

## **5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.**

### **5.1 Realización del muestreo.**

El muestreo para las pruebas se llevó a cabo en la Huasteca Veracruzana, en un pozo de extracción de Pemex localizado en el puente "Paso Palomas", en el municipio de Tamiahua. El pozo se encuentra localizado en el kilómetro 2.5 del camino que comunica a la comunidad de Paso de San Lorenzo. El material fue obtenido a una profundidad aproximadamente 30 a 50 cm. Uno de los sitios de muestreo se ubicó en una zona donde visiblemente había sido derramado petróleo y se encontraba mezclado con el suelo. El otro sitio de muestreo como se muestra en la figura 5.1 se localizó en otra zona cercana donde no se apreciaban rastros del contaminante. Esta última zona fue muestreada para ser tomada como referencia. Ambas muestras fueron colocadas en bolsas de plástico perfectamente cerradas para evitar perder la humedad del suelo. (Vázquez,2009).

Posteriormente el suelo fue trasladado al lugar donde se llevó a cabo la experimentación, el laboratorio de mecánica de suelos en la Universidad de las Américas Puebla, y se determinó el contenido de humedad en ambos suelos. Las dos muestras de suelo se colocaron en charolas y se pusieron a un horno con una temperatura de 100°C durante 24 horas para secarlas, y así poder realizar su caracterización y llevar a cabo el proceso de lavado del suelo contaminado. Una vez realizado con éxito el proceso de lavado con surfactantes, se obtuvieron tres condiciones del mismo suelo (suelo contaminado, suelo lavado y suelo no contaminado o de referencia) a las que se aplicaron las pruebas índice en mecánica de suelos para determinar la variación de las propiedades mecánicas e

hidráulicas comparando los resultados de las tres condiciones. En lo sucesivo, se utilizará la siguiente nomenclatura para referir a las diferentes condiciones de muestras que analizaron en este trabajo:



**Figura .5.1. Lugar de Muestreo, Tamiahua, Veracruz.**

**Suelo No Contaminado ( SNC).**

Es el suelo obtenido del muestreo donde no se observaron indicios del contaminante, también puede ser considerado como el suelo de referencia.

**Suelo Contaminado (SC).**

Es el suelo donde visiblemente estaba presente el hidrocarburo al momento de realizar el muestreo.

**Suelo Lavado ( SL).**

Es el suelo obtenido después de haber aplicado el proceso de restauración, en este caso lavado con surfactantes, al suelo contaminado.

## **5.2 Lavado del suelo con surfactante.**

Para este proyecto se tomó como antecedente el trabajo realizado por Castillo (2008) quien, después de una serie de procesos experimentales, encontró las mejores condiciones de lavado requeridas para una buena remoción de contaminante empleando el mismo equipo que se uso en el presente trabajo (Vázquez,2009).

La velocidad de agitación influye considerablemente en la remoción del contaminante ya que es el aspecto principal para determinar el tiempo de contacto entre las partículas del suelo y la fase líquida. La proporción entre la cantidad del suelo y la solución con el surfactante necesaria para lavarlo, el tiempo de lavado y la energía consumida por el sistema también fueron analizados por Castillo- Espinoza en el mismo año . Las condiciones óptimas de lavado de suelo que fueron usadas en este trabajo son las siguientes:

Impulsor A200 con 4 placas inclinadas a 45°C con una velocidad de agitación de 1700 rpm y una relación 1:3 entre la cantidad de suelo y la solución de surfactantes a una concentración de 0.5 %. Para el trabajo de Castillo- Espinoza (2008), se emplearon 200 gr. de suelo contaminado y 600 ml de solución agua-surfactante con una concentración del 0.5 % (P/V). El consumo de energía de este arreglo fue de 97.95 KJ y el suelo con el cual se trabajo fue una arena mal graduada con una concentración de contaminante de 32 g/kg.

La eficiencia de un surfactante depende de cada suelo ya que cada tipo de suelo contiene más porosidad, un diferente tamaño de partícula, pH e hidrofobicidad, entre otras.

