

Diseño de Procedimientos Técnicos como parte de un Sistema de Gestión de Calidad en Ensayos de Laboratorio



Abstract

The present directed professional practice is focused in the implementation of the applied technical procedures to two tests of laboratory. These procedures will be part of the System of management of quality of the company Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A, the system is under the standards established by the norm INTE:ISO/IEC 17025:2005, which defines the competition of the laboratories and represents a fundamental tool for credit procedures of management and technicians before organizations whose competition is in the accreditation of these procedures; in these case the Costa Rican Organization of Accreditation. The development of the present objective has been raised following some programmed stages in coherent and ordered form. Because of it, the efficient knowledge of the norm, the establishment of the technician's procedures associated to the technical documentation to elaborate, and the putting in practice of this last one, translated in the evaluation of the personal performance, will dictate the final result of the project and the company interests. All the previous one will be applied to the soils tests: Limits of Atterberg and Laboratory Compaction Characteristics of Soils (Standard and Modified Effort).

Keywords: System of Management of Quality, Guide, Technical Document, Test Sample, Repetitive, Reproducibility

Resumen

La presente práctica profesional dirigida está enfocada en el diseño de procedimientos técnicos aplicados a dos ensayos de laboratorio. Dichos procedimientos formarán parte del Sistema de Gestión de Calidad de la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A.; el sistema se encuentra bajo los lineamientos establecidos por la Norma INTE:ISO/IEC 17025:2005, la cual define la competencia de los laboratorios y representa una herramienta fundamental para acreditar procedimientos de gestión y técnicos ante entidades cuya competencia radica en la acreditación de dichos procedimientos; en este caso la Entidad Costarricense de Acreditación (ECA). El conocimiento a fondo de la norma, el establecimiento de los procedimientos técnicos asociados a la documentación técnica por elaborar, y la puesta en práctica de ésta última, traducida en la evaluación del desempeño del personal, dictarán el resultado final del proyecto y de los intereses de la empresa. Todo lo anterior será aplicado a los ensayos en suelos: Límites de Atterberg y Próctor de Compactación (Estándar y Modificado).

Palabras Clave: Sistema de Gestión de Calidad, Instructivo, Registro Técnico, Muestra Patrón, Repetitividad, Reproducibilidad.

Diseño de Procedimientos Técnicos como parte de un Sistema de Gestión de Calidad en Ensayos de laboratorio

SERGIO FERNÁNDEZ CERDAS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre del 2007

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

| | |
|----------------------------------|----|
| Prefacio | 1 |
| Resumen ejecutivo..... | 2 |
| Introducción..... | 4 |
| Marco Teórico | 5 |
| Metodología | 11 |
| Resultados | 24 |
| Análisis de los resultados | 62 |
| Conclusiones..... | 72 |
| Recomendaciones | 74 |
| Apéndices | 75 |
| Anexos | 76 |
| Referencias | 77 |

Prefacio

Actualmente, las organizaciones buscan las herramientas necesarias para sobresalir en un mercado competitivo y al mismo tiempo, complicado.

Por esta razón el objetivo desarrollado en la presente Práctica Profesional está orientado hacia una de las herramientas más utilizadas por los laboratorios, la cual corresponde a la acreditación de los procedimientos llevados a cabo en este tipo de organizaciones con base en la Norma INTE:ISO/IEC 17025:2005.

La empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. es un laboratorio cuyo objetivo primordial está asociado con la acreditación de sus procedimientos con base en su Sistema de Gestión de Calidad. Algunos de estos procedimientos, están relacionados con la competencia técnica del laboratorio. Precisamente, el objetivo planteado en el presente informe, fue desarrollado para satisfacer las necesidades del Laboratorio ITP S.A. y colaborar con éste en la implementación de los procedimientos técnicos en dos ensayos de laboratorio, con el fin de preparar al personal técnico ante una futura acreditación por parte de la Entidad Costarricense de Acreditación (ECA). El desarrollo de los instructivos técnicos para la ejecución de los ensayos, los registros de datos para agilizar la anotación de las mediciones durante el ensayo y la creación de hojas electrónicas para facilitar la obtención del resultado final forman parte de dichos procedimientos. De ahí, la importancia de los objetivos específicos planteados. Es fundamental además, realizar una evaluación para el personal técnico con el fin de analizar su efectividad en el uso de la documentación elaborada así como la ejecución del ensayo.

Por esta razón, el objetivo general del Proyecto de Graduación se basa en la implementación de

los procedimientos técnicos para los ensayos de laboratorio en suelos: Límites de Atterberg y Próctor de Compactación Estándar y Modificado, basado en la Norma INTE:ISO/IEC 17025:2005 como parte del Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A.

El poder contribuir con el cumplimiento de los objetivos planteados por la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. es considerado de gran satisfacción personal ya que durante el desarrollo de éstos, el conocimiento científico adquirido, la excelente relación laboral con el personal técnico y administrativo de la empresa, constituyen un aspecto invaluable y provechoso para la formación profesional.

Quiero agradecer en primera instancia a Dios por acompañarme durante estos cinco años de carrera, a mi familia, por todo el apoyo brindado todo este tiempo. Agradecer también a mi profesora guía Ing. Ana Grettel Leandro, a todo el personal técnico y administrativo de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A, en especial, a Róger Arroyo, Allen Camacho, Armando Ruiz y a Juan Carlos Arguedas así como a los ingenieros Luis Diego Moreira y Oscar Martínez por su gran ayuda y hacer posible que en pocos meses, una de mis metas más importantes se vea realizada.

Resumen ejecutivo

El cumplimiento de los objetivos del presente proyecto fue de gran relevancia para la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A por ser un laboratorio que se encuentra en proceso de acreditación. Por esta razón, cada uno de los objetivos planteados constituyó un avance para la empresa hacia la acreditación de varios de sus ensayos.

La Práctica Profesional Dirigida consistió en la implementación de los procedimientos técnicos en los ensayos de laboratorio Límites de Atterberg (ASTM-4318) y Próctor de Compactación Estándar (ASTM-698) y Modificado (ASTM-1557), basados en la norma INTE:ISO/IEC 17025:2005 como parte del Sistema de Gestión de Calidad de la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. Los procedimientos técnicos incluyeron la elaboración de documentos técnicos: instructivos, registros de toma de datos y hojas de cálculo; así como la evaluación del desempeño del personal técnico bajo el alcance de la acreditación.

Para concretar los objetivos propuestos, la capacitación personal sobre el Sistema de Gestión de Calidad y la norma INTE:ISO/IEC 17025:2005 así como la utilización de una gran cantidad de recursos fue indispensable. El uso del laboratorio y los equipos constituyeron los recursos de mayor uso. Además, la facilitación del equipo de cómputo permitió realizar la documentación técnica de una forma más ágil y efectiva en el mismo lugar donde se efectuaban los ensayos.

Las normas ASTM (American Standards of Testing and Materials) constituyeron la referencia principal en la elaboración de los instructivos técnicos. Luego, se elaboró el registro técnico y la hoja electrónica correspondiente a cada ensayo. La observación durante la ejecución de los ensayos por parte de los técnicos fue la metodología seguida para llevar a cabo dicha documentación ya que el mecanismo utilizado consistió en anotar en el registro las mediciones directas obtenidas por cada uno de los equipos y luego introducirlas en la hoja

electrónica correspondiente. Las hojas electrónicas fueron diseñadas en el programa Microsoft Excel. Al mismo tiempo, las especificaciones contenidas en las normas ASTM incluían las dimensiones requeridas por los equipos para la ejecución del ensayo. Con base en éstas, se verificaron los equipos de medición y sus dimensiones reales fueron comparadas con las tolerancias establecidas en las normas respectivas. Lo anterior permitió definir cual equipo era el adecuado para ejecutar la prueba sin afectar el resultado final.

Posteriormente, se capacitó al personal sobre la documentación realizada. En esta instancia, se discutieron muchos aspectos entre el personal técnico y el practicante, los cuales fueron de gran ayuda y tomados como acciones de mejora con el fin de ajustar la documentación técnica a las necesidades del personal.

El último de los objetivos planteados consistió en la evaluación del desempeño del personal bajo el alcance de la acreditación. La forma de alcanzar dicho objetivo siguió la metodología basada en las pruebas de repetitividad y reproducibilidad. Las primeras se refieren a las pruebas realizadas por un técnico para verificar la eficiencia del mismo en la ejecución de la prueba con base en los resultados obtenidos. Por su parte, las pruebas de reproducibilidad se asocian a las pruebas realizadas por dos o más técnicos para comprobar si obtienen resultados similares entre ellos, al utilizar una muestra patrón. Una muestra patrón se asocia a un espécimen con ciertas características, el cual fue usado para la ejecución de dichas pruebas. Con base en los resultados finales, se aplicó un análisis estadístico. El método empleado llamado Análisis de Varianza o ANOVA, permite comparar dos o más medias muestrales. En este caso, el análisis comparó las medias de los resultados de cada uno de los técnicos y mediante un estadístico de prueba F , se concluyó si las personas incluidas en el análisis trabajan de forma similar o diferente.

Los procedimientos técnicos realizados forman parte actualmente del Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A, lo cual resultó muy satisfactorio pues refleja que la documentación elaborada así como la evaluación de desempeño del personal cumplieron con las expectativas de la Práctica profesional dirigida de la empresa.

En resumen, se cumplió con los objetivos propuestos, sin embargo, para los intereses de la empresa se debe trabajar aún más en la parte de ejecución de ensayos, pues únicamente el ensayo de Límites de Atterberg cumplió con la evaluación del personal técnico. Por su parte, los ensayos de compactación no llenaron las expectativas que exige el Sistema de Gestión de Calidad de la empresa, pues el análisis de varianza realizado demuestra una gran diferencia en la forma de ejecutar el ensayo por parte de los tres técnicos evaluados. No obstante, se debe recordar que el objetivo de una evaluación consiste en identificar los defectos y virtudes de una acción y mediante ésta, tomar las medidas correspondientes. Debe quedar claro que el objetivo fue evaluar, por lo tanto, se podían presentar tres panoramas: uno de ellos asociado con la excelencia total, el segundo relacionado con malas prácticas por parte del personal y el tercero como una combinación de los dos panoramas anteriores. En este caso, la evaluación evidenció el tercer panorama.

Los procedimientos técnicos realizados constituyeron una gran experiencia y permitieron ampliar los conocimientos, no sólo sobre la importancia y los alcances de un Sistema de Gestión de Calidad, sino también sobre diversos materiales de construcción utilizados en la actualidad y sus propiedades más importantes.

Introducción

Los requerimientos de la sociedad moderna obligan a las empresas a tratar de optimizar al máximo los recursos para sobresalir en un mercado tan competente como el de hoy.

El concepto de *calidad* representa una herramienta muy efectiva para crecer en el mercado laboral. Pero ¿cómo involucrar el concepto de calidad en una empresa? Precisamente, las normas ISO representan un arma; permiten a una empresa introducir este concepto en el desarrollo de una organización.

La empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. es una sociedad cuyo campo de acción se encuentra en obras civiles destinadas a la infraestructura vial. Se caracteriza por ser un laboratorio de control de calidad enfocado en ensayos realizados a suelos y agregados así como en materiales utilizados actualmente para la construcción de superficies de rodamiento tales como el concreto y las mezclas asfálticas. Esta empresa cuenta, además del laboratorio principal, con varios laboratorios ubicados en distintas partes del país como los son Bagaces, Barranca, Guápiles y Papagayo.

Precisamente, la Práctica profesional dirigida está enfocada en la implementación de los procedimientos técnicos para dos ensayos de laboratorio como parte del Sistema de Gestión de Calidad de la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. con el fin de preparar a dicha empresa ante una futura acreditación por parte de la Entidad Costarricense de Acreditación ECA. Lo anterior con base en la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. Los procedimientos incluyen instructivos técnicos, registros de toma de datos, hojas de cálculo y otros procedimientos tales como capacitación y la evaluación del desempeño del personal técnico.

Objetivo General

Diseñar los procedimientos técnicos en los ensayos de laboratorio Límites de Atterberg (ASTM-4318) y Próctor Estándar y Modificado (ASTM-698 y 1557) basado en la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005, como parte del Sistema de gestión de calidad de la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A.

Objetivos Específicos

1. Lograr una capacitación propia sobre el sistema de gestión de calidad de la empresa con base en el estudio de la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005.
2. Diseñar los instructivos técnicos que describan detalladamente los procedimientos de los ensayos a gestionar con base en la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005.
3. Realizar hojas de registro de resultados para los ensayos de laboratorio en proceso de acuerdo con el Sistema de Gestión de Calidad de la empresa ITP.
4. Elaborar hojas de cálculo que faciliten la obtención de los resultados.
5. Evaluar al personal técnico involucrado dentro del alcance de la acreditación.
6. Capacitar al personal de la empresa y del laboratorio para una futura evaluación por parte de la Entidad Costarricense de Acreditación.

Marco Teórico

Ensayo de Límites de Atterberg (ASTM-4318)

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido.

