determinación del contenido de humedad. Pennsylvania, USA: ASTM D 2216-98 y ASTM D4643, 1991. Determinación del contenido de humedad (ASTM D2216-98). [En línea].
- http://www.geotecnia.edu.bo/administrador/manual/Humedad.pdf. [Citado en 2006- 04-01] Efecto Peltier, efecto Seebeck, efecto Thomson. [En línea].
- http://www.monico.com.ar/ufe.htm. [Citado en 2006-12-12] Hilarión, D. y Gámez, C. “Determinación de humedad en suelos granulares utilizando horno microondas y comparación de los resultados con el método tradicional”.

- Trabajo de grado. Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá, 2006. NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES PARA CARRETERAS.
- Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. Santa Fe de Bogotá, D.C.: I.N.V E-122, 1998. Termocuplas. [En línea].
- http://electronica.eia.edu.co/PROYECTOS/biomedica-/medidordetemperatura.htm. [Citado en 2006-06-15]
- Corredor, F. A., & Moreno Fonseca, Y. J. (2011). *Obtención del contenido de humedad en suelos finos, usando horno microondas sin reductor de calor empleando una potencia de 400W*. Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil. Bogotá D.C., Colombia.
- Referencia: Carranza-Díaz, A.K.; Camacho-Tamayo, J.H.; Rubiano-Sanabria, Y. 2023. Validación de un modelo para la estimación del contenido de agua del suelo mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2329.
- Peña, D., Ortiz, J., Miranda, H., & Peroza, D. (2013). Bloques de Resistencia Eléctrica de Diferentes Materiales para Determinar la Humedad del Suelo. Revista Unellez de Ciencia y Tecnología, 31, 57-64.
- Moreira, S. C., Olmo, C. P., & Valle, K. R. R. (2017). Medición del contenido de humedad de un suelo ferralítico con ayuda del método dieléctrico. Universidad & ciencia, 6, 140-149.
- Florentino, A. (2006). Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. *Venesuelos*, *14*(1), 48-70.
- ASTM International. (2017). ASTM D4643-17: Standard test method for determination of water (moisture) content of soil by microwave oven heating. ASTM International
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2018). NTP 339.185: Determinación del contenido de humedad en los agregados por secado. INACAL.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE). (2018). NMX-C-166-ONNCCE-2018: Determinación del contenido de humedad en los agregados por secado. ONNCCE.
- ASTM International. (2019). ASTM D2216-19: Standard test method for determination of water (moisture) content of soil and rock by microwave oven heating. ASTM International.

- Ticona Medrano, M. M. (2019). Determinación de la correlación entre el contenido de humedad en arena fina de Cunyac, obtenidos mediante los métodos: horno microondas y sensor resistivo, aplicado en la supervición de obras de construcción.
- https://www.academia.edu/8095293/Capítulo_10_Suelos_Residuales
- https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/b67772c4-bfbd-4330-8e9c-5453471b4d9c/content
- Rayón Encinas, E., & López Martínez, J. (2020). Propiedades termoeléctricas de los materiales. Efecto Seebeck y Peltier. Fundamentos teóricos y propuesta experimental.
- le Roux, P. F., and Jacobsz, S. W. (July 1, 2021). "Performance of the Tensiometer Method for the Determination of Soil-Water Retention Curves in Various Soils." ASTM International. Geotech. Test. J.. July 2021; 44(4): 1079–1096. https://doi.org/10.1520/GTJ20200196
- Hosseini, M., Arif, M., Keshavarz, A., & Iglauer, S. (2021). Neutron scattering: A subsurface application review. *Earth-Science Reviews*, *221*, 103755.
- *Bittelli, M., Tomei, F., Anbazhagan, P., Pallapati, R. R., Mahajan, P., Meisina, C., ... & Valentino, R. (2021). Measurement of soil bulk density and water content with time domain reflectometry: Algorithm implementation and method analysis. Journal of Hydrology, 598, 126389.*
- Wan, H., Qi, H., & Shang, S. (2023). Estimating soil water and salt contents from field measurements with time domain reflectometry using machine learning algorithms. Agricultural Water Management, 285, 108364.
- Qin, A., Ning, D., Liu, Z., & Duan, A. (2021). Analysis of the accuracy of an FDR sensor in soil moisture measurement under laboratory and field conditions. Journal of Sensors, 2021(1), 6665829. ISO 690
- *Yu, L., Gao, W., Shamshiri, R. R., Tao, S., Ren, Y., Zhang, Y., & Su, G. (2021). Review of research progress on soil moisture sensor technology. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 14(4), 32-42.*

DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN MUESTRAS DE SUELO, ROCA MEDIANTE AIR FRYER (FREIDORA DE AIRE) INV E – 137 BORRADOR Y PROPUESTA

1. OBJETO

1.1 Esta norma de ensayo establece el procedimiento para determinar el contenido de agua (humedad) en suelos mediante secado en una freidora de aire.

1.2 Este método de ensayo puede utilizarse como alternativa a los procedimientos descritos en las normativas INV E-122 e INV E-135 cuando se requiera obtener resultados con mayor rapidez, agilizando otras fases del control.

1.3 En caso de dudas sobre la precisión de ambos métodos, se debe dar prioridad al procedimiento establecido en la norma INV E-122.

2. DEFINICIONES

2.1 Las siguientes definiciones son aplicables al contenido de esta norma:

2.1.1 Contenido de agua por masa - Relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros (agua libre) del material y la masa de sus partículas sólidas. Para determinar la masa del agua, se debe utilizar una temperatura de referencia de 200 °C (392 °F).

2.1.2 Masa seca constante - Estado alcanzado por un material cuando un calentamiento posterior produce una pérdida de masa adicional inferior al 1 % o al 0.1 %. El tiempo necesario para alcanzar la masa constante depende de diversos factores, cuya influencia puede evaluarse con el criterio del operario y su experiencia con el equipo y el material en ensayo.

2.1.3 Contenido de agua – Relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua libre o de poros existente en un suelo y la masa de sus partículas sólidas.

2.1.4 Calentamiento por freidora de aire – Proceso mediante el cual se aplica calor a un material mediante el calentamiento del aire por resistencias eléctricas. El aire caliente se distribuye uniformemente mediante un ventilador, envolviendo el material de manera rápida y eficiente.

BORRADOR EN CONSTRUCCIÓN

3. RESUMEN DEL MÉTODO

3.1 Se coloca un espécimen de suelo húmedo en un recipiente adecuado y se determina su masa inicial. A continuación, la muestra se cubre con una tapa que permita la circulación del vapor de agua y se introduce en una freidora de aire a 200 °C (392 °F), donde se seca hasta alcanzar una masa constante. La masa perdida durante el secado se considera equivalente al agua contenida en la muestra, mientras que la masa restante corresponde al suelo seco. El contenido de agua se calcula comparando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca.

4. IMPORTANCIA Y USO

4.1 El contenido de agua del suelo es fundamental en toda práctica de ingeniería geotécnica, tanto en el laboratorio como en campo. El método descrito en la normativa INV E-122 para determinar la humedad puede ser lento, por lo que en ciertas situaciones es necesario utilizar un método más rápido. El secado en horno microondas y en freidora de aire son alternativas viables.

4.2 El contenido de agua es una de las propiedades índice más relevantes de los materiales, y se emplea para establecer correlaciones con el comportamiento de los suelos.