De los surfactantes analizados por Castillo-Espinoza (2008) el que presenta mayor eficiencia de lavado fue el Nonil fenil poe= 6, un tensoactivo no iónico. En adición recomendaba el Brij 35 que se trata de un poliestearato de lauril éter, o el Nonil fenol poe= 10, no iónicos ambos. Castillo-Espinoza (2008) encontró que estos tres surfactantes poseen una estructura muy similar, y es de esperar que representen un comportamiento similar con respecto a la remoción en el suelo. Para este trabajo se utilizó el **Nonil fenol poe= 10** para realizar las pruebas experimentales de lavado de suelo

5.2.1 Equipo de mezclado. El motor usado para el mezclado fue el Lightnin® Lab Master™ Mixer. BK223116. El equipo incluye una flecha de acero de 60 cm, y un tanque de mezcla de 10 cm de diámetro con 4 deflectores de 1 cm de espesor colocados a cada 90° dentro de la circunferencia del tanque. El impulsor empleado fue un A200 con 4 paletas inclinadas a 45° con un diámetro de 5 cm (*Figura 5.2*), ubicado en la parte central del tanque de mezcla (*Figura 5.1*), para evitar el contacto con los deflectores, y a 5 cm del fondo del mismo.



***Figura.5.2. Impulsor A200, con Cuatro Paletas Inclinas a 45°.***



***Figura.5.3. Equipo de Mezclado.***

5.2.2 Desarrollo de la Prueba de lavado de suelo. En el tanque de mezclado se vertieron 200 g de suelo contaminado seco y 600 ml de la solución de surfactante al 0.5% (p/v) en agua. Se tuvo cuidado de que la flecha estuviera centrada y lo más recta posible; y de que la distancia del impulsor al fondo del tanque de agitado fuera de 5 cm. El proceso de lavado de suelo se realizó haciendo funcionar el equipo durante 1.5 horas a la velocidad óptima indicada anteriormente por Castillo (2008) (1700 rpm). Una vez terminado el proceso de lavado, se trasladó la mezcla a otro recipiente donde se dejó sedimentar por 24 horas. Después de este periodo se decantó el agua de lavado y el suelo sedimentado se puso a secar. Este procedimiento se repitió hasta obtener una cantidad de material lavado suficiente para poder realizar la experimentación de sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

### **5.3. Contenido de humedad del lugar.**

Para determinar el contenido de agua del material, se siguieron las indicaciones descritas en el manual de la normativa por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en la sección de suelos y materiales para terracerías. La prueba consiste en el secado del material en el horno y determinar el porcentaje de la masa del agua, con relación a la masa de los sólidos. (Vázquez,2009).

**Procedimiento.** Se obtuvo la masa de un recipiente limpio y seco, después se agregó el suelo húmedo e inmediatamente se registro la masa en conjunto con el recipiente. Se introdujo la muestra en el horno a una temperatura de 100°C

durante un periodo mayor a 16 horas. Una vez secada la muestra, se colocó en un desecador dejándola enfriar hasta la temperatura ambiente y se obtuvo nuevamente la masa del material junto con el recipiente.

Para calcular el contenido de humedad se utilizó la ecuación:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_t} * 100 \quad (1)$$

Donde:

w= contenido de agua en porcentaje

$W_1$ = masa de la muestra húmeda más la masa del recipiente

$W_2$ = masa de la muestra seca más la masa del recipiente

$W_t$ = masa del recipiente

#### **5.4 Granulometría.**

En suelos gruesos (gravas y arenas) el comportamiento mecánico e hidráulico está principalmente definido por la compacidad de los granos y su orientación. Estas son características que se ven afectadas por el procedimiento que se realiza para determinar la granulometría del suelo, ya que se rompe por completo su estructura original para poder hacerlo pasar por una serie de mallas con aberturas estandarizadas; Debido a esto, en los resultados finales, no es posible observar verdaderos indicios de las propiedades originales. En suelos finos (limos y arcillas)

inalterados, las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen en gran medida de su estructuración e historia geológica. Sin embargo, de igual forma no existe un procedimiento con el cual se pueda determinar la granulometría del material sin alterar su estructuración original por lo que resulta importante desarrollar cuidadosamente el método disponible para tener conclusiones consistentes en cuanto a la descripción técnica del suelo (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 2006).