La frontera entre el estado plástico y el estado líquido de un suelo se denomina límite líquido y corresponde al contenido de agua que se requiere adicionar a una pequeña cantidad de suelo el cual se coloca en la Copa Casagrande, y es dividido en dos partes mediante un dispositivo de dimensiones establecidas. Dicha muestra es sometida a 25 golpes a una velocidad de 2 golpes/s y en la cual la división efectuada deberá cerrarse en el fondo de la copa a lo largo de 13 mm. El equipo utilizado para esta prueba se muestra en el Anexo 3. Prácticamente, es muy difícil calcular el contenido de agua exacto para hacer que dicha ranura se cierre a los 25 golpes. Por esta razón se propone un método el cual consiste en el proceso de adición de agua cuatro o cinco veces a una misma muestra con el fin de reducir el número de golpes necesarios para cerrar la ranura. Lo anterior para obtener un gráfico, el cual involucra el contenido de humedad y el número de golpes (*Figura 1*). Dicha figura, en teoría, debería tener una distribución lineal, sin embargo, algunos factores adversos a la hora de ejecutar el ensayo pueden provocar la dispersión en los resultados, lo cual obliga a determinar la recta de mejor ajuste.

Entonces, es posible obtener la ecuación de la recta (*Ecuación 1*), y de allí calcular el contenido de humedad o Límite Líquido correspondiente a un número de golpes de 25.

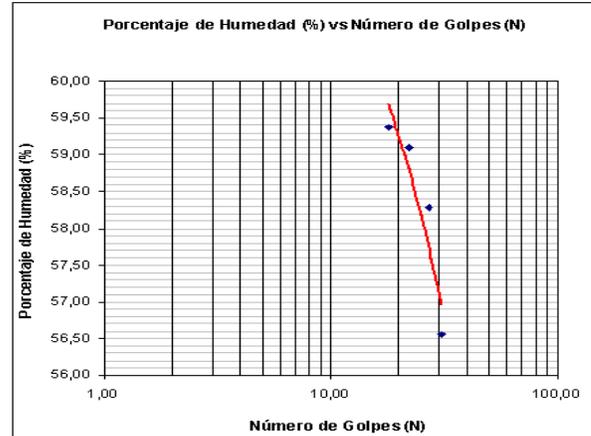


Figura 1. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes.

$$LL = 25m + b \quad (\text{Ecuación 1}).$$

Donde:

LL= Límite Líquido.

25= # Golpes deseados.

m = Pendiente de la recta.

b = Intersección de la recta con el eje y.

La frontera convencional entre los estados semisólido y plástico se llama límite plástico, se determina alternativamente presionando y enrollando una pequeña porción de suelo plástico hasta un diámetro de 3 mm, en el cual, el pequeño cilindro se desmorona. El contenido de agua en que se encuentra, al llegar a este estado, se anota como límite plástico.

El índice plástico *IP* se conoce como la diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico (*Ecuación 2*).

$$IP = LL - LP \quad (\text{Ecuación 2}).$$

Donde:

IP = Índice de Plasticidad
LL= Límite Líquido
LP= Límite Plástico

Este método de prueba es utilizado como parte integral de algunos sistemas de clasificación para caracterizar las fracciones finas de suelos y especificar dichas fracciones como materiales de construcción.

Ensayo Próctor Estándar y Modificado (ASTM-698 y 1557)

Los ensayos Próctor de Compactación son utilizados para determinar los parámetros óptimos de compactación, mediante los cuales es posible estudiar y analizar las propiedades necesarias para cualquier obra que requiera el proceso de compactación del suelo. Esto se traduce en determinar cuál es la humedad requerida, con una energía de compactación dada, para obtener la densidad seca máxima que se puede conseguir para un determinado suelo. La humedad que se busca es definida como humedad óptima. Se define igualmente como densidad seca máxima aquella que se consigue para la humedad óptima.

Está comprobado que el suelo se compacta en la medida en que aumenta su humedad, la densidad seca va aumentando hasta llegar a un punto máximo, cuya humedad es la óptima. A partir de este punto, cualquier aumento de humedad no supone mayor densidad seca a no ser, por lo contrario, una reducción de esta.

Los análisis son realizados en laboratorio por medio de moldes de compactación a los cuales se agrega agua. En ambos análisis, tanto en el método estándar como en el método modificado son utilizadas porciones de la muestra de suelo mezcladas con cantidades distintas de agua, colocadas en un molde y compactadas con un mazo, luego se anotan las humedades y densidades secas calculadas mediante las ecuaciones 3 y 4 respectivamente:

$$\% Humedad = \frac{P_A}{P_S} * 100 \quad (\text{Ecuación 3}).$$

Donde:

P_A = Peso del Agua
 P_S = Peso Seco de la Muestra

$$\rho_S = \frac{\rho_H}{1 + \frac{\% Humedad}{100}} \quad (\text{Ecuación 4}).$$

Donde:

ρ_S = Densidad Seca (kg/m^3).
 ρ_H = Densidad Húmeda (kg/m^3).
 $\% Humedad$ = Contenido de Humedad (%).

Estos valores son colocados en un gráfico cartesiano donde la abscisa corresponde a la humedad y la ordenada a la densidad seca. Es así posible diseñar una curva suave denominada Curva de Compactación (Figura 2) y conseguir el punto donde se produce un máximo al cual corresponda la densidad seca máxima y la humedad óptima mediante la curva de mejor ajuste.

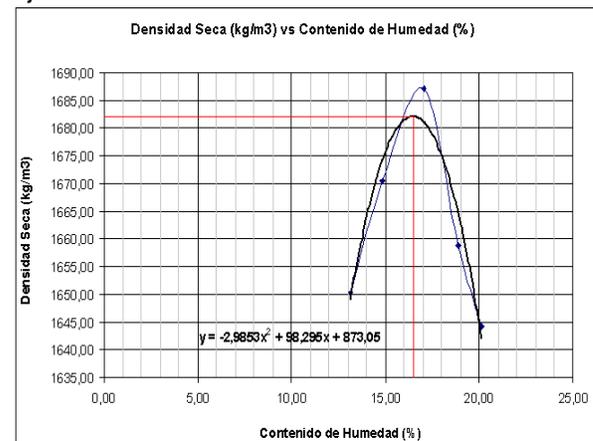


Figura 2. Curva de Compactación para la Obtención de los parámetros de compactación.

La diferencia básica entre el ensayo Próctor Estándar y Modificado, es la energía de compactación usada así como el número de capas en que se compacta la muestra. En el Estándar se deja caer libremente un peso de 2,5 kg a una altura de 30 cm, compactando la muestra en 3 capas a 25 o 56 golpes, dependiendo de la graduación del material. Mientras que el Modificado utiliza un peso de 5kg

el cual cae desde una altura de 45 cm, compactando la muestra en 5 capas a 25 o 56 golpes. Esta diferencia se debe a la existencia de modernos equipos de compactación más pesados que permiten densidades más altas en campo. En el anexo 4, se observa el equipo a utilizar en la prueba.

Además de esto, el criterio que existe para seleccionar el molde a utilizar en la prueba depende del tamaño de partículas de la muestra. Comúnmente se utiliza el molde de mayor dimensión (152,4 mm de diámetro) en muestras con un porcentaje alto de material grueso. El molde de menor dimensión es utilizado en graduaciones un poco más finas.

Por lo tanto, cuando es exigido un suelo compactado al 90% Próctor normal o modificado en campo, significa que la compactación debe alcanzar una densidad seca de por lo menos 90% de la densidad seca máxima obtenida, con los ensayos correspondientes.

Ensayo Contenido de Humedad en Suelos (ASTM-2216)

El contenido de humedad es la cantidad de agua que presenta ya sea un suelo o una roca, se determina mediante la ecuación 3. Según la teoría, el objetivo de los Límites de Consistencia se basa en la obtención del Límite Líquido y Plástico, los cuales, representan contenidos de humedad, así como la prueba Próctor de Compactación tiene como finalidad determinar el porcentaje de agua necesario para la compactación. Dicho ensayo constituye una de las pruebas más ejecutadas en suelos.

Ensayo Granulometría en Suelos (ASTM-422)

Al igual que el ensayo de Contenido de Humedad, la prueba de granulometría en suelos (Ver Anexo 8) representa uno de los métodos más importantes en la ejecución de la mayoría de los ensayos en suelos. Usualmente, la preparación de las muestras de ensayo está basada en la aplicación del método de tamizado, ya sea, para muestras lavadas o secas.

Dicho ensayo consiste en determinar la distribución del tamaño de las partículas en suelos pasando la muestra por diversas mallas, las cuales presentan diferentes tamaños de abertura. De allí, se obtiene los pesos retenidos en cada una de las mallas y se calcula el porcentaje pasando las diversas mallas. Lo anterior permite la elaboración de la curva de distribución granulométrica para un suelo, la cual es utilizada para estudiar el comportamiento del terreno y analizar sus propiedades a la hora de la construcción de una obra con base en la graduación del material, ya sea ésta, graduación A, graduación B o graduación C.

En el caso de las pruebas Próctor de Compactación, la graduación del material es el factor que define el equipo por utilizar en la prueba.

Moldes de Compactación

Los moldes de compactación (Anexos 5 y 6), corresponden a cilindros de metal rígido utilizados en las Pruebas Próctor de Compactación para el moldeo de pastillas de suelo sometidas previamente a la acción de un mazo o martillo de compactación. El molde es utilizado para simular el comportamiento de un suelo en campo bajo la acción de algún equipo de compactación seleccionado, dependiendo del tipo de suelo involucrado. La metodología establecida para las pruebas de compactación, tanto estándar como modificada, establece tres procedimientos para la ejecución de la prueba. Éstos son seleccionados de acuerdo con la graduación del material, y por consiguiente dicha graduación, define a fin de cuentas el tamaño del molde por utilizar.

Las normas internacionales y por ende, el instructivo técnico, establecen dos moldes de compactación cuya diferencia está centrada en el diámetro de cada uno de ellos. El molde más pequeño presenta un diámetro de (101,6±0,4)mm mientras que el molde de mayor tamaño presenta un diámetro de (152,4±0,7)mm. El primero de ellos, es utilizado para especímenes de suelo cuya graduación muestra una mayor presencia de material fino, específicamente un material con un porcentaje alto de partículas pasando la malla N° 4 o la malla de 3/8" (9,0mm). El molde de mayor tamaño es utilizado para un material con predominio de partículas de gran tamaño. Dichos

materiales generalmente muestran una distribución aproximadamente entre 60% o 70% de material retenido en la malla N° 4 y un 40% o 30% de material pasando la misma malla. Esto porque obviamente, un material grueso ocupa más volumen que un material fino independientemente de su estado, sea éste suelto o compactado suponiendo una misma cantidad de muestra. Ambos moldes, en teoría, deben presentar una altura de $(116,4 \pm 0,5)$ mm y un volumen de (944 ± 14) cm³ y (2124 ± 25) cm³ respectivamente.

Mazos de Compactación

Otro de los equipos utilizados en la prueba Próctor de Compactación y posiblemente el más importante de todos ellos es el mazo de compactación.

Precisamente, las normas internacionales utilizan el martillo de compactación como el punto de referencia para diferenciar el ensayo estándar del modificado. En otras palabras y, como se mencionó anteriormente, la energía de compactación es la principal diferencia que existe entre una prueba y otra. El mazo de compactación corresponde a un martillo de metal rígido con una masa, dimensiones y energía de compactación definidas, usado para simular el efecto que produce el equipo de compactación sobre una superficie, en este caso, el suelo. Existen dos tipos de mazos, los cuales se diferencian por su masa, su caída y por consiguiente, por la energía de compactación que transmiten. El mazo utilizado para el ensayo estándar (ver Anexo 7), en teoría, debe cumplir con una masa de $(2,50 \pm 0,01)$ kg, una distancia de caída libre de $(304,8 \pm 1,3)$ mm, un diámetro para el área de contacto de $(50,80 \pm 0,13)$ mm y además debe transmitir una energía de compactación de 600kN-m/m³; mientras que el martillo utilizado para la prueba Próctor Modificado (ver Anexo 8) debe cumplir con una masa de $(4,54 \pm 0,01)$ kg, una caída libre de $(460,0 \pm 1,3)$ mm, un diámetro para un área de contacto de $(50,80 \pm 0,13)$ mm y una energía de compactación de 2700kN-m/m³.

Incertidumbre en Mediciones

La incertidumbre en metrología se define como la característica asociada al resultado de una medición, que define el espacio bidireccional centrado en el valor ofrecido por el instrumento de medida, dentro del cual se encuentra con una determinada probabilidad estadística el valor medido.

Este tipo de incertidumbre se calcula mediante la calibración, obteniendo datos estadísticos de una serie de comparaciones del instrumento de medida calibrado, contra un patrón de referencia o incertidumbre conocida que disponga de trazabilidad documental demostrable a los estándares de medida aceptados internacionalmente.