4.3 El contenido de agua se utiliza en la mayoría de las ecuaciones que relacionan las fases de aire, agua y sólidos en un volumen determinado de material.

4.4 Debido a las altas temperaturas localizadas a las que se expone el espécimen, pueden producirse alteraciones en las características físicas del suelo, como la degradación de partículas individuales, la vaporización y posibles transformaciones químicas. Por lo tanto, se recomienda que las muestras utilizadas en este método de ensayo no se empleen en otros ensayos después del secado.

5. EQUIPO

5.1 Freidora de Aire – Equipo debidamente calibrado, controlado termostáticamente y con temporizador, que contenga circulación de aire caliente y pueda mantener una temperatura uniforme de 200° C (392° F) en toda la cámara.

5.2 Balanzas - Con una legibilidad de 0.01 g para muestras que tengan una masa de 200 g o menos; y una legibilidad de 0.1 g para muestras que tengan una masa mayor de 200

BORRADOR EN CONSTRUCCION

g. En cualquier caso, la balanza utilizada deberá ser controlada por el número necesario de dígitos significativos (Ver numeral 1.7).

5.3 Recipientes para las muestras - Los recipientes para las muestras deben ser adecuados y estar fabricados con un material resistente a la corrosión, así como a cambios en su masa debido a calentamientos y enfriamientos repetidos. También deben soportar la exposición a materiales con distintos niveles de pH y resistir operaciones de limpieza. El recipiente debe contar con una tapa que permita una evaporación controlada del agua, evitando al mismo tiempo la dispersión de partículas del material.

5.4 Aparato para el manejo de las muestras - Apropiado para mover y manejar los recipientes calientes luego del secado de las muestras.

5.5 Elementos misceláneos - Guantes resistentes al calor, cuchillos, espátulas, cucharas, lona para cuartear, seguetas, etc.

6. PELIGROS

6.1 Los recipientes calientes se deben manejar con sujetadores adecuados. Algunos tipos de suelos pueden retener un calor considerable y podrían dar lugar a serias quemaduras como resultado de un manejo inapropiado, por cuanto se recomienda adoptar las medidas de seguridad necesarios.

7. MUESTRAS

7.1 Antes del ensayo, las muestras se deben almacenar en recipientes herméticos no corrosibles, a una temperatura entre 3 y 30° C (37 a 86° F) y en un área en la cual no tengan contacto directo con la luz solar. Las muestras alteradas que se encuentren en vasijas u otros recipientes deberán ser almacenadas de manera de prevenir o minimizar la condensación de humedad en las paredes internas de los recipientes.

7.2 La determinación del contenido de agua debe realizarse lo antes posible después del muestreo, especialmente si los recipientes utilizados son potencialmente corrosivos, como tubos de acero de pared delgada, latas de pintura o bolsas plásticas.

8. ESPÉCIMEN DE ENSAYO

8.1 Para la determinación del contenido de agua con el propósito de utilizar el resultado como insumo en otro ensayo, se debe emplear la cantidad de muestra establecida en la

BORRADOR EN CONSTRUCCIÓN

norma que regula dicho ensayo. Si la norma correspondiente no especifica una cantidad, se aplicarán los valores indicados posteriormente en este documento.

8.2 La masa mínima del espécimen de material húmedo, seleccionado como representativo de la muestra total, debe determinarse en función del tamaño máximo de partícula, el cual se identifica mediante examen visual. Tanto la masa mínima de la muestra como la precisión de la balanza utilizada para el pesaje deben cumplir con los requisitos especificados en la Tabla 122-1.

9. SELECCIÓN DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO

9.1 Cuando el espécimen para el ensayo sea una porción de una cantidad mayor de material, se deberá seleccionar de manera que sea representativo de la condición de humedad de la totalidad del material. La manera como se seleccione el espécimen de ensayo depende del propósito y de la aplicación del resultado de la prueba, del tipo de material que se ensaya, de la condición del agua y de la clase de muestra (proveniente de otro ensayo, bolsa, bloque, etc.)

9.2 En el caso de muestras alteradas, tales como muestras desbastadas, muestras de bolsa, etc., el espécimen de muestra se debe obtener por medio de uno de los métodos que se describen a continuación (listados en orden de preferencia):

9.2.1 Si el material puede ser manejado sin pérdida significativa de humedad y sin que se produzca segregación, deberá ser mezclado completamente, seleccionando luego una porción representativa con una pala de tamaño tal, que solo se requieran unas pocas paladas para obtener el tamaño apropiado del espécimen.

9.2.2 Si el material es tal que no puede ser mezclado totalmente, o mezclado y muestreado con una pala, se forma una pila, mezclándolo tanto como sea posible.

9.2.3 Si el material o las condiciones son tales que no permiten la formación de una pila, se deben recoger tantas porciones como resulte práctico, usando lugares escogidos al azar que representen bien la condición de humedad del material. Todas las porciones se deben combinar para obtener el espécimen de ensayo.

9.3 Los especímenes se deben preparar y procesar tan pronto como sea posible, para minimizar pérdidas de humedad no registradas, lo que se traduciría en determinaciones erróneas de contenido de agua.

BORRADOR EN CONSTRUCCIÓN

10. PROCEDIMIENTO

10.1 Se determina y registra la masa de un recipiente limpio y seco (y su tapa, si ella se usa).

10.2 Se escoge una muestra de ensayo representativa, de acuerdo con la Sección 9.

10.3 Se pesa el recipiente en la balanza adecuada y se añade la muestra del material, hasta llegar a la cantidad indicada en la Tabla 122-1; y se le coloca la tapa con las cuñas que permitan la circulación de vapor de agua

10.4 Se coloca el recipiente con el material húmedo en la freidora de aire para secar el material hasta que alcance masa constante. La freidora se mantiene a una temperatura de 200° C (392° F). El tiempo requerido para alcanzar la masa constante varía dependiendo del tipo de material, del tamaño del espécimen, del tipo y capacidad de la cámara del equipo y otros factores. Generalmente, la influencia de estos factores se puede establecer usando el buen juicio y la experiencia adquirida con los materiales que están siendo ensayados y la capacidad del equipo utilizado

10.4.1 En la mayoría de los casos, el secado de una muestra se encuentra en un rango de 10 a 15 minutos.

10.5 Después de que el material se haya secado a masa constante, se retira el recipiente. Se permite que el conjunto material y recipiente se enfríen a la temperatura ambiente o hasta que el recipiente pueda ser manejado fácilmente con ambas manos y la operación de pesaje no se vea afectada por corrientes de convección y/o transmisión de calor. Se determina la masa del recipiente con la muestra secada en el horno, usando la misma balanza usada en la operación descrita en el numeral 5.2. Se registra este valor. Se deberán usar tapas de ajuste a presión siempre que se ensayen especímenes que absorban humedad del aire antes de determinarles la masa seca.

BORRADOR EN CONSTRUCCION

11. CÁLCULOS

11.1 Se calcula el contenido de agua del material con la fórmula:

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_C} \times 100 = \frac{W_W}{W_S} \times 100$$

Donde: w: Contenido de agua, %;

W_1: $Masa\ del\ recipiente\ con\ el\ espécimen\ húmedo, g$;
W_2: $Masa\ del\ recipiente\ con\ el\ espécimen\ seco, g$;
W_c: $Masa\ del\ recipiente, g$;
W_w: $Masa\ del\ agua, g$;
W_s: $Masa\ de\ las\ partículas\ sólidas, g$;

12. INFORME

12.1 El informe (hoja de resultados) debe incluir lo siguiente:

12.1.1 Identificación de la muestra (material), indicando número de perforaciones, número de muestra, número de ensayos, número de recipientes, etc.