Para determinar el tamaño de las partículas del suelo se realizó un análisis por cribado el cual consiste en agitar la muestra de material a través de un conjunto de mallas con aberturas establecidas que decrecen progresivamente. En la tabla (5.1) se muestran los números de las mallas, y sus respectivas aberturas en milímetros, que fueron usadas en este trabajo

**Tabla 5.1 Números de malla con aberturas en mm.**

Número de malla	Abertura en mm
1/2	12.7
3/8	9.51
4	4.76
10	1.651
20	0.833
40	0.425
60	0.246
80	0.177
100	0.147
200	0.074

**Procedimiento.** Primero se puso a secar el suelo en un horno a 60 °C durante 24 horas. Posteriormente, todos los grumos se disgregaron usando un pisón cuadrado de madera de 10 cm por lado. Se realizó el procedimiento establecido por la normativa de la SCT para el secado, disgregado y cuarteo de muestras (M-MMP-1-03/03), para obtener una muestra del material y se registró su masa. Posteriormente, usando la malla Número 200, se realizó un lavado de la muestra para eliminar el contenido de finos y evitar errores de medición al momento de realizar el cribado con el resto de las mallas, producto de la retención de finos en cada una de ellas. Después del lavado, la muestra se puso a secar en el horno durante 24 horas y una vez seca se pesó nuevamente para determinar, por diferencia de pesos, la cantidad de finos que pasaron la malla No. 200 con el lavado.

A continuación se utilizó la malla número 4 para separar las gravas de las arenas. El material retenido fue cribado usando un juego de mallas en los que únicamente las partículas eran retenidas por las mallas con abertura de  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{8}$  de pulgada. Dado que esto ocurrió durante todas las repeticiones de los tres diferentes condiciones de suelo analizados (SNC, SC y SL), se decidió eliminar en los cálculos las mallas con una abertura superior a los 12.7 mm.

El cribado del material se realizó con el juego de mallas ordenado en forma descendente (figura 5.4), como se mostró en la Tabla 5.4..1, en una máquina agitadora durante 20 min. Después, cada malla fue agitada manualmente durante 1 min o hasta que el material que pasaba a través de ella fuera prácticamente nulo. Todas las mallas fueron cepilladas por el reverso para devolver las partículas

atoradas al material retenido. Con una balanza se obtuvieron las masas de material retenido en cada una de las mallas y se registraron los valores. A pesar del lavado, una cantidad de finos pasó la malla número 200 con el cribado. Esta cantidad se aumentó al valor obtenido anteriormente de la diferencia de peso entre la muestra seca originalmente y después del lavado.



**Figura 5.4. Juego de mallas para determinar la granulometría del suelo.**

## **5.6. PERMEABILIDAD.**

La permeabilidad es la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es *permeable* si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e *impermeable* si la cantidad de fluido es despreciable. (Juárez –Badillo y Rico – Rodriguez, 2006).

Esta propiedad es importante en la mecánica de suelos para estimar la cantidad de infiltración subterránea en ciertas condiciones hidráulicas, así como analizar la estabilidad de las presas y taludes o diseñar sistemas que impliquen el bombeo de agua para construcciones subterráneas. Existen varios factores que intervienen en la permeabilidad de un suelo como la distribución granulométrica, viscosidad del fluido, distribución en el tamaño de los poros, rugosidad de las partículas del suelo, el grado de saturación, relación de vacíos, tamaño de las partículas, temperatura del agua, composición mineralógica, entre otras (Juárez – Badillo y Rico – Rodríguez, 2006).