En primera instancia, se debe considerar la división de escala del equipo utilizado. Posteriormente, se calcula la incertidumbre a un 68% de confiabilidad o $u_{68\%}$:

$$u_{68\%} = \frac{\text{División Escala}}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Ecuación 6.})$$

Luego, se obtiene un factor de calibración el cual es facilitado por el proveedor del equipo respectivo. De allí, se calcula la incertidumbre por calibración la cual es:

$$u_{\text{Calibración}} = \frac{\text{Factor Calibración}}{2} \quad (\text{Ecuación 7.})$$

Cuando se obtengan ambas incertidumbres, se procede a calcular la incertidumbre total al 68% de confiabilidad así:

$$u_{T68\%} = \sqrt{(u_{68\%})^2 + (u_{\text{Calibración}})^2} \quad (\text{Ecuación 8.})$$

Finalmente, con base en la desviación estándar (S) de la muestra y a los grados de libertad (k), calculados como:

$$k = n - 1 \quad (\text{Ecuación 9.})$$

Mediante los grados de libertad, es posible obtener la t_{student} . La distribución t_{student} es utilizada para examinar si la diferencia entre dos

medias de muestras de dos distribuciones normales pueden razonablemente suponerse iguales a cero. Una vez calculado dicho parámetro, se calcula la incertidumbre de la medición mediante la siguiente relación:

$$u_F = \sqrt{(u_{T68\%})^2 + \left(\left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) * t_{student} \right)^2} \quad (\text{Ecuación 10.})$$

Esto corresponde a la incertidumbre final de la medición. Mediante los grados de libertad, es posible obtener la $t_{student}$.

Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis de varianza sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos. Lo anterior con el fin de comprobar si los técnicos trabajan bajo un mismo procedimiento o bien realizan los ensayos de forma diferente, lo cual para efectos de la acreditación, no es válido. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos por comprobar. Típicamente, el análisis de varianza se utiliza para asociar una probabilidad a la conclusión de que la media de un grupo de puntuaciones es distinta a la media de otro grupo de puntuaciones.

Según la teoría, existen dos casos en los cuales se puede aplicar el ANOVA. El primero de ellos se presenta cuando se desea conocer la diferencia que existe entre dos poblaciones de datos, es decir, cuando se requiere comparar dos medias muestrales. El segundo caso corresponde a la comparación de más de dos medias, es decir, un conjunto de más de dos poblaciones.

El análisis de varianza es utilizado, por ejemplo, en la evaluación de desempeño en la ejecución de pruebas por parte de un individuo para verificar si éste trabaja de la misma manera en la ejecución de varias pruebas para un mismo ensayo o si existe algún factor que esté ocasionando una variante en su forma de trabajar a través de la comparación de las medias de los resultados.

Comparación de más de dos medias

“Un análisis de varianza para detectar diferencias en un conjunto de más de dos medias poblacionales, es una simple generalización del análisis de varianza para dos medias” ^{(1),1}

Suponga que se han obtenido muestras aleatorias independientes de p poblaciones con medias $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p$, respectivamente, y una varianza σ^2 . Esto es, se supone que todas las poblaciones tienen la misma varianza. Para mayor generalidad, se puede permitir que las muestras sean distintas. Así, $n_i, i = 1, 2, \dots, p$, es el tamaño de la muestra obtenida de la población i -ésima. El número total de observaciones en el experimento será $n = n_1 + n_2 + \dots + n_p$.

El análisis de varianza incluye el término Suma de Cuadrados Total, el cual involucra la variación existente entre las medias de las muestras y la variación de las observaciones dentro de las muestras. Entonces, la suma de cuadrados total es:

$$SCTotal = SCT + SCE \quad (\text{Ecuación 11}).$$

Donde:

SCTotal: Suma de cuadrados total.

SCT: Suma de Cuadrados de los tratamientos.

SCE: Suma de Cuadrados de Error.

La suma de cuadrados de los tratamientos se relaciona con la variación que existe entre las medias muestrales, mientras que la suma de cuadrados de error está asociada a las variaciones existentes entre cada una de las observaciones y su media respectiva.

Suponga que se tiene una tabla con los siguientes datos:

Cuadro 1. Datos hipotéticos

| P | P ₁ | P ₂ | P ₃ | ... P _i |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| C | y ₁₁ | y ₂₁ | y ₃₁ | y _{i1} |
| | y ₁₂ | y ₂₂ | y ₃₂ | y _{i2} |
| | y ₁₃ | y ₂₃ | y ₃₃ | y _{i3} |
| | y ₁₄ | y ₂₄ | y ₃₄ | y _{i4} |
| | y ₁₅ | y ₂₅ | y ₃₅ | y _{i5} |

¹ Tomado de: “Introducción a la Probabilidad y la Estadística”, Mendenhall, W 1987.

Se tiene un valor T_i correspondiente a la suma de las observaciones "y_i" para cada p_i y un valor \bar{T}_i asociado al promedio de cada p_i. Entonces el procedimiento para realizar análisis de varianza, partiendo de la (Ecuación 11) es:

$$SCTotal = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij})^2 - CM \quad (\text{Ecuación 12}).$$

Donde:

$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij})^2$: suma de cuadrados de todas las

observaciones.

CM: cuadrado medio.

$$CM = \frac{\left(\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \right)^2}{n} \quad (\text{Ecuación 13}).$$

Donde:

$\left(\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \right)$: suma de todas las observaciones

n: número de observaciones.

$$SCT = \sum_{i=1}^p \frac{T_i^2}{n_i} - CM \quad (\text{Ecuación 14}).$$

Donde:

$\sum_{i=1}^p \frac{T_i^2}{n_i}$: Suma de los cuadrados de los totales de

los tratamientos con cada cuadrado dividido entre el número de observaciones en dicho total.

$$SCE = SCTotal - SCT \quad (\text{Ecuación 15}).$$

SCE: suma de cuadrados del error.

p: número de muestras.

$$CME = \frac{SCE}{n - p} \quad (\text{Ecuación 16}).$$

Donde:

CME: cuadrado medio del error

n: número de observaciones.

p: número de muestras.

$$CMT = \frac{SCT}{p - 1} \quad (\text{Ecuación 17}).$$

Donde:

CMT: cuadrado medio de los Tratamientos.

El estadístico de prueba para probar la hipótesis con el fin de verificar si realmente existe diferencia en el rendimiento medio de las muestras es:

$$F = \frac{CMT}{CME} \quad (\text{Ecuación 18}).$$

Dicho valor se compara con F_α , el cual corresponde a un valor dado en tablas (refiérase al Anexo 1) para un $\alpha=0,05$. El valor F_α es buscado mediante los términos v_1 y v_2 . Esto es:

$$v_1 = p - 1 \quad (\text{Ecuación 19}).$$

$$v_2 = n - p \quad (\text{Ecuación 20}).$$

Donde:

p: Número de Poblaciones o muestras.

n: Número de Observaciones Totales.

Si el valor de F, calculado mediante la (Ecuación 18), es menor al F_α entonces se puede concluir que no existe una diferencia significativa en las medias, por el contrario, si fuese mayor se puede concluir que existe una diferencia entre dichas muestras.

Metodología

La metodología seguida tomó como punto de partida, la capacitación personal mediante el estudio de la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005 para ensayos de laboratorio y el sistema de gestión de calidad de la empresa. Lo importante de la capacitación es que se dé una comprensión en conjunto, tanto de la norma como del sistema de gestión, ya que dicho sistema se basa en los estatutos contemplados en la norma INTECO.

Una vez que se tuvo un amplio dominio del tema, se procedió a investigar los procedimientos que involucran los ensayos en gestión. Esto se realizó mediante la ayuda de los técnicos y la lectura de diversas fuentes bibliográficas así como la visita a ciertos espacios en Internet dedicados al tema.

Para la implementación de instructivos técnicos se definió un formato similar al de las normas ASTM y AASHTO, luego dicho formato se acopló a los alcances y los procedimientos estudiados.

Una vez finalizado dicho objetivo, se realizaron las hojas de cálculo con ayuda del programa computacional Microsoft Excel. Se seleccionó este software ya que reúne todas las condiciones y herramientas para cumplir con el objetivo. Más adelante se detallarán las hojas de cálculo y las características que éstas encierran.

Simultáneamente se elaboraron las hojas de registro de resultados para cada ensayo. Estas hojas de registro se establecieron de acuerdo con el formato que presenta el sistema de gestión de calidad de la empresa ITP, pues algunos de sus ensayos se encuentran acreditados y cada uno de ellos tiene definido una hoja de registro. Cada una de estas hojas incluye los parámetros por obtener en el ensayo así como los resultados obtenidos.

Una vez que todos los documentos anteriormente descritos, fueron aprobados para su uso y manipulación, se procedió a capacitar al

personal técnico dentro del alcance de la acreditación, sobre el uso de los documentos, es decir, la forma como se va a llevar a cabo el ensayo, la forma de llenar los registros, cómo introducir los datos a las hojas de cálculo, etc.

Toda la documentación anterior así como la capacitación brindada al personal técnico constituyeron un objetivo fundamental pues permitió cumplir con el último de los objetivos, el cual se basó en la evaluación del desempeño del personal. Dicha evaluación tuvo como base, las pruebas de repetitividad y reproducción en las cuales se hizo uso de la documentación técnica anteriormente descrita. Esto permitió evaluar tanto la efectividad del ensayo como la del técnico que la ejecutó con base en un análisis estadístico.

La metodología anteriormente descrita, constituye una herramienta necesaria para medir si el ensayo está preparado para recibir una evaluación por parte del ECA, la cual involucra la confianza en la hoja de registro definida y la buena capacitación de los técnicos. A continuación se detalla en forma general, la metodología seguida para lograr el cumplimiento de los objetivos de la presente Práctica profesional dirigida.

Norma INTE-ISO/IEC 17025:2005

Uno de los requerimientos que exige la Entidad Costarricense de Acreditación (ECA) a cualquier empresa u organización que desee acreditar sus actividades es el establecer procedimientos que garanticen la calidad del servicio, y se conviertan, en el futuro, en un valor agregado para la empresa. Es por esto, que toda organización cuyo objetivo sea acreditarse debe someterse a las normas ISO (Organización Internacional de Normalización). Actualmente los organismos de acreditación que reconocen la competitividad de las organizaciones o empresas se basan en las normas ISO.

Como se ha mencionado, “la norma INTE-ISO/IEC 17025 es una pauta, la cual dentro de su alcance, incluye todos los aspectos relacionados con los laboratorios y los requisitos que éstos tienen que cumplir para demostrar que son competentes y capaces de generar resultados técnicamente válidos”². No se limita únicamente a cuestiones técnicas, sino que también hace mención a la administración de los recursos, al flujograma organizacional de la empresa y a cuestiones de seguridad, entre otros. Sin embargo, de acuerdo con el alcance del presente proyecto, se analizarán los estatutos meramente técnicos.

La norma INTE-ISO/IEC 17025:2005 hace referencia a que toda empresa interesada en implementar un sistema de gestión de calidad debe establecer sus propias políticas y realizar una declaración de la política de calidad, las cuales deben estar definidas en un *Manual de Calidad*. El Manual de Calidad representa una parte fundamental dentro del funcionamiento del sistema de gestión pues contiene la forma y los procedimientos bajo los cuales se regirá el laboratorio en proceso.

Los *Procedimientos de Gestión* son aquellos procedimientos que debe establecer el laboratorio para atender ciertas actividades que garanticen al cliente la calidad. Dentro de estas actividades se pueden mencionar:

1. Aprobación y emisión de documentos
2. Cambios a los documentos.

3. Revisión de los pedidos, ofertas y contratos
4. Subcontratación de ensayos y de calibraciones
5. Compras de servicios y de suministros
6. Servicio al cliente
7. Quejas
8. Control de trabajos no conformes
9. Posibilidades de Mejora
10. Acciones Correctivas
11. Auditorias Internas, entre otras.

Todo lo anterior debe ser documentado mediante un registro, como parte del sistema de gestión del laboratorio.

Posteriormente, la norma hace referencia a los *Requisitos Técnicos*. Éstos se relacionan con la exactitud y la confiabilidad de los ensayos o de las calibraciones realizadas en el laboratorio, las cuales son determinadas por varios aspectos tales como factores humanos, condiciones de trabajo, equipos, trazabilidad de las mediciones, muestreo y manipulación de ítemes de ensayo y calibración. La norma establece para cada uno de los ítemes anteriores, procedimientos por seguir para minimizar la posibilidad de errores y garantizar la calidad del ensayo realizado y su resultado. Al igual que los procedimientos de gestión, la pauta exige la documentación de una gran cantidad de registros con el fin de controlar con mayor efectividad los aspectos técnicos. Dentro de los registros más importantes se pueden destacar los de uso de equipo, los instructivos técnicos, los registros de toma de datos así como registros donde sea posible controlar cuáles equipos requieren ser calibrados, entre otros.

Otro tipo de documentación manejada son los documentos internos y externos. Los documentos internos son los registros creados dentro de la misma empresa. Estos pueden ser instructivos técnicos, registro de toma de datos, etc. Los documentos externos se refieren a todos aquellos ajenos a la empresa y que se toman como una referencia, como por ejemplo las normas ASTM o AASHTO.

Cabe destacar, que cada uno de los aspectos anteriormente mencionados debe ser confidencial y manejado únicamente por el personal del laboratorio. Únicamente puede hacerse público el Manual de Calidad en donde, como se señaló, se cita la política y los procedimientos de gestión en forma muy general.