12.1.2 Contenido de agua del espécimen con los cálculos proporcionados.

12.1.3 Se debe indicar si el espécimen de muestra contenía más de un tipo de suelo (estratificado, etc.).

12.1.4 Se debe indicar si se empleó una temperatura de secado diferente a la establecida en la normativa

12.1.5 Se debe indicar si algún material (tamaño y cantidad) fue excluido del espécimen de prueba.

13. PRECISIÓN Y SESGO

13.1 Precisión - No se presentan datos sobre precisión, debido a la naturaleza de los materiales ensayados según esta norma.

13.2 Sesgo - No hay un valor de referencia aceptado para este método de ensayo; por consiguiente, no se puede determinar el sesgo.

14. NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 4643 – 08
ASTM D 2216 – 10
INV E – 122
INV E – 135

BORRADOR EN CONSTRUCCIÓN

GRANULOMETRÍA FINO - CARACTERÍSTICA FÍSICA DE LOS AGREGADOS
ASTM D422

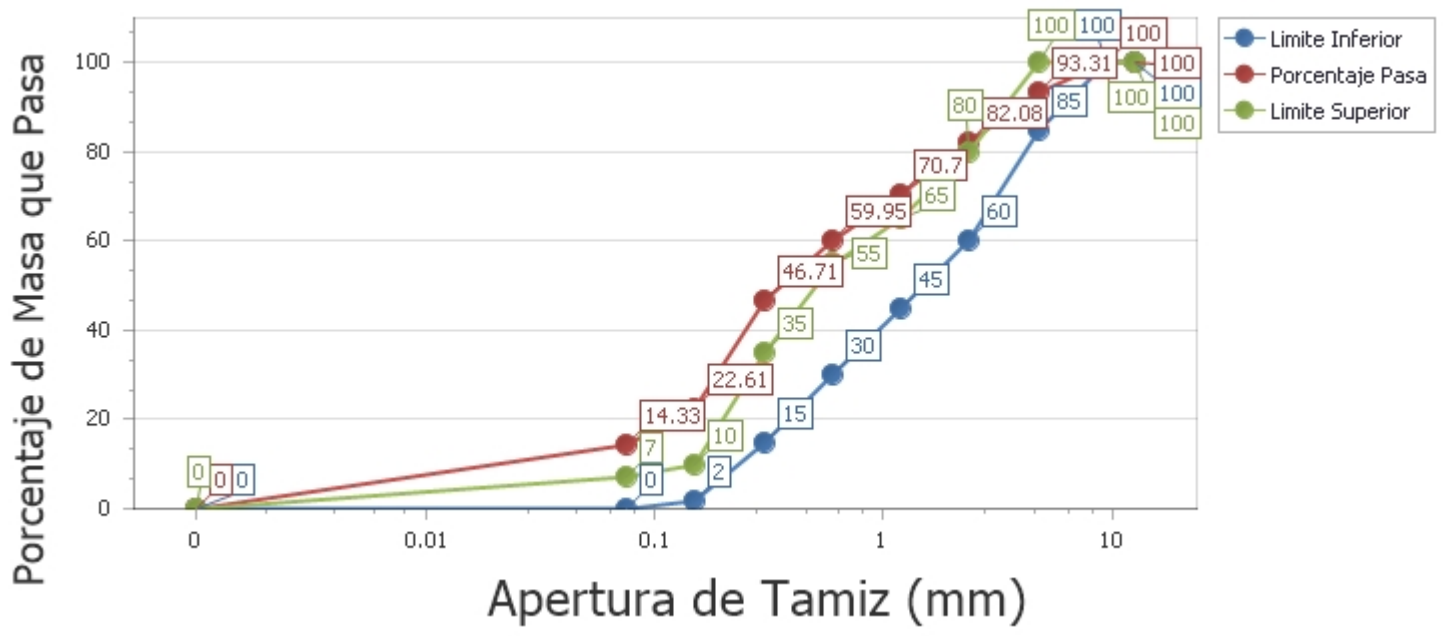
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina:	AG-CORAME	**Planta:**	CO-LTC
Material:	Arena Gruesa	**Muestra:**	CO-LTCX - AREGRU - 873
Fecha de Toma:	8/5/2024 12:00:00 AM	**Fecha de Ensayo:**	09/08/2024

RESULTADOS

ABERTURA TAMIZ		MASA RETENIDA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASA (%)	LIMITE INFERIOR (%)	LIMITE SUPERIOR (%)
mm	in	(g)					
12.5	1/2	0	0	0	100	100	100
9.5	3/8	0	0	0	100	100	100
4.76	N° 4	61	6.69	6.69	93.31	85	100
2.38	N° 8	102.4	11.23	17.92	82.08	60	80
1.19	N° 16	103.8	11.38	29.3	70.7	45	65
0.6	N° 30	98	10.75	40.05	59.95	30	55
0.3	N° 50	120.7	13.24	53.29	46.71	15	35
0.15	N° 100	219.8	24.1	77.39	22.61	2	10
0.075	N° 200	75.5	8.28	85.67	14.33	0	7
	Fondo	130.7	14.33	100	0	0	0

GRANULOMETRÍA



GRANULOMETRÍA FINO - CARACTERÍSTICA FÍSICA DE LOS AGREGADOS
ASTM D422

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina:	AG-CORAME	**Planta:**	CO-LTC
Material:	Arena Gruesa	**Muestra:**	CO-LTCX - AREGRU - 873
Fecha de Toma:	8/5/2024 12:00:00 AM	**Fecha de Ensayo:**	09/08/2024

INFORMACIÓN

Modulo de Finura	2.25	
Materia Organica	1	
pH	4	
Masa Inicial Humedad	1,000.00	g
Masa Inicial Seca	912.10	g
Humedad	9.64	%
Pasa Tamiz 200	14.33	g
Sumatoria Masas Retenidas	911.90	g
Fondo después de Tamizado	13.20	g
Masa Final Seca Despues de Lavado sobre Tamiz de 0,0075 mm	794.60	g

OBSERVACIONES

ARENA CORAME SIN LAVAR EN PROCESO DE EXPLOTACIÓN.

ELABORÓ

REVISÓ

REGISTRO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN EN AGREGADOS FINOS
ASTM C128

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina:	AG-CORAME	**Planta:**	CO-LTC
Material:	Arena Gruesa	**Muestra:**	CO-LTCX - AREGRU - 873
Fecha de Toma:	05/08/2024	**Fecha de Ensayo:**	08/08/2024

RESULTADOS

Masa Muestra Seca:	485.80 g	**Densidad Aparente:**	2.41 g/cm3
Masa Muestra SSS:	500.00 g	**Densidad Apente SSS:**	2.48 g/cm3
Masa Muestra en Agua:	677.20 g	**Densidad Nominal:**	2.60 g/cm3
Masa del Picnómetro con Agua hasta su Capacidad y Muestra:	975.80 g	**Absorción**	2.92 %

OBSERVACIONES

ARENA CORAME SIN LAVAR EN PROCESO DE EXPLOTACIÓN.