5.6.1 Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad. El coeficiente de permeabilidad de un suelo es un dato cuya determinación correcta es de fundamental importancia para la formación del criterio del proyectista en algunos problemas de Mecánica de Suelos y, en muchos casos, para la elaboración de sus cálculos. Hay varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos: unos “directos”, así llamados por que se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros “indirectos”, proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines. (Juárez –Badillo y Rico – Rodríguez, 2006). Estos métodos son los siguientes:

a) Directos:

1.- Permeámetro de carga constante.

2.- Permeámetro de carga variable.

b) Indirectos

- 1.- Cálculo a partir de la curva granulométrica.
- 2.- Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
- 3.- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

Las dos pruebas más comunes usadas en el laboratorio para determinar el coeficiente de permeabilidad, son las de permeámetro de carga constante y permeámetro de carga variable. La primera se usa principalmente para suelos con partículas de grano grueso ya que para granos finos es conveniente usar la prueba de carga variable debido a que con la primera se obtienen tasas de flujo muy pequeñas, haciendo que la prueba se prolongue durante mucho tiempo y deje de ser eficaz (Juárez –Badillo y Rico – Rodríguez, 2006). Dado que los suelos en estudio poseen mayoritariamente partículas finas, el método seleccionado para medir la permeabilidad de cada uno de ellos fue el de carga variable.

5.6.2 Permeámetro de carga variable. Este tipo de permeámetro mide la cantidad de agua que pasa a través de la muestra de suelo por diferencia de niveles de carga hidráulica en un tubo manométrico.

**Procedimiento de la prueba.**

1.- Tarar el permeámetro vacío sin las tapas, antes de introducir la muestra de suelo.

2.- Tarar un recipiente de humedad. Tomar una muestra del suelo que se va a ensayar, anotar su peso más el del recipiente. Introducir la muestra en la estufa

durante 24 horas.

3.- Al cabo de 24 horas sacar la muestra y pesarla. Estos datos se utilizarán para calcular la humedad inicial de la muestra.

4.- La muestra que se va a ensayar puede ser inalterada u obtenida mediante moldeo.

Si la muestra es obtenida mediante moldeo la preparación de la muestra será la siguiente:

Colocar un filtro (piedra porosa) en la parte inferior de permeámetro. Si el suelo sometido a ensayo está en estado suelto se amasará a la humedad que interese. Se van a realizar cinco capas mediante compactación, para ello se introducirá una pequeña cantidad de suelo en el permeámetro, mediante un mortero se le aplicarán 25 golpes, una vez compactada la primera capa, se añadirá otra porción de suelo idéntica a la primera y se llevará a cabo el mismo procedimiento para las cinco capas. La última capa alcanzará la parte superior del permeámetro.

Si la muestra de suelo se encuentra inalterada se procede de la siguiente manera:

6.- Retirar la tapa superior del permeámetro y colocar un filtro de papel secante en el fondo. La muestra de suelo quedará colocada dentro del cilindro interior del permeámetro, entre dos filtros el superior y el inferior.

7.- Colocar de nuevo la tapa superior del permeámetro después de colocar el filtro superior, asegurarse que la válvula de entrada del mismo está completamente cerrada.

8.- Determinar el volumen de suelo introducido, anotando la altura alcanzada por la muestra en el interior del cilindro y el diámetro interior del cilindro.

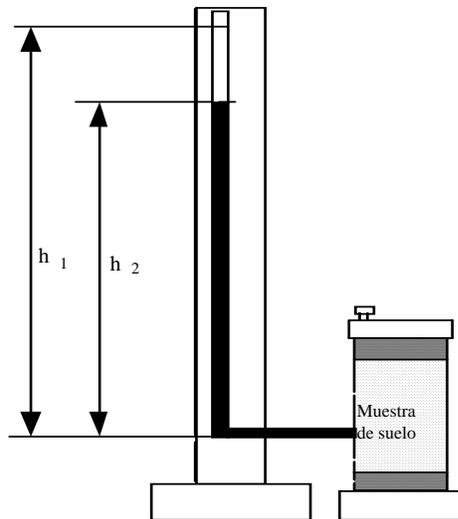
9.- Introducir el conducto de entrada de agua desairada en el grifo. Abrir el grifo hasta que el nivel de agua en el depósito superior alcance el tubo de desagüe.(figura 5.4). Todos estos pasos se realizarán con la válvula de entrada del permeámetro cerrada.