² Tomado de: Norma INTE:ISO/IEC 17025:2005

Uno de los aspectos más interesantes es la gran cantidad de documentación que exige la norma. Esto obliga al laboratorio a poseer un sistema de codificación de equipos y registros que faciliten la búsqueda rápida y oportuna de los documentos cuando éstos se requieran.

Para efectos del presente proyecto, se tomarán en cuenta todos estos aspectos y más, pues los objetivos propuestos, pese a ser meramente de índole técnico, deben acoplarse a la política de calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. y a los procedimientos de gestión que encierra.

La norma hace referencia a las auditorías internas y externas. La auditoría interna constituye una evaluación interna realizada por la empresa para identificar y comprobar una eventual no conformidad ante una auditoría externa. Una auditoría externa corresponde a la evaluación llevada a cabo por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) para acreditar ciertos procedimientos de la empresa interesada, la cual, a fin de cuentas, es quien dicta la competencia de dichos procedimientos. En resumen, una auditoría interna es una simulación de una auditoría externa, y es un requisito fundamental realizarla antes de optar por una evaluación externa ya que de lo contrario, se puede dictar una no conformidad. Es importante señalar el hecho de que una sola no conformidad implica la no aprobación de los procedimientos por parte del ECA. Una no conformidad es un procedimiento definido por la empresa ejecutado de manera deficiente por cualquier individuo de la empresa a la hora de una evaluación.

Es importante destacar que el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) no se encarga de acreditar a un laboratorio sino que su tarea es la de acreditar procedimientos con base en la implementación de la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. En este caso, la elaboración de los instructivos técnicos, su buen entendimiento e interpretación, la forma de anotar los datos en los registros, el uso de las hojas de cálculo y la ejecución de los ensayos en sí corresponden a procedimientos técnicos que se espera sean acreditados en corto plazo.

Capacitación Personal

El primer objetivo planteado es la capacitación propia de la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005, así como del Sistema de Gestión de Calidad que se maneja en Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. El objetivo fundamental con dicha capacitación radica en que la mayoría de los documentos y funciones ejercidas por dicha empresa giran en torno a la norma como al sistema en sí, lo cual obliga a cualquier persona que desee ingresar a la empresa a tener un conocimiento básico sobre las políticas de calidad establecidas. Tan es así, que uno de los procedimientos que maneja ITP con respecto al nuevo personal técnico y administrativo es la capacitación de éstos sobre la norma, así, como del sistema de gestión. Todo esto, con la finalidad de que quienes formen parte de la empresa apliquen en sus diversas funciones las políticas de calidad y los procedimientos que esto conlleva.

El contenido de la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005 es sencillo y de fácil comprensión. Sin embargo, se hizo necesario al menos, contar con una aplicación práctica de la norma en alguna organización, lo cual facilitó más la comprensión de la misma. Es por esto, que el primer objetivo del presente trabajo se desarrolló con base en una lectura simultánea entre la norma y el sistema de gestión de calidad de ITP. Esto hizo que se comprendiera mejor y en forma más rápida cada uno de los estatutos mencionados en la norma.

Instructivos Técnicos

Una vez cumplido el primer objetivo propuesto, se procedió a desarrollar el segundo: correspondiente a la elaboración de instructivos técnicos para los siguientes ensayos:

1. Límites de Consistencia o Atterberg (ASTM-4318).
2. Próctor Estándar (ASTM-698)

3. Próctor Modificado (ASTM-1557).

Las pruebas anteriores obligaron a la elaboración de un par de instructivos adicionales y un procedimiento adjunto, los cuales se refieren a:

1. Contenido de humedad (ASTM-2216).
2. Granulometría de suelos (ASTM- 422).
3. Verificación de volumen de Moldes de Compactación (ASTM-698 y 1557).

Un instructivo técnico es un documento en el cual se establecen los pasos por seguir para la realización de un ensayo de laboratorio. Una de las referencias en las cuales se basa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. para realizar los instructivos técnicos son las normas ASTM y AASHTO. Sin embargo, para el presente proyecto las normas ASTM serán la referencia o documento externo más utilizado. Para la realización de los instructivos fue necesario conocer el fundamento y propósito de cada uno de los ensayos anteriormente citados. Es decir, se estudió a fondo de qué trata el ensayo y cuál es el resultado que se espera del mismo.

Además, la observación del desarrollo del ensayo por parte de algunos técnicos y la realización del ensayo por cuenta propia facilitó aún más la elaboración de esos documentos debido a que los pasos establecidos en el instructivo debían acoplarse a los pasos que comúnmente siguen los técnicos de acuerdo con la experiencia de cada uno de ellos.

Estructuración de Instructivos Técnicos

Con base en lo anterior, en lo estipulado en el Manual de Calidad y en los procedimientos técnicos de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A., se procedió a realizar en forma concreta el instructivo. Esto obligó a definir el contenido de los instructivos así como su estructuración siguiendo los formatos establecidos por ITP en otros documentos correspondientes a otras pruebas. Además, cada uno de los instructivos sigue una línea muy similar a las normas ASTM, por lo tanto, dichas normas fueron de gran ayuda en la elaboración de los documentos mas no pasan de ser una simple referencia la cual, como

se observará posteriormente, se cita en los instructivos.

Cabe destacar, que una de las características de los instructivos, es que tratan de relacionar toda la documentación correspondiente a los procedimientos técnicos, entre sí. Es decir, en el instructivo técnico se debe citar aquel documento o Registro de toma de datos en donde, se anoten los resultados correspondientes al ensayo, así como la hoja de cálculo si la hubiere.

Los instructivos se estructurarán de la siguiente forma:

- *Alcance*
En este apartado se presenta el(los) objetivo(s) general(es) del ensayo.
- *Documentos de Referencia*
Se refiere a los documentos externos e internos utilizados como referencias para la elaboración del documento.
- *Resumen del Método*
Consiste en una breve descripción del procedimiento de ensayo por realizar.
- *Significado y uso*
En este apartado se hace referencia a la aplicación práctica que tiene el ensayo y sus resultados.
- *Equipo*
En esta sección se mencionan los equipos de medición por utilizar en el ensayo y una breve descripción de los mismos.
- *Procedimiento*
Se presentan en forma detallada los pasos a seguir en la realización de la prueba.
- *Cálculos*
Se exponen las fórmulas matemáticas, correlaciones o gráficos necesarios para la obtención de los resultados.
- *Reporte*
Se hace referencia a la hoja de registro de toma de datos utilizada para anotar las mediciones obtenidas del laboratorio.
- *Precisión*
En esta sección se presentan los criterios de aceptación del ensayo.

Es necesario señalar que los aspectos anteriormente expuestos, son los mínimos que debe contener un instructivo técnico según el Manual de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A, es decir, se pueden incluir otros

rubros tales como preparación de muestras, calibración de equipos u otros que se consideren necesarios.

Hojas de cálculo para ensayos de laboratorio

Una de las limitaciones que presenta la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. dentro de sus funciones es la falta de capacitación que presenta gran parte del personal, específicamente el técnico, sobre el tema de manejo de programas computacionales. Lo anterior se considera una limitación ya que el volumen de trabajo que presenta ITP es considerable y esto obliga al personal a un aprovechamiento máximo del tiempo. La labor principal de los encargados de laboratorio es la elaboración constante de informes y documentos, además de supervisar diariamente las tareas realizadas. El trabajo de los técnicos consiste en la ejecución de pruebas y ensayos de laboratorio. El programa computacional más utilizado en el laboratorio es sin duda Microsoft Excel, en el cual se crearon las hojas de cálculo. A continuación se muestra una ventana del programa por utilizar.

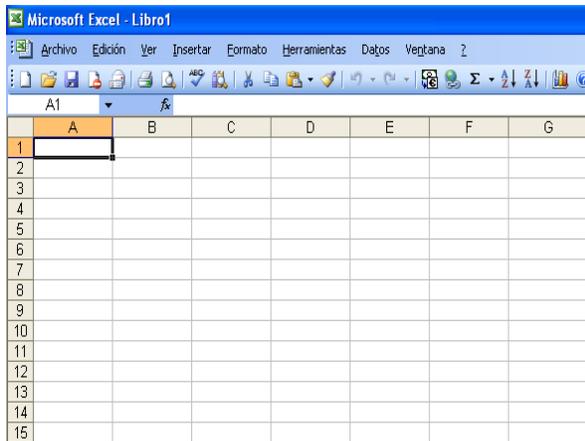


Figura 3. Ventana de hoja de Cálculo de Microsoft Excel

Las hojas de cálculo se realizaron de forma simultánea a las hojas de registro. Éstas fueron programadas con base en el instructivo técnico mencionado anteriormente y en la ejecución de los ensayos en sí.

En forma muy general, la estructuración bajo la cual se adaptaron las hojas de cálculo es:

- Datos Iniciales
- Elaboración de tabla para introducir mediciones anotadas en los registros para cada caso.
- Cálculo automático de varios parámetros, los cuales, mediante correlaciones y fórmulas, llevan al resultado final.
- Cálculo de Incertidumbres, cuando aplique.

Las hojas de cálculo elaboradas fueron:

- Hoja de Cálculo para Límites de Atterberg.
- Hoja de Cálculo para Próctor Estándar y Modificado.
- Verificación de Moldes de Compactación de 101,6 mm.
- Verificación de Moldes de Compactación de 152,4 mm.
- Verificación de Mazos de Compactación Próctor Estándar y Modificado.
- Hoja de Cálculo para Granulometría de Suelos.

Por razones de seguridad, se propuso crear una hoja de respaldo, es una hoja de cálculo la cual permite al creador del programa verificar el estado de la hoja de cálculo y su eficiencia. Consiste en seleccionar un ensayo realizado, introducir las mediciones respectivas en la hoja de cálculo y obtener el resultado esperado. Una vez que dicha hoja de cálculo entró en uso constante por parte del personal de la empresa, se realizaron revisiones periódicas introduciendo los datos del ensayo seleccionado para el respaldo en una copia de dicha hoja de cálculo. Si ésta arrojaba un resultado exactamente igual a la del respaldo, la hoja se encontraba en buen estado. De lo contrario, la hoja debía ser revisada ya que estaría alterada.

Otra de las medidas tomadas en cuenta para prevenir una posible alteración de las hojas electrónicas, es el bloqueo de ciertos componentes (celdas) de la hoja de cálculo, los cuales hacen que el programa funcione eficientemente y que permita únicamente la introducción de los datos por parte de los técnicos sin alterar los componentes programados. El mecanismo utilizado para lograr que el usuario de la hoja electrónica identifique cuáles son las celdas programadas y cuáles no

es el color de éstas. Todas las hojas creadas para el cumplimiento del presente objetivo siguen un formato en el cual, las celdas no programadas, correspondientes a la introducción de los datos y mediciones directas del ensayo, presentan un color turquesa mientras que las celdas programadas presentan un color común predeterminado por el programa.

Estos programas seguirán lo estipulado en el Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. y serán debidamente codificados y señalados en los instructivos correspondientes a la hora de su empleo.

Hojas de Registro de Toma de Datos

Las hojas de registro de toma de datos son documentos que permiten anotar toda medición realizada en el laboratorio y registrar el resultado final de la prueba. Según el Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. existen diversos registros. Los registros constituyen la mayor parte de la documentación de ITP porque abarca registros para toma de datos, entrada y salida de equipos, uso de equipos, proveedores, etc. Para efectos y alcances de dicha práctica, únicamente se realizaron los registros de toma de datos para los ensayos anteriormente citados.

Los registros debían tener un formato bien definido y ordenado, además brindar al usuario una nomenclatura clara de las mediciones que se debían realizar preferiblemente, con sus respectivas unidades. Las hojas de toma de datos se encuentran codificadas y mencionadas en los instructivos técnicos de acuerdo con el código establecido. Las hojas de registro realizadas abarcan los siguientes ensayos:

- Hoja de registro para Límites de Atterberg (Método de Multipunto).
- Hoja de toma de datos para Ensayos de Compactación (Próctor Estándar y Modificado).
- Verificación de Moldes de Compactación para ambos tamaños (101,6 mm y 152,4mm).

- Verificación de Mazos Estándar y Modificado.
- Determinación de la Distribución de Tamaño de las Partículas de un Suelo.

Las hojas de cálculo formaron parte importante en el desarrollo de las hojas de toma de datos. Esto porque las hojas de cálculo y los registros debían tener una cierta semejanza en su formato, pues la idea es que, una vez completa la hoja de registro, las mediciones obtenidas fueran introducidas en la hoja de cálculo realizada y así, obtener el resultado rápidamente. Por esta razón, se elaboraron las hojas de cálculo en forma simultánea y con base en ellas, se realizaron los registros de datos y se acoplaron al Sistema de Gestión de Calidad bajo un código y formato establecido.

Más adelante, se detallarán los registros realizados y cómo se debe utilizar cada uno de ellos.