ELABORÓ

REVISÓ

EQUIVALENTE DE ARENA EN SUELOS Y AGREGADOS FINOS
ASTM D2419

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina:	AG-CORAME	**Planta:**	CO-LTC
Material:	Arena Gruesa	**Muestra:**	CO-LTCX - AREGRU - 873
Fecha de Toma:	05/08/2024	**Fecha de Ensayo:**	21/08/2024

RESULTADOS

ARCILLA	ARENA	EQUIVALENTE (%)
13.8	3.5	25
13.7	3.5	26
13.6	3.4	25
EQUIVALENTE PROMEDIO		**25** %

OBSERVACIONES

ARENA CORAME SIN LAVAR EN PROCESO DE EXPLOTACIÓN.

ELABORÓ

REVISÓ

Anexo Tablas y graficos

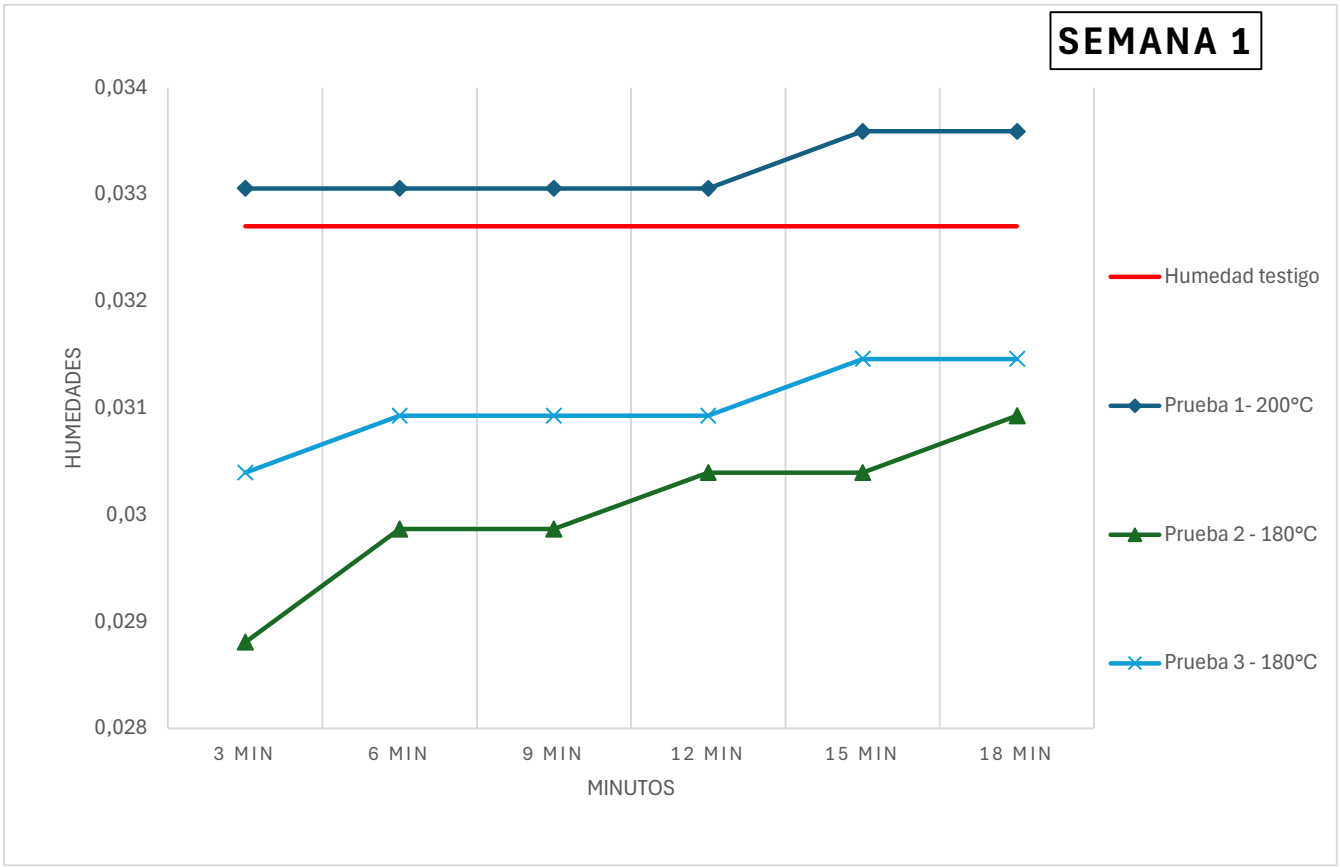
SEMANA 1 (Sin tapa)							
	Recipiente	Temperatura	Tiempo	Wo	Wf	W %	W% final
Testigo	1	110±5	11.1 h	20	19,37	3,25%	3,27%
	2			20	19,36	3,31%	
	3			20	19,37	3,25%	
Prueba	4	200	3 min	20	19,36	3,31%	3,36%
			6 min	20	19,36	3,31%	
			9 min	20	19,36	3,31%	
			12 min	20	19,36	3,31%	
			15 min	20	19,35	3,36%	
			18 min	20	19,35	3,36%	
Prueba	1	180	3 min	20	19,44	2,88%	3,09%
			6 min	20	19,42	2,99%	
			9 min	20	19,42	2,99%	
			12 min	20	19,41	3,04%	
			15 min	20	19,41	3,04%	
			18 min	20	19,4	3,09%	
Prueba	2	180	3 min	20	19,41	3,04%	3,15%
			6 min	20	19,4	3,09%	
			9 min	20	19,4	3,09%	
			12 min	20	19,4	3,09%	
			15 min	20	19,39	3,15%	
			18 min	20	19,39	3,15%	

SEMANA 2 (Sin tapa)							
	Recipiente	Temperatura	Tiempo	Wo	Wf	W %	W% final
Testigo	3	110±5	24 h	20	19,42	2,99%	2,93%
	4			20	19,44	2,88%	
	1			20	19,43	2,93%	
Prueba	3	200	3 min	20	19,43	2,93%	3,04%
			6 min	20	19,43	2,93%	
			9 min	20	19,42	2,99%	
			12 min	20	19,41	3,04%	
			15 min	20	19,41	3,04%	
			18 min	20	19,41	3,04%	
Prueba	4	200	3 min	20	19,44	2,88%	2,99%
			6 min	20	19,44	2,88%	
			9 min	20	19,43	2,93%	
			12 min	20	19,42	2,99%	
			15 min	20	19,42	2,99%	
			18 min	20	19,42	2,99%	
Prueba con cambio de intervalos de tiempo	3	200	3 min	20	18,71	6,89%	8,17%
			9 min	20	18,6	7,53%	
			15 min	20	18,55	7,82%	
			21 min	20	18,49	8,17%	
Prueba con cambio de intervalos de tiempo	4	200	3 min	20	19,51	2,51%	7,87%
			9 min	20	18,64	7,30%	
			15 min	20	18,61	7,47%	
			21 min	20	18,54	7,87%	