10.- Abrir la válvula inferior del permeámetro lentamente asegurándose que la válvula de salida del permeámetro esté abierta, (tornillo superior), de manera que el agua entre a través de la muestra de suelo saturándola con una cantidad mínima de aire.

Una vez que inicie el flujo de agua a través de la muestra, se deberán abrir las llaves de paso de los tubos manométricos que están conectados en la pared lateral del permeámetro. La apertura de estas llaves permite el paso del agua a los tubos manométricos con los cuales se medirá la pérdida de carga en los controles que se lleven a cabo.

11.- Estabilizar la condición de flujo, permitiendo que el agua fluya durante un cierto tiempo a través de la muestra. La estabilización del flujo se conseguirá cuando comience a salir agua por la parte superior del permeámetro (tornillo superior). A continuación cerrar la válvula de entrada y salida

12.- Tomar uno de los tubos manométricos y llenarlo de agua hasta una altura considerable, mediante su tubería de entrada, siempre manteniendo cerrada la válvula de salida del mismo. Una vez conseguida la altura deseada, medir la altura hidráulica a través de la muestra para obtener  $h_1$ .



**Figura.5.5 Esquema de las cabezas hidráulicas del permeámetro**

13.- Iniciar el flujo de agua abriendo la válvula de salida del tubo manométrico y echar a andar simultáneamente el cronómetro. Dejar que el agua corra a través de la muestra hasta que el tubo manométrico se encuentre casi vacío. Simultáneamente parar el flujo y registrar el tiempo transcurrido. Obtener la altura  $h_2$ . Registrar la temperatura del ensayo. Medir el diámetro del tubo manométrico en cm.

14.- Volver a llenar el tubo manométrico de agua y repetir el ensayo dos o tres veces adicionales. Hacer mediciones de temperatura para cada ensayo.

15.- Después de realizar varios controles, se abrirá el permeámetro por la parte superior quitando toda el agua sobrante. Dar la vuelta al permeámetro con cuidado y desarmar la parte inferior sin que se produzca pérdida de suelo y eliminando el agua que se había quedado en el filtro inferior (figura 5.5).

16.- Pesar la parte central del permeámetro con el suelo y anotar los datos para calcular la densidad seca de la muestra. (Ordoñez Cramer,2007).

Con los datos obtenidos se calcula el coeficiente de permeabilidad para cada ensayo realizado usando la ecuación (2).

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

Donde:

A= área de la sección transversal de la muestra de suelo

a= área de la sección transversal de la bureta

L= longitud de la muestra

$h_1$ = altura de carga hidráulica inicial

$h_2$ = altura de carga hidráulica final

t= tiempo transcurrido pára pasar de  $h_1$  a  $h_2$



**Figura.5.6 Permeámetro de carga variable**

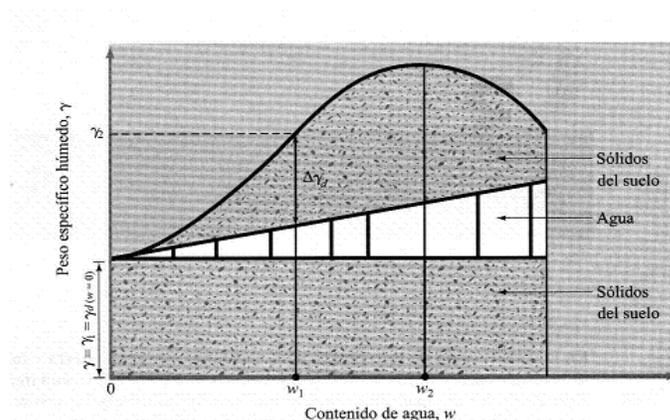
## **5.7. COMPACTACIÓN.**

Se entiende por compactación todo proceso que aumente el peso volumétrico de un material granular. En general, es conveniente compactar un suelo para incrementar su resistencia al esfuerzo cortante, reducir su compresibilidad y hacerlo más impermeable.