Verificación de Equipos

Con respecto a la verificación de algunos equipos, se elaboró, a manera de recomendación, un instructivo técnico relacionado únicamente a la verificación de moldes de compactación. Las pruebas de verificación fueron llevadas a cabo para inspeccionar las dimensiones del molde de compactación, y que éstas cumplieran con los requerimientos establecidos. Además, se realizaron algunos registros destinados a la verificación de otros equipos y se estimó la incertidumbre de los instrumentos por medios teóricos. Al igual que los demás instructivos realizados, el instructivo de verificación de moldes se estructuró siguiendo las pautas mínimas establecidas por ITP. La verificación de equipos se centró principalmente en:

- Verificación de moldes de compactación: en esta ocasión, se verifica si el volumen del molde por utilizar cumple con las especificaciones, se toma en cuenta los diámetros promedio y la altura del molde.

- Verificación de Mazos de Compactación: verificar la masa, altura de la caída y diámetro.
- Verificación de Cribas (Mallas): se verifica el tamaño de la abertura con respecto a las especificaciones.
- Incertidumbre en las mediciones: cálculo de incertidumbre en la medición, específicamente para Pie de Rey (Vernier) y Balanzas Digitales.

Para el ensayo de Límites de Atterberg se verificaron otros equipos de menor magnitud y con un grado de sencillez mayor en lo que respecta a la revisión tales como: el espesor del calibrador para la Copa Casagrande, el acanalador y las dimensiones requeridas por el instructivo técnico.

Dicha comprobación incluyó aparatos muy importantes y claves para una excelente ejecución del ensayo como los moldes de compactación, los mazos de compactación y las mallas involucradas dentro del método. Cabe destacar que la verificación de los moldes y de los mazos obligó a confeccionar solamente una hoja de registro de resultados y una hoja electrónica para cada aparato, las cuales se detallarán más adelante, mientras que para la verificación de mallas se elaboró una hoja de cálculo propia y no se tomó en cuenta un registro de este tipo, el cual ya existía en la empresa.

A pesar de que los aspectos anteriores, no se encuentran directamente dentro de los objetivos propuestos en el presente trabajo, éstos forman una parte muy importante dentro los procedimientos técnicos por realizar, ya que todos los equipos deben contar con las dimensiones y rangos de aceptación establecidos en la norma y además, se debe revisar que el laboratorio cuenta con los equipos necesarios para llevar a cabo el ensayo.

Verificación de Moldes de Compactación

La verificación de los moldes de compactación se basó en la revisión de las dimensiones de cada uno de los moldes que posee Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. Básicamente se comprobaron los diámetros superior e inferior promedios, así como la altura interna promedio y por ende, el volumen del molde y verificar que las

dimensiones anteriores cumplan con las especificaciones. La medición de los diámetros superior e inferior consistió en realizar seis mediciones alrededor de la circunferencia del borde superior e inferior respectivamente, y luego obtener el promedio. Dichas mediciones fueron realizadas mediante un pie de rey o vernier digital con una incertidumbre definida mediante las ecuaciones mencionadas en el marco teórico, específicamente en el apartado *Incertidumbre en Mediciones*. La altura promedio se alcanzó realizando tres mediciones de la altura interna del molde utilizando el equipo citado anteriormente. Una vez obtenidos dichos parámetros, se pudo obtener un volumen promedio mediante la siguiente relación:

$$V = \frac{(\pi)(h_{PROMEDIO})(d_s + d_f)^2}{(16)(1000)} \quad (\text{Ecuación 21}).$$

Donde:

V: volumen del molde (cm³).

$h_{PROMEDIO}$: altura promedio (mm).

d_s : diámetro superior promedio (mm).

d_f : diámetro inferior promedio (mm).

Mediante esta relación y la hoja de cálculo realizada, así como del registro elaborado, fue posible comprobar cuatro moldes de 101,6 mm y dos moldes de 152,4 mm que tiene la empresa en este momento. Una vez hechas las mediciones se procedió a introducir los datos en la hoja de cálculo y obtener las conclusiones definitivas acerca del cumplimiento o no de las especificaciones.

Verificación de Mazos de Compactación

Las dimensiones para verificar el estado de los mazos se obtuvieron mediante un vernier para los diámetros y la caída del mazo. Con respecto a la masa de cada martillo, se utilizó una balanza con una escala capaz de brindar dichas magnitudes. El diámetro de cada mazo fue verificado tomando tres mediciones alrededor de la circunferencia del área de contacto y promediando dichas magnitudes. Igualmente, la caída del martillo fue medida tomando tres datos para la distancia de caída libre y luego considerar el valor del

promedio como resultado final. En el caso de la masa, se realizaron tres medidas en la balanza y se obtuvo un valor ponderado el cual, se comparó posteriormente con las especificaciones. Al igual que con los otros equipos verificados, se determinó la incertidumbre en la medición, tanto para la balanza, el pie de rey y la cinta métrica.

La empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. cuenta con tres mazos, dos martillos para la prueba modificada y solamente uno para la prueba estándar. Dichos equipos fueron comprobados mediante la hoja de cálculo así como el registro asociado a dicha revisión. La aceptación de los equipos por utilizar tanto en el trabajo diario de la empresa como en las pruebas de evaluación del desempeño, depende de dichas comprobaciones.

Verificación de Mallas

Las normas relacionadas con la prueba Próctor así como el instructivo realizado, están definidas por tres procedimientos de ejecución dependientes de la graduación del material. Dicha graduación se obtiene sometiendo el material a un proceso de tamizaje manual mediante mallas, las cuales presentan diversos tamaños de abertura.

Para las pruebas de compactación son empleadas únicamente tres mallas: la malla con un tamaño de abertura de 4,75 mm (Nº 4), 9,5 mm (3/8") y 19,0 mm (3/4") (Ver Anexo 9,10 y 11). Éstas definen específicamente la cantidad de material a utilizar en el ensayo así como el molde de compactación a utilizar.

La comprobación de dichas mallas consistió en medir sus aberturas y verificar que éstas cumplieran con el tamaño real especificado en las normas ASTM (refiérase al anexo 2). Se comprobaron la mayoría de las cribas respectivas pertenecientes al laboratorio. Específicamente, se verificaron cinco mallas de 3/4", cuatro mallas de 3/8" y tres mallas Nº 4. Cabe destacar que la malla Nº 40 utilizada en el ensayo de Límites Consistencia, no se pudo verificar pues el tamaño de la abertura es muy pequeño e imposibilita comprobar dichas aberturas manualmente con el método utilizado para las otras mallas.

El método de medición empleado consiste, en primera instancia, en: trazar un eje de referencia y una diagonal sobre la malla tomando como punto de inicio dicho eje. La

diagonal debía atravesar aproximadamente el centro de dicha malla. Posteriormente, tomando como referencia dicha diagonal, se debió seleccionar dos aberturas del lado izquierdo y derecho de dicha diagonal a lo largo de ésta. Una vez hecho esto, se midió cada una de las aberturas. Cada abertura se comprobó dos veces en el eje x y dos veces en el eje y con el fin de sacar un promedio por cada abertura de su tamaño en el eje x y el eje y , los cuales deben ser, en teoría, iguales. Todo lo anterior se debió realizar para todas las aberturas al alcance de dicha diagonal. Las Figuras 4 y 5 muestran en forma gráfica, el método empleado.

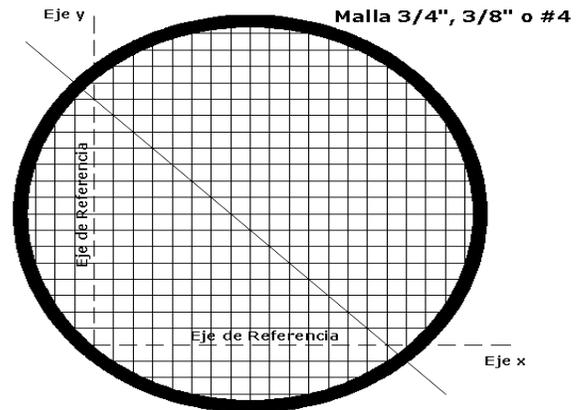


Figura 4. Forma gráfica para Comprobación de Mallas Paso 1. Trazado de eje de referencia y diagonal.

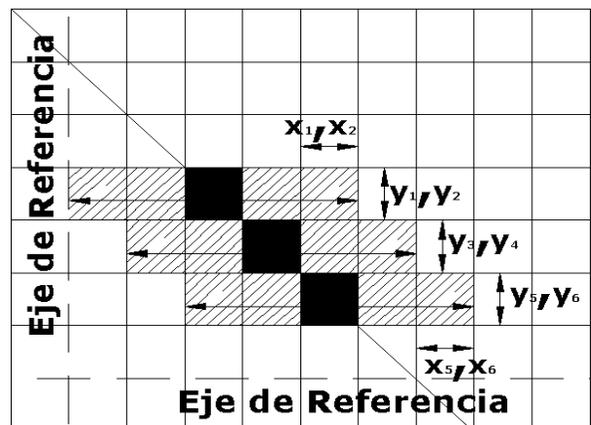


Figura 5. Forma gráfica para Comprobación de Mallas Paso 2. Medición de Aberturas en el eje y – eje x .

Además, se realizó la corrección por temperatura para cada malla, con el fin de verificar si los efectos de la temperatura a la hora de la medición influyen en la expansión o contracción lineal de las aberturas mediante la siguiente relación:

$$L_{\alpha} = L_o(1 + \alpha(T - T_o)) \quad (\text{Ecuación 22}).$$

Donde:

L_{α} : Longitud corregida por temperatura

L_o : Longitud Inicial

α : coeficiente de dilatación lineal para el hierro de $1,2 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$.

$(T - T_o)$: cambio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Finalmente, se determinó la incertidumbre del Vernier mediante las ecuaciones señaladas en el marco teórico, apartado *Incertidumbre en Mediciones* de la misma manera que los equipos anteriores.

Capacitación al Personal

Una vez cumplidos los objetivos expuestos, se procedió con el cumplimiento de los siguientes. Es importante señalar que los objetivos por cumplir son de gran relevancia puesto que dan inicio a la aplicación práctica de lo realizado en los objetivos anteriores. Esto demuestra el interés de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. por el trabajo realizado.

Como antesala de las pruebas de repetitividad, correspondientes al último de los objetivos de la Práctica Profesional Dirigida, es necesario cumplir con una serie de capacitaciones dirigidas al personal técnico ya que éstos serán los principales usuarios de la documentación técnica elaborada. Conviene señalar que el presente objetivo corresponde a un procedimiento el cual, para los efectos del presente proyecto es muy descriptivo, pues éste implica una breve y eficiente explicación sobre el uso de cada uno de los documentos.

La idea o el principio que se maneja con la capacitación es que cualquier individuo dentro de la empresa, pueda acceder a cualquiera de los documentos y usarlos sin ningún problema antes, durante y después de llevado a cabo el ensayo, además de formar parte de la preparación de cada uno de los técnicos bajo el alcance de la acreditación. Esto significa, que los instructivos,

registros y hojas de cálculo debieron ser lo más claro posibles.

La capacitación fue brindada, solamente a los técnicos dentro del alcance de la acreditación, pues la idea a largo plazo es que dichas personas puedan ejecutar a la perfección los ensayos respectivos.

El mecanismo utilizado para llevar a buen término la capacitación sin afectar las grandes cargas laborales fue realizar un plan de capacitación (Apéndice 16) basado una capacitación individual, es decir, citar a cada uno de los técnicos involucrados en el proceso de implementación a discutir y llegar a ciertas conclusiones acerca de diversos aspectos relacionados con la documentación. Las actividades llevadas a cabo en cada una de las capacitaciones fueron las siguientes:

- Estudio del Objetivo y Significado de cada uno de los ensayos.
- Lectura de Instructivos Técnicos.
- Revisión de hojas de registro.
- Capacitación para uso de Hojas Electrónicas.
- Evaluaciones al personal para la correcta manipulación de las hojas de cálculo.

A raíz de la ejecución de los puntos anteriores, se discutieron aspectos tales como:

- La relación existente entre el contenido de la norma ASTM respectiva y el instructivo técnico.
- Principio u objetivo de la prueba.
- Posibles modificaciones a la documentación técnica.
- Verificación de equipos a utilizar.
- Alcances y limitaciones de las hojas electrónicas.

Cuando se plantearon los objetivos de la Práctica Profesional Dirigida, dentro de los cuales se encuentra la capacitación y la evaluación técnica como objetivos finales, no se especificó la cantidad de técnicos por evaluar, los cuales corresponden a tres personas por ensayo. Por razones de confidencialidad de la empresa, se reservará el nombre de cada uno de los técnicos. A fin de cuentas, la capacitación es lo que vale y su efectividad se verá reflejada en los resultados

obtenidos en las pruebas de repetitividad, de las cuales se discutirá más adelante.

Como parte del Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A, fue necesario llenar una serie de registros mediante los cuales la empresa maneja y controla las capacitaciones brindadas por cualquier persona independientemente de su puesto y del carácter de la capacitación.

Evaluación del Desempeño

Pruebas de Repetitividad y Reproducibilidad

Las pruebas de repetitividad y reproducción constituyen la meta más representativa del proyecto pues, la eficiencia de la documentación técnica y las capacitaciones realizadas están reflejadas en los resultados obtenidos en dichos ensayos. Estas pruebas corresponden a una serie de ensayos, realizados por cada uno de los técnicos bajo el alcance de la acreditación, para verificar la efectividad de cada uno de ellos en la ejecución de la prueba y en el resultado obtenido para el respectivo método con base en un análisis estadístico y determinar si una persona está lista para afrontar una futura auditoria externa.