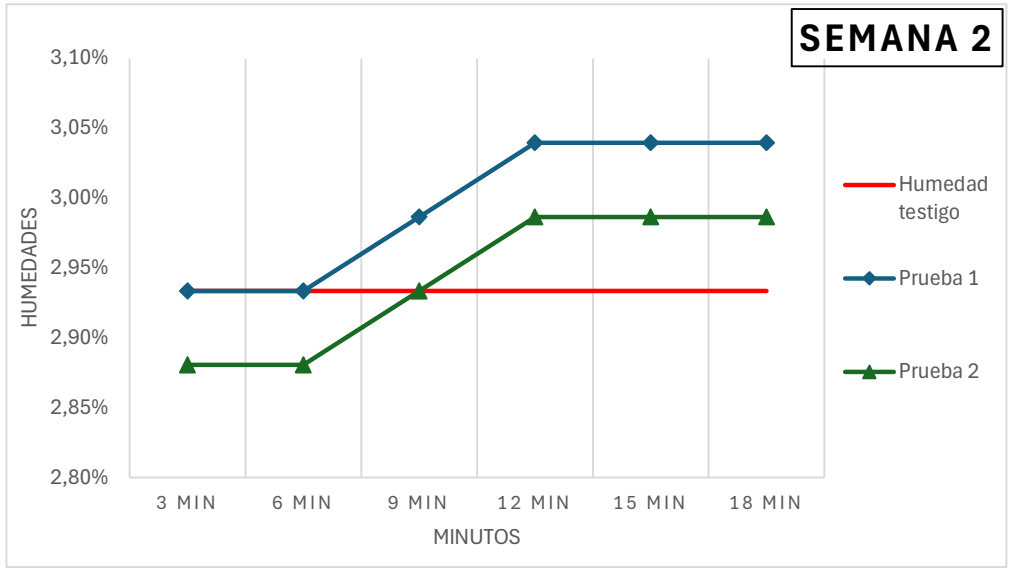
SEMANA 3 (Con tapa vs sin tapa)							
	Recipiente	Temperatura	Tiempo	Wo	Wf	W %	W% final
Testigo	1	110±5	24 H	20	19,42	2,99%	3,05%
	2			20	19,41	3,04%	
	3			20	19,38	3,20%	
	4			20	19,42	2,99%	
Prueba sin tapa	1	200	3 min	20	19,6	2,04%	2,35%
			6 min	20	19,54	2,35%	
			9 min	20	19,54	2,35%	
			12 min	20	19,54	2,35%	
			15 min	20	19,54	2,35%	
			18 min	20	19,54	2,35%	
Prueba sin tapa	2	200	3 min	20	19,59	2,09%	2,41%
			6 min	20	19,54	2,35%	
			9 min	20	19,54	2,35%	
			12 min	20	19,53	2,41%	
			15 min	20	19,53	2,41%	
			18 min	20	19,53	2,41%	
Prueba con tapa	3	200	3 min	20	19,54	2,35%	2,93%
			6 min	20	19,44	2,88%	
			9 min	20	19,44	2,88%	
			12 min	20	19,44	2,88%	
			15 min	20	19,43	2,93%	
			18 min	20	19,43	2,93%	
			21 min	20	19,43	2,93%	
Prueba con tapa	4	200	3 min	20	19,48	2,67%	2,93%
			6 min	20	19,46	2,77%	
			9 min	20	19,46	2,77%	
			12 min	20	19,45	2,83%	
			15 min	20	19,45	2,83%	
			18 min	20	19,43	2,93%	
			21 min	20	19,43	2,93%	

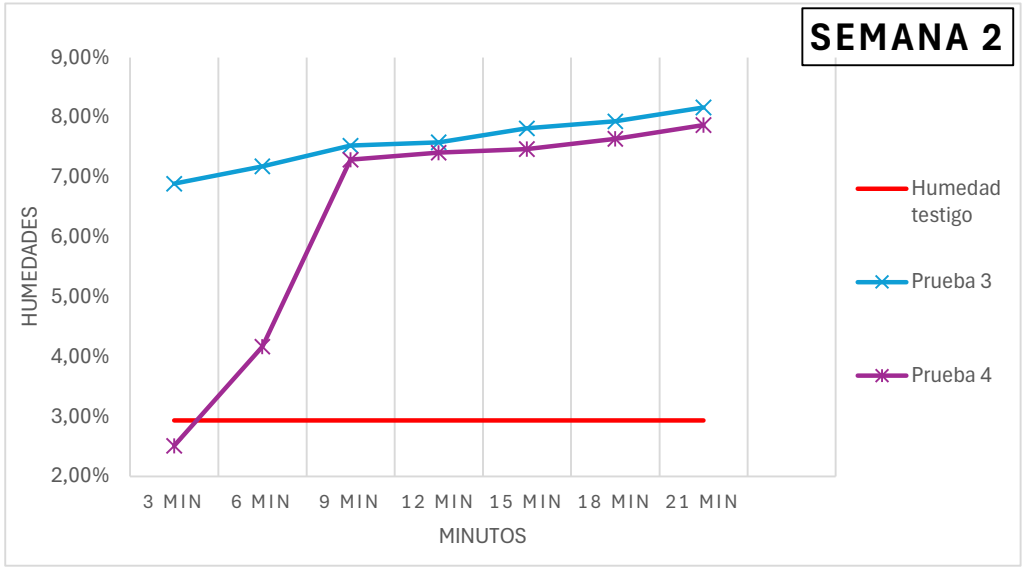
SEMANA 4 - 200°C vs 175°C mismos intervalos de tiempo con tapa								
Testigo	Recipiente	Temperatura	Tiempo	Wo	Wf	W %	W% final	Promedio W%
	1	110±5	22 H	20	19,44	2,88%	2,91%	
	2			20	19,43	2,93%		
Prueba 200°C	3	200	5 min	20	19,47	2,72%	2,77%	2,83%
			10 min	20	19,47	2,72%		
			15 min	20	19,47	2,72%		
			20 min	20	19,47	2,72%		
			25 min	20	19,46	2,77%		
			30 min	20	19,46	2,77%		
Prueba 200°C	4		5 min	20	19,45	2,83%	2,88%	
			10 min	20	19,44	2,88%		
			15 min	20	19,44	2,88%		
			20 min	20	19,44	2,88%		
			25 min	20	19,44	2,88%		
			30 min	20	19,44	2,88%		
Prueba 175°C	1	175	5 min	20	19,49	2,62%	2,77%	2,77%
			10 min	20	19,47	2,72%		
			15 min	20	19,47	2,72%		
			20 min	20	19,46	2,77%		
			25 min	20	19,46	2,77%		
			30 min	20	19,46	2,77%		
Prueba 175°C	2		5 min	20	19,48	2,67%	2,77%	
			10 min	20	19,46	2,77%		
			15 min	20	19,46	2,77%		
			20 min	20	19,46	2,77%		
			25 min	20	19,45	2,83%		
			30 min	20	19,46	2,77%		

SEMANA 5 - Estandarizar tiempos								
Testigo	Recipiente	Temperatura	Tiempo	Wo	Wf	W %	W% final	Promedio W%
	1	110±5	11,1 H	20	19,47	2,72%	2,77%	
	2			20	19,45	2,83%		
	3			20	19,46	2,77%		
	4			20	19,46	2,77%		
Prueba cada 10 min	1	200	10 min	20	19,49	2,62%	2,62%	2,78%
			20 min	20	19,49	2,62%		
			30 min	20	19,49	2,62%		
Prueba cada 10 min	2	200	10 min	20	19,44	2,88%	2,93%	
			20 min	20	19,44	2,88%		
			30 min	20	19,43	2,93%		
Prueba cada 5 min	3	200	5 min	20	19,47	2,72%	2,77%	2,80%
			10 min	20	19,47	2,72%		
			15 min	20	19,46	2,77%		
			20 min	20	19,46	2,77%		
			25 min	20	19,46	2,77%		
			30 min	20	19,46	2,77%		
Prueba cada 5 min	4	200	5 min	20	19,46	2,77%	2,83%	
			10 min	20	19,46	2,77%		
			15 min	20	19,45	2,83%		
			20 min	20	19,45	2,83%		
			25 min	20	19,45	2,83%		
			30 min	20	19,45	2,83%		