El acomodo de las partículas en un suelo que se ha tratado de mejorar, depende de las características del dispositivo que se ha utilizado para compactarlo y así saber la humedad que contiene el material. Si las partículas están secas, la fricción intergranular opone una mayor resistencia al desplazamiento relativo entre ellas, que se encuentran lubricadas por una película de agua. Por el contrario, si la masa tiene una humedad elevada, el agua llena vacíos que podrían ser ocupados por partículas en un arreglo más denso. Esto último es cierto en suelos que tienen un alto porcentaje de finos y no en las arenas gruesas y gravas. Por lo tanto, dado un proceso de compactación, para cada material existe un contenido de agua con el que se obtiene el máximo peso volumétrico. En este trabajo se utilizó para prueba de compactación Proctor y a continuación se dan detalles de ella. (Ordoñez Cramer, 2007).

5.7.1. Compactación Proctor. La prueba Proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad.

La prueba de Proctor reproduce en el laboratorio el tipo de compactación uniforme de la parte inferior hacia la superficie de la capa compactada. En todos los suelos, al incrementarse su humedad se aplica un medio lubricante entre sus partículas que permite un cierto acomodo de estas cuando se sujetan a un esfuerzo de compactación. Si se sigue incrementando la humedad empleando el mismo esfuerzo de compactación, se llega a obtener el mejor acomodo del suelo, y por consecuencia el mayor peso volumétrico seco, con cierta humedad llamada humedad óptima. A esta humedad deberá de preocuparse siempre efectuar la compactación en el camino, calle o aeropuerto o lugar que se trate, ya que facilita el acomodo de las partículas con el menor trabajo del equipo de compactación. Si a partir de esta condición de humedad óptima y peso volumétrico seco se hacen incrementos de humedad, se provoca un aumento del volumen de huecos, ocasionalmente una sustitución sucesiva de partículas de suelo por agua, en virtud de que el volumen de aire atrapado entre las partículas de suelo no puede ser disminuido apreciablemente con ese mismo esfuerzo de compactación, obteniéndose por tantos pesos volumétricos secos que disminuyendo a medida que la humedad aumenta (figura 5.7).



**Figura.5.7 Principio de la Compactación (Das, 2001)**

La prueba Proctor está limitada a los suelos que pasen totalmente la malla No. 4, y deberá efectuarse en arenas de río, arenas de mina, arenas producto de trituración, tezontle arenoso y en general en todos aquellos materiales que carezcan de cementación (Ordoñez Cramer, 2007).

### **Procedimiento.**

1.- De la muestra ya preparada y que ha pasado por la malla No.4 se toman aproximadamente 2.5 kg, se ponen en la charola y se dejan secar al aire en casa de que este muy húmeda o bien se deja secar en un horno a una temperatura de 100 ° C aproximadamente.

2.- Se saca el material seco y se empieza a disgregar utilizando una pieza de madera de sección cuadrada( figura 5.8).



**Figura.5.8 Suelo Disgregado.**

3.- Se esparce agua en cantidad tal que la humedad resulte un poco menor al 10% y si el material es arenoso es conveniente ponerle una humedad menor. Esta operación se puede efectuar empleando un atomizador.

4.- Se resuelve perfectamente el material, tratando que el agua agregada se distribuya uniformemente.

5.- Usando un cucharón, se vacía en el cilindro Proctor, previamente armado con su extensión, material suficiente para obtener una capa floja de unos 8 cm de espesor.