El objetivo de las pruebas de repetitividad surge ante la necesidad de calificar a un técnico a la hora de ejecutar un ensayo. En primera instancia, se evalúa que el técnico siga a cabalidad cada uno de los pasos contenidos en los instructivos técnicos. Al lograr esto, se puede esperar un resultado aceptable para una prueba. Entonces, las pruebas de repetitividad se utilizan para evaluar la eficiencia de un técnico y su constancia a la hora de ejecutar el ensayo mientras que las pruebas de reproducibilidad constituyen ensayos que relacionan las pruebas de repetitividad entre los técnicos y permiten comprobar que los técnicos participantes en el proceso de implementación de dichos ensayos realizan las pruebas de una forma relativamente igual.

Por ejemplo, un técnico que realice 3 ensayos de repetitividad obtendrá tres resultados,

los cuales, en buena teoría, tendrían que ser similares uno del otro. Estos tres resultados son analizados mediante un análisis de varianza, para luego ser comparados con lo obtenido por los otros técnicos evaluados con el mismo análisis y es en ese momento donde entran en competencia las pruebas de reproducibilidad. Pero de allí nace la pregunta: ¿cómo hacer que las pruebas arrojen resultados similares entre éstas y poder comprobar la eficacia del técnico? La respuesta a esta pregunta se basa en la llamada “Muestra Patrón”, la cual corresponde a una muestra universal extraída únicamente para la elaboración de todas las pruebas de repetitividad y reproducibilidad. Cada una de éstas cumple con ciertas propiedades asociadas a la ejecución del ensayo. Más adelante se comentará sobre dichas muestras.

Estas pruebas implicaron el uso de la documentación técnica realizada (instructivos técnicos, registros, hojas de cálculo) así como de las capacitaciones brindadas a cada técnico. Las pruebas se realizaron en el laboratorio y fueron supervisadas estrictamente por su servidor para comprobar que el ensayo se estuviese ejecutando de la mejor manera y de acuerdo con cada uno de los pasos establecidos en el instructivo respectivo.

Los técnicos bajo el alcance de la acreditación en los ensayos de Límites de Atterberg y Próctor Estándar y Modificado corresponden a tres personas. En la etapa de capacitación, dichos técnicos fueron capacitados sobre el uso de la documentación técnica y la ejecución del ensayo para llevar a buen fin el resultado de la prueba. Cada uno de ellos, llevó a cabo tres pruebas por ensayo, es decir, las pruebas de repetitividad significaron un total de nueve por cada ensayo.

Muestras Patrón

Una muestra patrón es una muestra representativa utilizada exclusivamente para llevar a cabo las pruebas de repetitividad y reproducibilidad. Se extrajo una gran cantidad de muestra de varios lugares, dependiendo de las exigencias del ensayo, y se preparó la suficiente cantidad de especímenes de prueba para suplir a todos los técnicos participantes. Para esto, se debió identificar un espacio físico el cual presentará las condiciones óptimas ya sea, tipo

de material, condiciones climáticas, graduación del material, etc, las cuales cumplieran con los requerimientos del instructivo como tal. No es conveniente utilizar cualquier material pues la idea es que el resultado a obtener cumpla, no sólo con reconocer la efectividad de la ejecución, sino también cumpla con un rango establecido de acuerdo con los conocimientos teóricos o empíricos. Por ejemplo, si se tuviere un limo arcilloso para el ensayo de Límites de Atterberg, se puede esperar que las características de plasticidad reflejadas en el Índice de Plasticidad sean muy altas ya que éste constituye un material con una gran absorción de agua y con características mecánicas muy limitadas reflejadas en las grandes deformaciones que sufre bajo condiciones muy bajas de carga.

Muestra Patrón para el Ensayo de Límites de Atterberg (ASTM-4318)

La muestra patrón para el ensayo de límites de Atterberg (Anexo 12) debió cumplir con ciertas características de plasticidad muy evidentes con el fin de que, a la hora de utilizarlas en las pruebas para la evaluación del desempeño, se obtuvieran resultados muy significativos. Por esta razón, se consideró la posibilidad de utilizar un limo arcilloso el cual, se sabe, constituye un material con una alta plasticidad. No tenía sentido extraer cualquier material, pues existía la posibilidad de extraer un material con muy baja plasticidad o nula, lo cual no sería representativo para los resultados de las pruebas.

Una vez que se definió el tipo de material por utilizar, se seleccionó el sitio de muestreo, este debía cumplir con las condiciones deseadas para la obtención de la muestra. El lugar seleccionado fue el proyecto "Torres del Río", ubicado en la provincia de San José. Dicha obra se encontraba, en ese momento, en la etapa de movimiento de tierras lo cual facilitó aún más el muestreo. Se escogió entonces, un depósito de material de corte con un contenido de limo arcilloso considerable e ideal para los ensayos de repetitividad. El día de recolección de la muestra presentó un clima caliente, lo cual era ventajoso pues parte del método de preparación de la muestra para ejecutar el ensayo, es el secado del material. A pesar de esto, el material contaba con un contenido de agua considerable, lo cual era de esperarse pues al ser un material muy

absorbente, es de gran dificultad que éste se seque en su estado natural.

Con respecto a la cantidad de muestra extraída, se obtuvieron dos sacos del material anteriormente descrito. Dicha cantidad se estimó considerando la cantidad de material que establece el instructivo técnico para cada ensayo, aproximadamente 250g de material pasando la malla N° 40. Una vez que se llevaron los sacos al laboratorio, éstos fueron vaciados y extendidos sobre una lona con el fin de que el material se secase con un abanico para acelerar el proceso de secado por aproximadamente 24 horas. Después de la etapa de secado del material, se procedió a triturar el material mediante una cápsula de porcelana y un pistilo ya que la presencia de grumos o porciones de material adherido era muy numerosa y evidente. Además, el material triturado aportó una gran cantidad de material fino pasando la malla N° 40.

En el momento que el material se encontraba triturado y seco, se comenzó con el tamizado por la malla N° 40 y posteriormente un día antes de ejecutar el ensayo, la muestra debía ser saturada a un 100% y luego ser cerrada para evitar la pérdida de humedad. Absolutamente todo el material contenido en los dos sacos que se obtuvieron del muestreo atravesó dicho proceso de preparación. Con esto, se obtuvo una suficiente cantidad de muestra como para llevar a cabo 18 ensayos. Es decir, se utilizó el material pasando la malla N° 40 para realizar 18 puntos, cada uno de 250g. Como se mencionó en los apartados anteriores, cada uno de los técnicos debe realizar tres ensayos cada uno, y al ser tres técnicos se debieron preparar al menos 9 puntos para 9 ensayos en total. Sin embargo, se realizaron puntos de sobra en caso de que se tuviera que repetir algún ensayo por una mala ejecución.

Muestra Patrón para el Ensayo Próctor Estándar (ASTM-698)

Sin duda alguna, la obtención de las muestras patrón para los ensayos de compactación requirió de una mayor cantidad de trabajo, sobre todo a la hora de preparar el material. Como se señaló antes, la prueba Próctor de Compactación establece tres procedimientos alternativos dependientes de la graduación del material para la ejecución del ensayo en lo que respecta al

molde por utilizar y la cantidad de material a considerar. Se decidió entonces, considerar un material de base para carreteras extraído del Quebrador Santa Ana (ver Anexo 18), el cual es propiedad de Constructora Meco S.A. El proceso del quebrador en lo que respecta a la obtención de material para base de caminos consiste primeramente en obtener, mediante explosivos, grandes cantidades de roca de un tajo. Posteriormente la roca fragmentada se lleva al quebrador donde la máquina pasa dicho material por varias mallas las cuales tamizan el material de manera que al final del proceso el material de base obtenga una graduación de aproximadamente 60% a 70% de material grueso y de 30% a 40% de material fino. El día correspondiente al muestreo se presentó un clima nublado lo cual no era beneficioso pues el material presentaba mucha humedad.

Para efectos de la presente Práctica Profesional Dirigida, se extrajeron seis sacos de material de base del Quebrador Santa Ana. Entonces considerando dicha cantidad de muestra, se escogió el procedimiento A, contenido en el instructivo técnico (Anexo, página), el cual recomienda el uso del molde de 101,6mm y el material pasando la malla N° 4. Se seleccionó dicho procedimiento debido a que no se requiere una gran cantidad de material comparado con el ensayo de compactación modificado. Específicamente se requerían 11,5kg de muestra por ensayo, y al ser nueve ensayos, esto implicaba preparar 103,5kg de material pasando la malla N° 4.

Con base en lo anterior, se procedió a preparar el material. Una vez que los seis sacos se encontraban en el laboratorio, el material se dejó secando mediante un abanico hasta el punto en que el material perdiera un poco de humedad. Posteriormente, se comenzó con el proceso de tamizado, el cual implicaba pasar el material a través de la malla ¾" (19,0mm) y posteriormente por la malla N° 4. Esto se llevó a cabo con el material relativamente húmedo con el fin de acelerar el proceso de secado ya que las partículas más finas se secan más rápido que las gruesas. Se pasó a través de la malla ¾" para apartar las partículas de gran tamaño y facilitar posteriormente el tamizado por la malla N° 4. Una vez que se tamizó absolutamente todo el material, la muestra restante se dejó secando por dos días. Pasado el tiempo, se procedió a realizar los puntos para cada ensayo. Lo anterior se

ejecutó colocando muestra en una bandeja previamente pesada. Una vez que se pesaban 2300g, correspondientes a un sólo punto, la muestra debía ser homogenizada antes de guardarla en pequeñas bolsas, para distribuir la humedad y las partículas finas uniformemente en toda la muestra. Hecho esto, la muestra se almacenó en pequeñas bolsas y fueron cerradas debidamente para evitar la pérdida de humedad. Cabe destacar, que el proceso de preparación anterior, a partir de la preparación de los puntos, se repitió 50 ocasiones, es decir se obtuvieron 50 puntos lo cual representa la cantidad suficiente para ejecutar 9 ensayos correspondientes a las pruebas de desempeño del personal y un ensayo más si fuese necesario. Las muestras patrón para el ensayo de compactación normal se observan en el Anexo 13. El proceso de preparación de dichas muestras se llevó a cabo aproximadamente en una semana y tuvo ciertas limitaciones y contradicciones de las cuales se discutirán en el apartado de discusión de resultados.

Muestra Patrón para el Ensayo Próctor Modificado (ASTM-1557)

La prueba Próctor Modificado significó la prueba que requirió mayor cantidad de muestra y por ende, la que presentó mayores complicaciones. Se procedió primero a buscar el lugar ideal para la extracción de la muestra, que cumpliera con las características y las condiciones necesarias para llevar a buen término los ensayos. Se consideró entonces, un material con propiedades mecánicas considerables para arrojar resultados significativos. Por esta razón, la muestra extraída consistió en una base granular similar a la extraída para el ensayo estándar con la diferencia de que la base obtenida para ésta última provenía de otra veta o estrato rocoso. La cantidad extraída de material representó casi el doble del material utilizado para la prueba estándar, es decir, se muestrearon aproximadamente cinco sacos de material de base de un estrato rocoso definido y días después, cinco sacos de otra base proveniente de una veta diferente por razones, las cuales se detallarán más adelante.

Una vez ingresados los sacos al laboratorio, al contar con un alto contenido de humedad, fueron secados mediante los

mecanismos utilizados en las muestras para los ensayos anteriores. Cuando el material perdió un poco de humedad, se procedió a determinar la graduación del mismo para seleccionar el molde y la cantidad de material a utilizar en cada ensayo. En primera instancia, se homogenizó el material para obtener una distribución uniforme y seguidamente se cuarteó el material con el fin de extraer del material cuarteado una muestra representativa de 15000g aproximadamente. Esta misma cantidad fue tamizada mediante las mallas a las cuales hace referencia el instructivo: $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " y N° 4. La graduación obtenida, una vez tamizada la muestra, obligó a hacer uso del procedimiento C (ver apéndice 5), el cual implicaba la utilización del molde más grande (152,4mm), el material pasando la malla $\frac{3}{4}$ " y una cantidad de material aproximadamente de 5900g. Precisamente se utilizó una cantidad mayor de muestra que la prueba estándar ya que una de las diferencias entre ambas pruebas es el número de capas que deben ser compactadas, significando éstas un total de 5. Además, se hace uso del molde más grande debido a que al ser un material con una mayor proporción de gruesos necesita de un volumen mayor para poder ser bien compactado y que sus partículas sean distribuidas de forma uniforme. Sin embargo, debido a que cada punto debía tener una distribución de gruesos y finos de acuerdo con la graduación obtenida, se necesitaron cantidades diferentes de material pasando la malla N° 4 y pasando la malla de $\frac{3}{4}$ ". Entonces según la granulometría obtenida se necesitaron 106,2kg de partículas finas y 159,3kg de material grueso para suplir la cantidad de ensayos llevados a cabo para la evaluación del desempeño. En efecto, se obtuvo la cantidad suficiente para cubrir dichas pruebas y un poco más, en caso de obtener un mal resultado en algunas pruebas. Sin embargo, como se mencionó, por la gran cantidad de muestra, se tuvo que extraer más muestra del mismo tajo, de la misma graduación pero de diferente estrato rocoso. Éste último fue secado y tamizado por las mismas mallas y luego se homogenizó con la muestra considerada al inicio para realizar las muestras de ensayo. Cada uno de los puntos de 5900g fue almacenado en bolsas grandes y cerradas de manera que no se escapará humedad. Esto porque la prueba Próctor se basa en la variación de la humedad de cada punto partiendo del supuesto que éstos

poseen una humedad inicial similar. Las muestras patrón pueden ser observadas en el Anexo 14.