SEMANA 1
0,034
0,033
0,032
0,031
0,03
0,029
0,028
HUMEDADES
3 MIN
6 MIN
9 MIN
12 MIN
15 MIN
18 MIN
MINUTOS
Humedad testigo
Prueba 1- 200°C
Prueba 2 - 180°C
Prueba 3 - 180°C

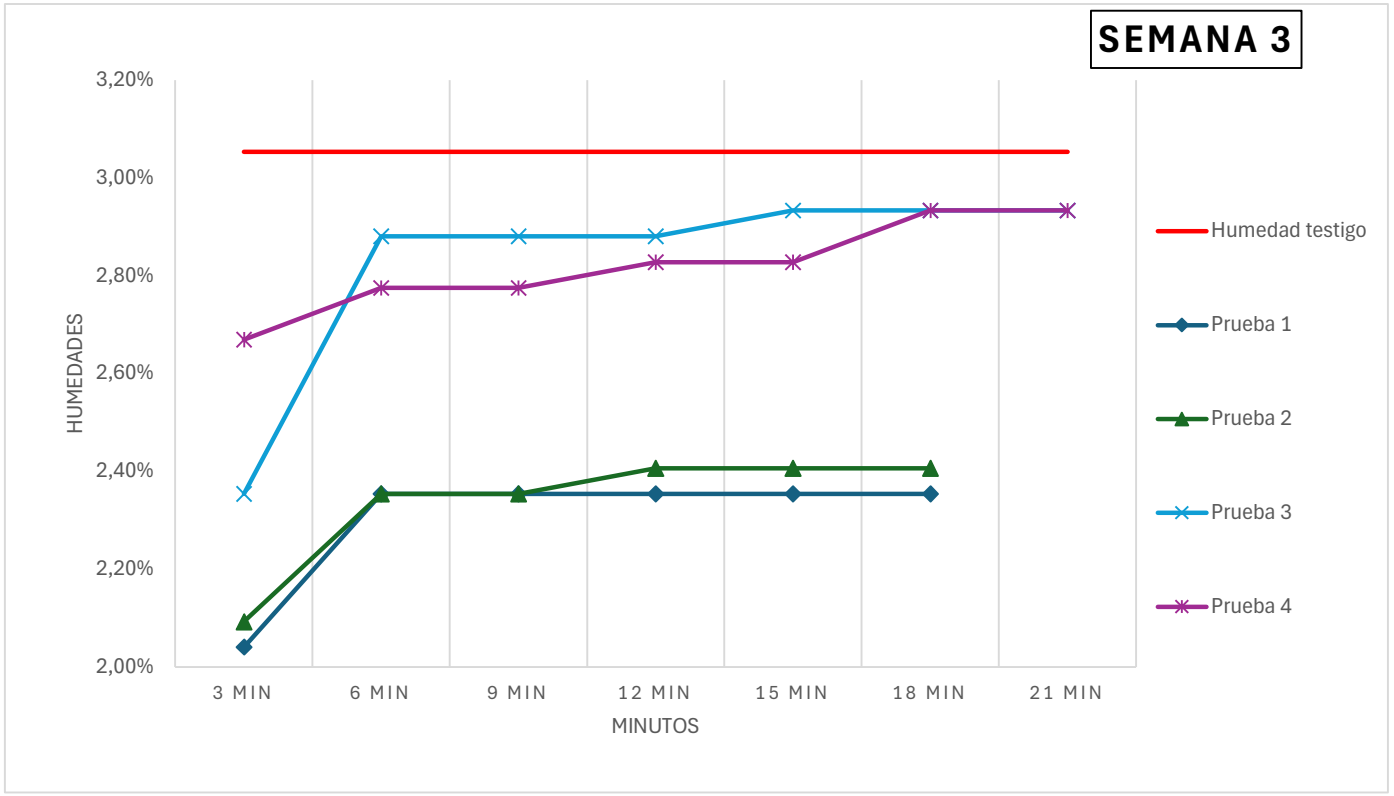
	Error Absoluto	Error Relativo
Sin cambio	0,001060443	3,6%
	0,000529857	1,8%
Cambio intervalo	0,052329505	178,4%
	0,049412392	168,4%