6.- Esta capa se compacta mediante 25 golpes de pisón, procurando repartirlos en toda su superficie y usando la guía metálica para que la altura de caída se la misma. Los golpes de pisón se dan levantando éste hasta el nivel superior de la guía y dejándolo caer libremente.

7.- Se vacía nuevamente material en el cilindro para tener una segunda capa que, agregada a la primera de una altura total de 11 o 12 cm, compactándola del mismo modo que la primera.

8.- De forma idéntica, se produce la tercera capa, procurando que una vez compactado el material, la superficie este 1 o 2 cm arriba del ensamble en la extensión.

9.- Al terminar la compactación de las tres capas, con una espátula de cuchillo se recorre el perímetro interior de la extensión para despegar el material y se quita cuidadosamente la extensión enrasando la muestra al nivel superior del cilindro y rebanando el material con una espátula de cuchillo o bien con un enrasado (figura 5.9).



**Figura .5.9. Molde Proctor.**

10.- Se limpia exteriormente el cilindro y se pesa con la muestra compactada en el platillo de la báscula, aproximadamente la lectura hasta 5 gr. El peso obtenido se anota, peso cilindro + muestra húmeda.

11.- En una capsula de porcelana, previamente numerada y tarada, se toma una porción de la muestra compactada; aproximadamente 100 gr, se pesa y se anota el peso exacto (Figura.5.10).

12.- Se desarma el cilindro Proctor con un objeto de extraer fácilmente el material devolviéndolo a la charola.



**Figura.5.10. Báscula electrónica.**

13.- El material se desmenuza, picándolo con una espátula de abanico y cuando este desmoronado se le agrega agua en cantidad suficiente para aumentar el contenido de humedad de un 2% a un 5% aproximadamente, dependiendo del tipo de material. Se repiten todos los pasos del 4 al 12 inclusive, obteniendo así un nuevo punto de la grafica de la humedad contra peso volumétrico seco. Para poder definir las condiciones optimas del material, es necesario efectuar cuatro o cinco veces los pasos del 4 al 12, incrementado en cada ensayo el contenido de humedad.

14.- Todas las capsulas que contienen la muestra húmeda de cada ensayo se colocan dentro de horno aproximadamente a 100° C ó 110°C, durante 18 horas mínimo (Figura.5.11.). Transcurriendo este lapso, se retiran del horno, dejándolas enfriar y se pesan, registrando su valor.



**Figura.5.11. Capsula de Porcelana en el horno.**

15.- Se encuentran los valores necesarios para construir la grafica. Pesos volumétricos secos- contenidos agua. De ella se definen los valores óptimos del material que corresponden al peso volumétrico seco óptimo y su humedad. (Ordoñez Cramer, 2007).

### 5.7.2 Materiales y equipo.

- Molde Proctor de compactación de 10.2 cm, diámetro interior y 12.3 cm altura (figura 5.11).
- Extensión del molde de igual diámetro interior y 5 cm de altura.
- Pisón cilíndrico de 5 cm de diámetro en la base y un peso de 2.5 kg. Con guía de 30.5 cm de altura.
- Charola de lamina galvanizada de 50\*50\*10 cm.
- Juego de espátulas de acero y enrasador.
- Horno a la temperatura constante entre 100°C- 110°C.
- Bascula con capacidad mayor de 50 kg.
- Balanza.
- Capsulas de porcelana.
- Cucharas de láminas galvanizadas.



**Figura 5.12. Materiales y herramientas.**

### 5.7.3 Formulas y Operaciones.

$$\text{Peso volumétrico húmedo en gr/cm}^3 = \gamma_h = \frac{w_h}{v_m} \quad \text{Formula} \quad (3)$$

Donde;

$w_h$  = Peso del material húmedo compactado en el molde (gr).

$v_m$  = Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)

$$\text{Contenido de humedad } w(\%) = \frac{w_{sh} - w_{ss}}{w_{ss}} * 100 \quad (4)$$

$$\text{Peso volumétrico seco } \gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w/100} \quad (5)$$