El proceso de preparación de dichas muestras se hizo en aproximadamente tres semanas. Durante ese lapso se presentaron varias complicaciones, las cuales se discutirán más adelante.

Análisis Estadístico

Análisis de Varianza ANOVA

El análisis de varianza se aplicó para evaluar los resultados obtenidos por el personal técnico. Específicamente, se analizaron tres técnicos en cada una de las pruebas de: Límites de Atterberg y en las dos modalidades del ensayo Próctor de Compactación. Cada persona realizó tres ensayos. Esto quiere decir que para cada ensayo se analizaron, mediante el ANOVA, nueve pruebas. Como lo dice la definición, el análisis de varianza fue considerado ya que éste, permitió comparar los valores obtenidos por un técnico con el personal restante y de éste, se obtiene un criterio para concluir si la población o los técnicos que realizaron las pruebas efectivamente trabajan igual y siguen un mismo procedimiento establecido por el instructivo realizado. Cabe destacar, que dicho análisis y las conclusiones que se obtuvieron de éste, fueron influenciados por muchos factores los cuales serán mencionados en la discusión de resultados.

El programa computacional Microsoft Excel fue la herramienta utilizada para llevar a cabo el análisis de varianza. Dicho programa tiene la capacidad de ejecutar automáticamente el ANOVA siguiendo los conceptos teóricos señalados en el marco teórico. Además de esto, se pudo obtener la incertidumbre de dicho análisis mediante la misma herramienta. En el apartado de resultados serán expuestos los datos obtenidos.

Resultados

Capacitación Personal

Los resultados obtenidos con el objetivo relacionado con la capacitación personal corresponden a aspectos meramente descriptivos y se analizarán en la discusión sobre resultados.

Instructivos Técnicos

Los instructivos técnicos para los ensayos de Límites de Atterberg, Próctor de Compactación, Contenido de Humedad y Distribución de Tamaño de las Partículas en suelos se muestran en los apéndices 1, 4, 5, 8 y 9 respectivamente. El procedimiento para la verificación de moldes de compactación se incluye en el Instructivo Técnico para los ensayos de compactación.

Registro de Toma de Datos

Los registros diseñados para la toma de datos en los ensayos de Límites de Atterberg, Próctor Estándar y Modificado, Granulometría en Suelos y verificación de equipos tanto moldes como mazos de compactación están referidos en los apéndices 2, 6, 10, 12 y 14.

Hojas de Cálculo

Las hojas electrónicas creadas para los ensayos por evaluar así como para la verificación de equipos se presentan en los apéndices 3, 7, 11, 13 y 15.

Verificación de Equipos

Verificación de Moldes de Compactación

Se verificaron cuatro moldes de compactación de 101,6mm de diámetro y dos moldes de 152,4mm. Los cuadros resumen 2 y 3 muestran el promedio del diámetro superior, inferior y la altura interna de los moldes pequeños, mientras que los cuadros 4 y 5 establecen las dimensiones obtenidas para el molde de mayor tamaño. Se detalla además el volumen obtenido con las mediciones tomadas del laboratorio utilizando la (Ecuación 21), el error porcentual con respecto al volumen teórico y la incertidumbre combinada de la medición por el uso del Vernier. Finalmente, dichas tablas señalan el criterio de aceptación del equipo analizado.

Verificación de Mazos de Compactación

El cuadro 6 muestra las mediciones de masa, diámetro y distancia de caída de un mazo para la prueba estándar y dos mazos para la prueba modificada con su respectiva incertidumbre. En el cuadro 7 se comparan las tolerancias con los resultados obtenidos.

Verificación de Mallas

Los cuadros resumen 8,10 y 12 corresponden a la verificación de las mallas de $\frac{3}{4}$ " (19,0 mm), $\frac{3}{8}$ " (9,5 mm) y N° 4 (4,75 mm). Se muestra el tamaño de abertura obtenida por cada malla, tanto en el eje "x" como "y" y su corrección por temperatura. Se detalla además, la incertidumbre en la mediciones en los cuadros 9,11 y 13.

Moldes 101,6mm

| CUADRO 2. VERIFICACIÓN DE MOLDES DE 101,6mm | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Molde | Ø Superior Promedio (mm) | Ø Inferior Promedio (mm) | Altura Interna Promedio (mm) | Volumen Obtenido (cm ³) | Volumen Teórico (cm ³) | Error Porcentual (%) | Incertidumbre de Medición (cm) |
| 1 | 101,86 | 101,83 | 116,39 | 948,1 | 943,7 | 0,47 | 0,4779 |
| 2 | 101,87 | 101,75 | 116,42 | 947,8 | 943,7 | 0,43 | 1,2082 |
| 3 | 101,79 | 102,07 | 115,54 | 942,8 | 943,7 | 0,09 | 2,6589 |
| 4 | 101,89 | 101,87 | 116,35 | 948,5 | 943,7 | 0,50 | 0,5514 |

| CUADRO 3. COMPARACIÓN DE MEDICIONES Y TOLERANCIA | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|----------|
| Molde | Volumen Obtenido (cm ³) | Tolerancias (cm ³) | Criterio |
| 1 | 948,1 | (943,7±14,0) | CUMPLE |
| 2 | 947,8 | (943,7±14,0) | CUMPLE |
| 3 | 942,8 | (943,7±14,0) | CUMPLE |
| 4 | 948,5 | (943,7±14,0) | CUMPLE |

Moldes 152,4mm

| CUADRO 4. VERIFICACIÓN DE MOLDES DE 152,4mm | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Molde | Ø Superior Promedio (mm) | Ø Inferior Promedio (mm) | Altura Interna Promedio (mm) | Volumen Obtenido (cm ³) | Volumen Teórico (cm ³) | Error Porcentual (%) | Incertidumbre de Medición (cm) |
| 1 | 152,72 | 152,70 | 116,43 | 2132,54 | 2123,31 | 0,43 | 1,6258 |
| 2 | 152,48 | 152,53 | 116,60 | 2129,88 | 2123,31 | 0,31 | 5,1534 |

| CUADRO 5. COMPARACIÓN DE MEDICIONES Y TOLERANCIA | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|----------|
| Molde | Volumen Obtenido (cm ³) | Tolerancias (cm ³) | Criterio |
| 1 | 2132,54 | (2123,31±25,00) | CUMPLE |
| 2 | 2129,88 | (2123,31±25,00) | CUMPLE |

Verificación de Mazos de Compactación

| CUADRO 6. VERIFICACIÓN DE MAZOS DE COMPACTACIÓN | | | | | | |
|---|-----------|---------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Mazo | Masa (kg) | Diámetro (mm) | Caída del Mazo (mm) | Incertidumbre Balanza (g) | Incertidumbre Pie de Rey (mm) | Incertidumbre Cinta Métrica (mm) |
| Estándar | 2,498 | 50,71 | 304,67 | 0,0409 | 0,0217 | 0,005 |
| Modificado 1 | 4,532 | 50,70 | 458,73 | 0,0409 | 0,0217 | 0,005 |
| Modificado 2 | 4,533 | 50,68 | 457,33 | 0,0409 | 0,0283 | 0,005 |

| CUADRO 7. TOLERANCIAS Y ACEPTACIÓN DE MEDICIONES | | | | | | |
|---|-------------|---------------|---------------------|------------------------|----------|-----------|
| Mazo | Masa (kg) | Diámetro (mm) | Caída del Mazo (mm) | CRITERIO DE ACEPTACIÓN | | |
| | | | | Masa | Diámetro | Caída |
| Estándar | (2,50±0,01) | (50,80±0,13) | (304,8±1,3) | CUMPLE | CUMPLE | CUMPLE |
| Modificado 1 | (4,54±0,01) | (50,80±0,13) | (460,0±1,3) | CUMPLE | CUMPLE | CUMPLE |
| Modificado 2 | (4,54±0,01) | (50,80±0,13) | (460,0±1,3) | CUMPLE | CUMPLE | NO CUMPLE |

Verificación de Mallas de 3/4" (19,0mm)

| CUADRO 8. TAMAÑO DE ABERTURA PARA MALLAS 3/4" (19,0mm) | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|--|--|
| Malla # | Abertura Promedio "x" | Abertura Promedio "y" | Corrección de Aberturas por T (° C) en "x" | Corrección de Aberturas por T (° C) en "y" |
| 1 | 18,9616 | 18,9982 | 18,961828 | 18,998428 |
| 2 | 18,7740 | 19,1048 | 18,774747 | 19,105594 |
| 3 | 18,9578 | 18,9759 | 18,958085 | 18,976180 |
| 4 | 18,7380 | 18,9974 | 18,737743 | 19,001941 |
| 5 | 18,9725 | 19,0227 | 18,972728 | 19,022937 |

| CUADRO 9. INCERTIDUMBRE Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|--------------|--------------|------------------------|
| Malla # | Incertidumbre en "x" | Incertidumbre en "y" | Tolerancias | | Criterio de Aceptación |
| | | | Medición "x" | Medición "y" | |
| 1 | 0,0288 | 0,0385 | (19,0±0,6)mm | (19,0±0,6)mm | CUMPLE |
| 2 | 0,0185 | 0,0249 | | | CUMPLE |
| 3 | 0,0287 | 0,0260 | | | CUMPLE |
| 4 | 0,0210 | 0,0540 | | | CUMPLE |
| 5 | 0,0323 | 0,0432 | | | CUMPLE |

Verificación de Mallas de 3/8" (9,5mm)

| CUADRO 10. TAMAÑO DE ABERTURA PARA MALLAS 3/8" (9,5mm) | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|--|--|
| Malla # | Abertura Promedio "x" | Abertura Promedio "y" | Corrección de Aberturas por T (° C) en "x" | Corrección de Aberturas por T (° C) en "y" |
| 1 | 9,4908 | 9,4755 | 9,491061 | 9,475748 |
| 2 | 9,5824 | 9,5606 | 9,582669 | 9,560839 |
| 3 | 9,4082 | 9,4338 | 9,408440 | 9,434036 |
| 4 | 9,4963 | 9,4902 | 9,496418 | 9,490331 |

| CUADRO 11. INCERTIDUMBRE Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|--------------|--------------|------------------------|
| Malla # | Incertidumbre en "x" | Incertidumbre en "y" | Tolerancias | | Criterio de Aceptación |
| | | | Medición "x" | Medición "y" | |
| 1 | 0,0154 | 0,0128 | (9,5±0,3)mm | (9,5±0,3)mm | CUMPLE |
| 2 | 0,0126 | 0,0119 | | | CUMPLE |
| 3 | 0,0122 | 0,0154 | | | CUMPLE |
| 4 | 0,0079 | 0,0076 | | | CUMPLE |

Verificación de Mallas # 4 (4,75mm)

| CUADRO 12. TAMAÑO DE ABERTURA PARA MALLAS # 4 (4,75mm) | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|--|--|
| Malla # | Abertura Promedio "x" | Abertura Promedio "y" | Corrección de Aberturas por T (° C) en "x" | Corrección de Aberturas por T (° C) en "y" |
| 1 | 4,7721 | 4,7490 | 4,772178 | 4,749095 |
| 2 | 4,7689 | 4,7836 | 4,768997 | 4,783694 |
| 3 | 4,7748 | 4,7471 | 4,774906 | 4,747178 |

| CUADRO 13. INCERTIDUMBRE Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|---------------|---------------|------------------------|
| Malla # | Incertidumbre en "x" | Incertidumbre en "y" | Tolerancias | | Criterio de Aceptación |
| | | | Medición "x" | Medición "y" | |
| 1 | 0,0083 | 0,0059 | (4,75±0,15)mm | (4,75±0,15)mm | CUMPLE |
| 2 | 0,0073 | 0,0089 | | | CUMPLE |
| 3 | 0,0067 | 0,0078 | | | CUMPLE |

Capacitación al Personal

Al igual que la capacitación personal, los resultados obtenidos corresponden a aspectos descriptivos, los cuales serán discutidos en los apartados posteriores.

Pruebas de Repetitividad y Reproducibilidad

Para cada ensayo de repetitividad ejecutado, se muestran los cuadros para la obtención de los parámetros necesarios, así como las gráficas obtenidas. Recordar que las pruebas fueron realizadas por tres técnicos. Cada uno de ellos ejecutó tres pruebas para Límites de Atterberg. Específicamente, límite líquido, límite plástico e Índice de Plasticidad. Éstas se describen en los cuadros 14 a 22. Posteriormente se detallan los nueve ensayos de compactación tanto Estándar como Modificado. Cada una con su respectiva curva de compactación, además de su densidad seca máxima y humedad óptima requerida. Al igual que el ensayo de Límites de Consistencia, cada técnico llevo a cabo tres pruebas. Los ensayos de compactación estándar se detallan en los cuadros 23 a 31 y las pruebas Modificadas se muestran en los cuadros 32 a 40.