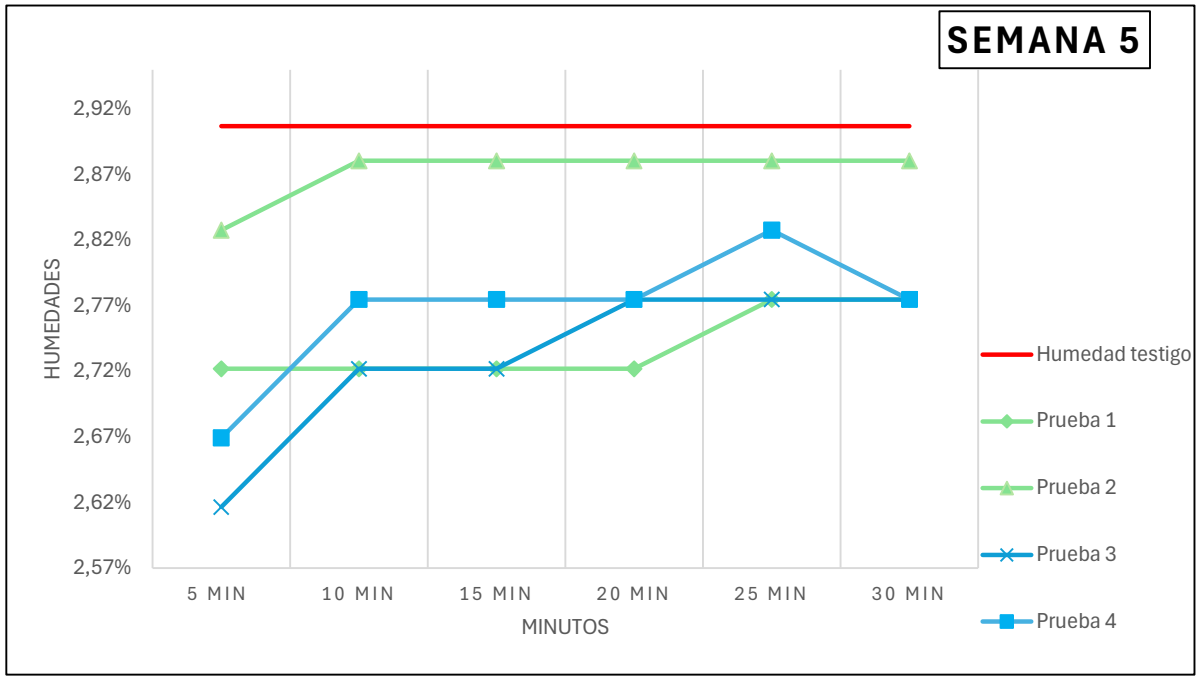


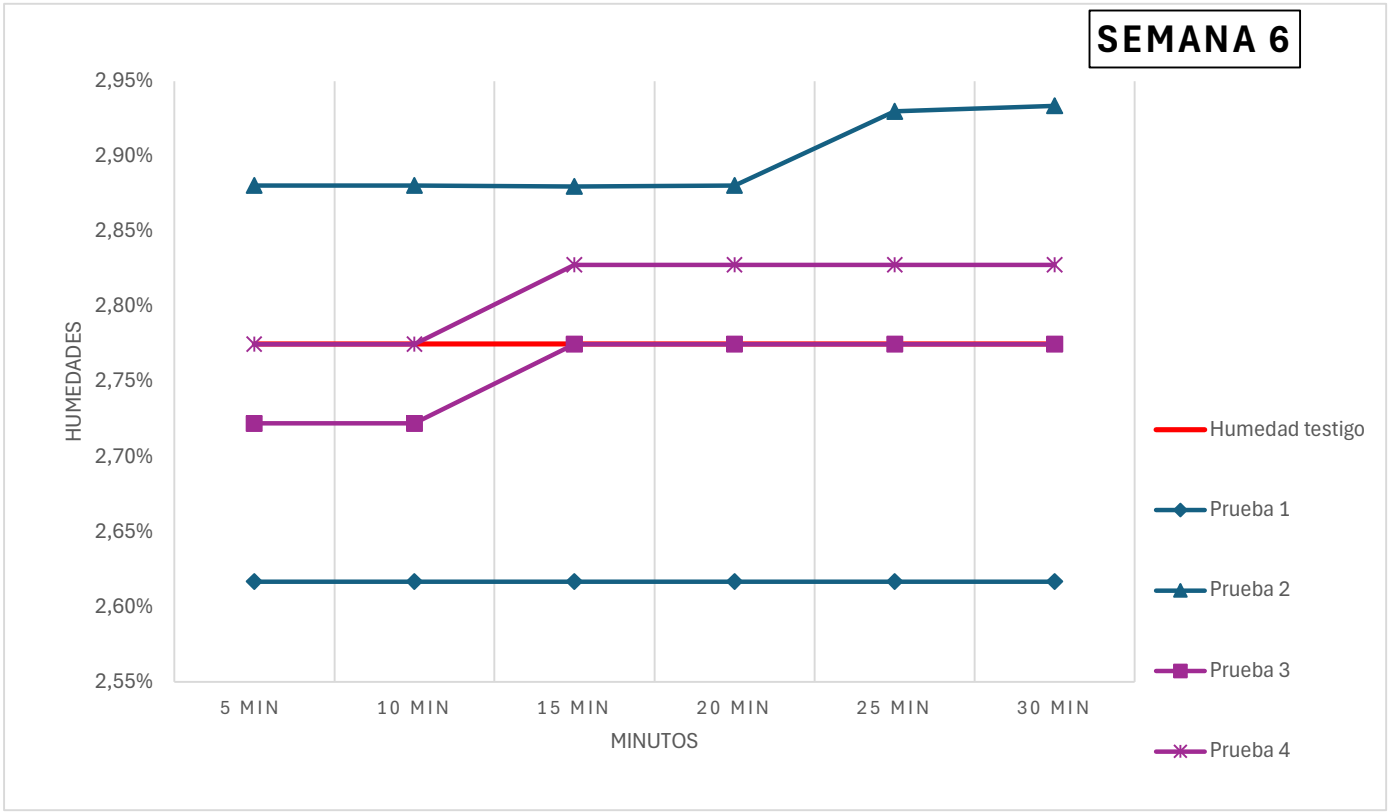
	Error Absoluto	Error Relativo
Sin tapa	0,006988717	22,9%
	0,00646463	21,2%
Con tapa	0,001194092	3,9%
	0,001194092	3,9%

	Error Relativo
Sin tapa	22,9%
	21,2%
Con tapa	3,9%
	3,9%



	Error Absoluto	Error Relativo
200°C	0,000793425	2,7%
175°C	0,001322102	4,3%




SEMANA 6
2,95%
2,90%
2,85%
2,80%
2,75%
2,70%
2,65%
2,60%
2,55%
HUMEDADES
5 MIN
10 MIN
15 MIN
20 MIN
25 MIN
30 MIN
MINUTOS
Humedad testigo
Prueba 1
Prueba 2
Prueba 3
Prueba 4

Anexo Base de datos

FECHA	N°	RECIPIENTE (gr)	PESO DE MUESTRA (gr)	MUESTRA + RECIPIENTE DESPUES DE SECADO	TEMPERATURA (C)	TIEMPO	UND	DIFERENCIA PESO DE MUESTRA	PESO DE MUESTRA (g)	HUMEDAD
18/09/2024	1	75,4	20	94,77	110±5	11,1	H	0,63	19,37	3,25%
	2	73,44	20	92,8	110±5	11,1	H	0,64	19,36	3,31%
	3	77,05	20	96,42	110±5	11,1	H	0,63	19,37	3,25%
	4	70,07	20	89,43	200	3	min	0,64	19,36	3,31%
18/09/2024	4	70,07	20	89,43	200	6	min	0,64	19,36	3,31%
	4	70,07	20	89,43	200	9	min	0,64	19,36	3,31%
	4	70,07	20	89,43	200	12	min	0,64	19,36	3,31%
	4	70,07	20	89,42	200	15	min	0,65	19,35	3,36%
	4	70,07	20	89,42	200	18	min	0,65	19,35	3,36%
19/09/2024	1	75,4	20	94,84	180	3	min	0,56	19,44	2,88%
	1	75,4	20	94,82	180	6	min	0,58	19,42	2,99%
	1	75,4	20	94,82	180	9	min	0,58	19,42	2,99%
	1	75,4	20	94,81	180	12	min	0,59	19,41	3,04%
	1	75,4	20	94,81	180	15	min	0,59	19,41	3,04%
	1	75,4	20	94,8	180	18	min	0,6	19,4	3,09%

19/09/2024	2	73,44	20	92,85	180	3	min	0,59	19,41	3,04%
	2	73,44	20	92,84	180	6	min	0,6	19,4	3,09%
	2	73,44	20	92,84	180	9	min	0,6	19,4	3,09%
	2	73,44	20	92,84	180	12	min	0,6	19,4	3,09%
	2	73,44	20	92,83	180	15	min	0,61	19,39	3,15%
	2	73,44	20	92,83	180	18	min	0,61	19,39	3,15%
25/09/2024	3	77,05	20	96,47	110±5	1	dia	0,58	19,42	2,99%
	4	70,07	20	89,51	110±5	1	dia	0,56	19,44	2,88%
Perdida de material										
9/25/94	3	77,05	20	95,76	180	3	min	1,29	18,71	6,89%
	3	77,05	20	95,65	180	9	min	1,4	18,6	7,53%
	3	77,05	20	95,6	180	15	min	1,45	18,55	7,82%
	3	77,05	20	95,54	180	21	min	1,51	18,49	8,17%
9/25/94	4	70,07	20	89,58	180	3	min	0,49	19,51	2,51%
	4	70,07	20	88,61	180	9	min	1,36	18,64	7,30%
	4	70,07	20	88,68	180	15	min	1,39	18,61	7,47%
	4	70,07	20	88,72	180	21	min	1,46	18,54	7,87%

9/25/94	3	77,05	20	96,48	180	3	min	0,57	19,43	2,93%
	3	77,05	20	96,48	180	6	min	0,57	19,43	2,93%
	3	77,05	20	96,46	180	12	min	0,59	19,41	3,04%
	3	77,05	20	96,46	180	18	min	0,59	19,41	3,04%
	4	70,07	20	89,51	180	3	min	0,56	19,44	2,88%
	4	70,07	20	89,51	180	6	min	0,56	19,44	2,88%
	4	70,07	20	89,49	180	12	min	0,58	19,42	2,99%
	4	70,07	20	89,49	180	18	min	0,58	19,42	2,99%
9/26/24	1	75,4	20	94,84	110±5	11,1	H	0,56	19,44	2,88%
	2	73,44	20	91,86	110±5	11,1	H	1,58	18,42	8,58%
9/26/24	3	77,05	20	96,47	200	3	min	0,58	19,42	2,99%
	3	77,05	20	96,46	200	6	min	0,59	19,41	3,04%
	3	77,05	20	96,17	200	9	min	0,88	19,12	4,60%
	3	77,05	20	96,17	200	12	min	0,88	19,12	4,60%
	4	70,07	20	89,52	200	3	min	0,55	19,45	2,83%
	4	70,07	20	89,51	200	6	min	0,56	19,44	2,88%
	4	70,07	20	89,54	200	9	min	0,53	19,47	2,72%
	4	70,07	20	89,53	200	12	min	0,54	19,46	2,77%

3/10/2024	1	75,4	20	94,89	110±5	11,1	H	0,51	19,49	2,62%
	2	73,44	20	92,94	110±5	11,1	H	0,5	19,5	2,56%
9/10/2024	1	75,4	20	94,82	110±5	24	H	0,58	19,42	2,99%
	2	73,44	20	92,85	110±5	24	H	0,59	19,41	3,04%
	3	77,05	20	96,43	110±5	24	H	0,62	19,38	3,20%
	4	70,06	20	89,48	110±5	24	H	0,58	19,42	2,99%
9/10/2024	1	75,4	20	95	200	3	min	0,4	19,6	2,04%
	1	75,4	20	94,94	200	6	min	0,46	19,54	2,35%
	1	75,4	20	94,94	200	9	min	0,46	19,54	2,35%
	1	75,4	20	94,94	200	12	min	0,46	19,54	2,35%
	1	75,4	20	94,94	200	15	min	0,46	19,54	2,35%
	1	75,4	20	94,94	200	18	min	0,46	19,54	2,35%
	2	73,44	20	93,03	200	3	min	0,41	19,59	2,09%
	2	73,44	20	92,98	200	6	min	0,46	19,54	2,35%
	2	73,44	20	92,98	200	9	min	0,46	19,54	2,35%
	2	73,44	20	92,97	200	12	min	0,47	19,53	2,41%
	2	73,44	20	92,97	200	15	min	0,47	19,53	2,41%
	2	73,44	20	92,97	200	18	min	0,47	19,53	2,41%

9/10/2024	3	77,05	20	96,59	200	3	min	0,46	19,54	2,35%
	3	77,05	20	96,49	200	6	min	0,56	19,44	2,88%
	3	77,05	20	96,49	200	9	min	0,56	19,44	2,88%
	3	77,05	20	96,49	200	12	min	0,56	19,44	2,88%
	3	77,05	20	96,48	200	15	min	0,57	19,43	2,93%
	3	77,05	20	96,48	200	18	min	0,57	19,43	2,93%
	4	70,07	20	89,55	200	3	min	0,52	19,48	2,67%
	4	70,07	20	89,53	200	6	min	0,54	19,46	2,77%
	4	70,07	20	89,53	200	9	min	0,54	19,46	2,77%
	4	70,07	20	89,52	200	12	min	0,55	19,45	2,83%
	4	70,07	20	89,52	200	15	min	0,55	19,45	2,83%
	4	70,07	20	89,5	200	18	min	0,57	19,43	2,93%
9/10/2024	1	75,4	20	94,84	200	9	min	0,56	19,44	2,88%
	1	75,4	20	94,84	200	18	min	0,56	19,44	2,88%
	2	73,44	20	92,89	200	9	min	0,55	19,45	2,83%
	2	73,44	20	92,89	200	18	min	0,55	19,45	2,83%
16/10/2024	1	75,4	20	94,84	110±5	22	H	0,56	19,44	2,88%
	2	73,44	20	92,87	110±5	22	H	0,57	19,43	2,93%

17/10/2024	3	77,05	20	96,52	200	5	min	0,53	19,47	2,72%
	3	77,05	20	96,51	200	10	min	0,54	19,46	2,77%
	3	77,05	20	96,51	200	15	min	0,54	19,46	2,77%
	3	77,05	20	96,52	200	20	min	0,53	19,47	2,72%
	3	77,05	20	96,52	200	30	min	0,53	19,47	2,72%
	4	70,07	20	89,52	200	5	min	0,55	19,45	2,83%
	4	70,07	20	89,51	200	10	min	0,56	19,44	2,88%
	4	70,07	20	89,51	200	15	min	0,56	19,44	2,88%
	4	70,07	20	89,51	200	20	min	0,56	19,44	2,88%
	4	70,07	20	89,51	200	30	min	0,56	19,44	2,88%
17/10/2024	1	75,4	20	94,89	175	5	min	0,51	19,49	2,62%
	1	75,4	20	94,86	175	10	min	0,54	19,46	2,77%
	1	75,4	20	94,86	175	15	min	0,54	19,46	2,77%
	1	75,4	20	94,86	175	20	min	0,54	19,46	2,77%
	2	73,44	20	92,92	175	5	min	0,52	19,48	2,67%
	2	73,44	20	92,9	175	10	min	0,54	19,46	2,77%
	2	73,44	20	92,9	175	15	min	0,54	19,46	2,77%
	2	73,44	20	92,9	175	20	min	0,54	19,46	2,77%

23/10/2024	1	75,4	20	94,87	110±5	11,1	H	0,53	19,47	2,72%
	2	73,44	20	92,89	110±5	11,1	H	0,55	19,45	2,83%
	3	77,05	20	96,51	110±5	11,1	H	0,54	19,46	2,77%
	4	70,07	20	89,53	110±5	11,1	H	0,54	19,46	2,77%
24/10/2024	1	75,4	20	94,89	200	10	min	0,51	19,49	2,62%
	1	75,4	20	94,89	200	20	min	0,51	19,49	2,62%
	1	75,4	20	94,89	200	30	min	0,51	19,49	2,62%
	2	73,44	20	92,88	200	10	min	0,56	19,44	2,88%
	2	73,44	20	92,88	200	20	min	0,56	19,44	2,88%
	2	73,44	20	92,87	200	30	min	0,57	19,43	2,93%
24/10/2024	3	77,05	20	96,52	200	5	min	0,53	19,47	2,72%
	3	77,05	20	96,51	200	10	min	0,54	19,46	2,77%
	3	77,05	20	96,51	200	15	min	0,54	19,46	2,77%
	3	77,05	20	96,51	200	25	min	0,54	19,46	2,77%
	4	70,07	20	89,53	200	5	min	0,54	19,46	2,77%
	4	70,07	20	89,52	200	10	min	0,55	19,45	2,83%
	4	70,07	20	89,52	200	15	min	0,55	19,45	2,83%
	4	70,07	20	89,52	200	25	min	0,55	19,45	2,83%