Análisis Estadístico

Una vez finalizadas las pruebas de repetitividad, fue hecho el análisis de varianza. Dicho análisis muestra cuadro resumen con los resultados obtenidos por cada técnico en cada uno de los ensayos, así como la comparación entre las medias muestrales respectivas. En resumen, los cuadros 41, 48 y 53 muestran los resultados por técnico para cada ensayo. Véanse los cuadros 43, 45 y 47, en los cuales se muestra el Análisis de Varianza para el ensayo de Límites de Atterberg para cada uno de los parámetros obtenidos: Límite Líquido, Límite Plástico e índice de Plasticidad.

Los cuadros 50 y 52 hacen referencia al análisis estadístico para las pruebas de compactación estándar. Con respecto a la prueba Modificada, los cuadros 55 y 57 muestran el análisis respectivo. Dichos análisis se aplican para los dos parámetros por obtener: densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo. La información en cada una se basa en lo expuesto en el marco teórico.

Ensayo Límites de Atterberg

Técnico No. 1

| CUADRO 14. PRUEBA # 1 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|---|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | A1 | 2-1 | A-3 | 1 | - | R1 | 1-7 | - |
| # Golpes | 31,00 | 27,00 | 22,00 | 18,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,89 | 7,22 | 7,24 | 7,22 | - | 6,26 | 7,27 | - |
| P_c+P_H (g) | 18,41 | 17,73 | 17,82 | 19,38 | - | 12,47 | 14,13 | - |
| P_H (g) | 10,52 | 10,51 | 10,58 | 12,16 | - | 6,21 | 6,86 | - |
| P_c+P_s (g) | 14,61 | 13,86 | 13,89 | 14,85 | - | 10,84 | 12,29 | - |
| P_s (g) | 6,72 | 6,64 | 6,65 | 7,63 | - | 4,58 | 5,02 | - |
| P_A (g) | 3,80 | 3,87 | 3,93 | 4,53 | - | 1,63 | 1,84 | - |
| % agua | 56,55 | 58,28 | 59,10 | 59,37 | - | 35,59 | 36,65 | - |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,210 |
| b | 63,474 |
| LL | 58 |
| LP | 36 |
| IP | 22 |

| Nomenclatura | |
|--------------|---------------------------|
| P_c : | Peso de Cápsula |
| P_H : | Peso de la muestra húmeda |
| P_s : | Peso de la muestra seca |
| P_A : | Peso de la masa de agua |
| m : | Pendiente |
| b : | Intersección |

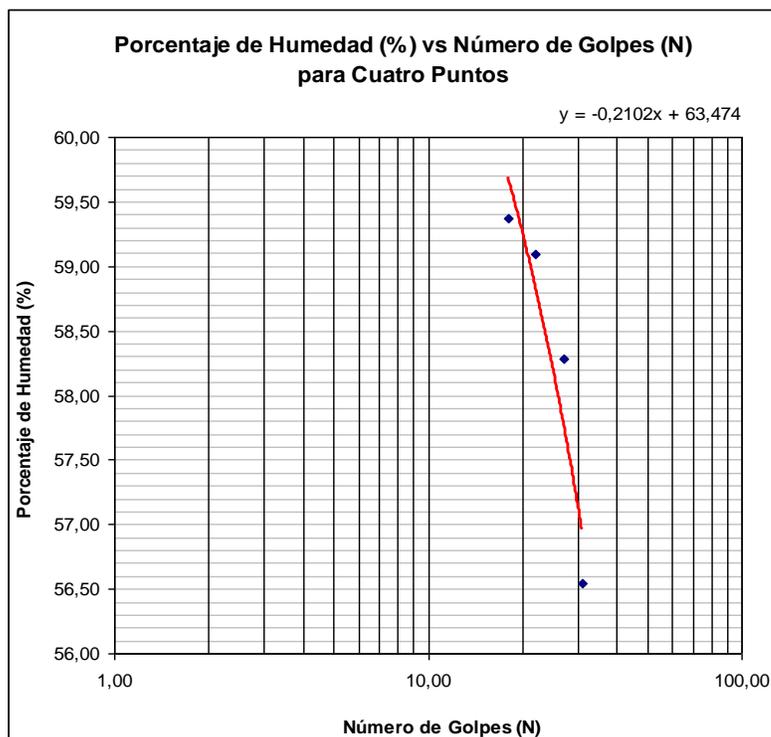


Figura 6. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No.1 Prueba #2

| CUADRO 15. PRUEBA # 2 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|---|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | T-02 | 10 | H | T-01 | - | 3-4 | D1 | - |
| # Golpes | 32,00 | 27,00 | 20,00 | 17,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,60 | 7,75 | 7,77 | 7,92 | - | 7,23 | 7,86 | - |
| P_c+P_H (g) | 20,41 | 19,74 | 18,64 | 19,88 | - | 13,67 | 14,28 | - |
| P_H (g) | 12,81 | 11,99 | 10,87 | 11,96 | - | 6,44 | 6,42 | - |
| P_c+P_s (g) | 15,80 | 15,37 | 14,60 | 15,38 | - | 11,89 | 12,55 | - |
| P_s (g) | 8,20 | 7,62 | 6,83 | 7,46 | - | 4,66 | 4,69 | - |
| P_A (g) | 4,61 | 4,37 | 4,04 | 4,50 | - | 1,78 | 1,73 | - |
| % agua | 56,22 | 57,35 | 59,15 | 60,32 | - | 38,20 | 36,89 | - |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,268 |
| b | 64,704 |
| LL | 58 |
| LP | 38 |
| IP | 20 |

| Nomenclatura | |
|--------------|---------------------------|
| Pc: | Peso de Cápsula |
| PH: | Peso de la muestra húmeda |
| Ps: | Peso de la muestra seca |
| PA: | Peso de la masa de agua |
| m: | Pendiente |
| b: | Intersección |

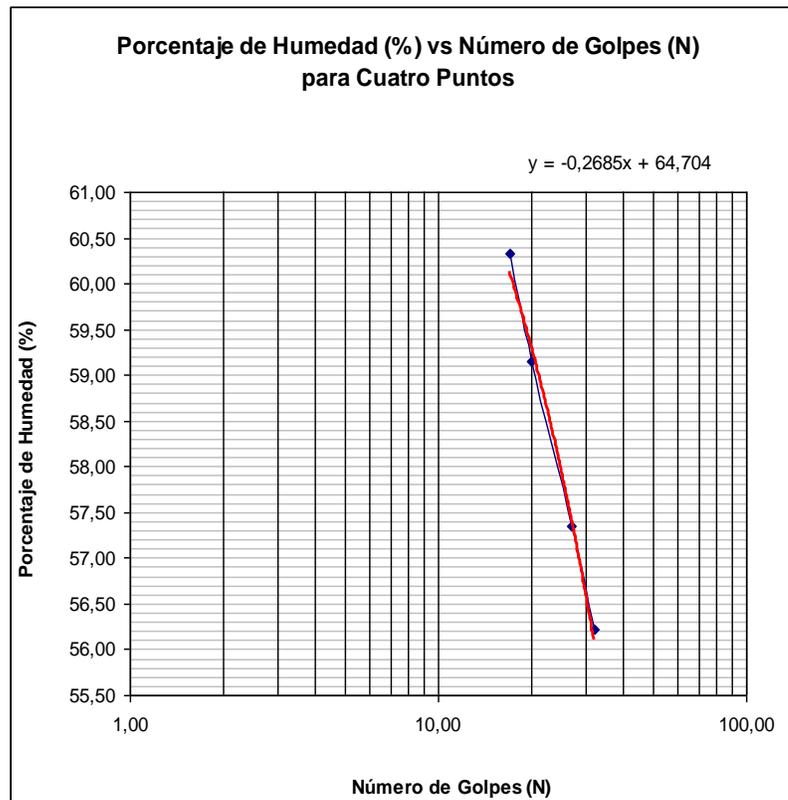


Figura 7. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No. 1 Prueba #2.

| CUADRO 16. PRUEBA # 3 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|---|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | A1 | A3 | 1 | 3-2 | - | X | 2-1 | - |
| # Golpes | 32,00 | 28,00 | 23,00 | 16,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,89 | 7,22 | 7,19 | 7,18 | - | 7,96 | 7,25 | - |
| P_c+P_H (g) | 19,89 | 20,85 | 20,55 | 19,95 | - | 14,52 | 14,65 | - |
| P_H (g) | 12,00 | 13,63 | 13,36 | 12,77 | - | 6,56 | 7,40 | - |
| P_c+P_s (g) | 15,73 | 16,11 | 15,82 | 15,35 | - | 12,90 | 12,80 | - |
| P_s (g) | 7,84 | 8,89 | 8,63 | 8,17 | - | 4,94 | 5,55 | - |
| P_A (g) | 4,16 | 4,74 | 4,73 | 4,60 | - | 1,62 | 1,85 | - |
| % agua | 53,06 | 53,32 | 54,81 | 56,30 | - | 32,79 | 33,33 | - |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,214 |
| b | 59,677 |
| LL | 54 |
| LP | 33 |
| IP | 21 |

| Nomenclatura | |
|--------------|---------------------------|
| Pc: | Peso de Cápsula |
| PH: | Peso de la muestra húmeda |
| Ps: | Peso de la muestra seca |
| PA: | Peso de la masa de agua |
| m: | Pendiente |
| b: | Intersección |

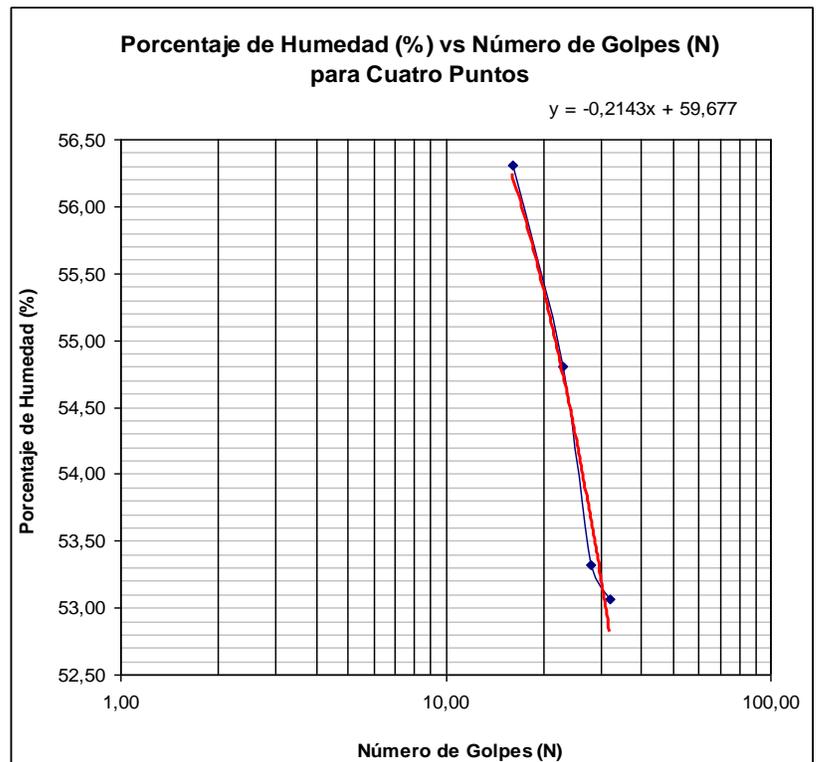


Figura 8. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No. 1 Prueba #3

Técnico No. 2

| CUADRO 17. PRUEBA # 1 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|-------|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | A1 | A3 | 1 | R1 | - | - | 2-1 | 1--7 |
| # Golpes | 35,00 | 28,00 | 22,00 | 15,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,89 | 7,22 | 7,19 | 6,27 | - | - | 7,96 | 7,23 |
| P_c+P_H (g) | 17,00 | 19,89 | 18,41 | 17,85 | - | - | 11,02 | 12,51 |
| P_H (g) | 9,11 | 12,67 | 11,22 | 11,58 | - | - | 3,06 | 5,28 |
| P_c+P_s (g) | 13,80 | 15,38 | 14,28 | 13,51 | - | - | 10,21 | 11,10 |
| P_s (g) | 5,91 | 8,16 | 7,09 | 7,24 | - | - | 2,25 | 3,87 |
| P_A (g) | 3,20 | 4,51 | 4,13 | 4,34 | - | - | 0,81 | 1,41 |
| % agua | 54,15 | 55,27 | 58,25 | 59,94 | - | - | 36,00 | 36,43 |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,307 |
| b | 64,579 |
| LL | 57 |
| LP | 36 |
| IP | 21 |

| Nomenclatura | |
|--------------|---------------------------|
| Pc: | Peso de Cápsula |
| PH: | Peso de la muestra húmeda |
| Ps: | Peso de la muestra seca |
| PA: | Peso de la masa de agua |
| m: | Pendiente |
| b: | Intersección |

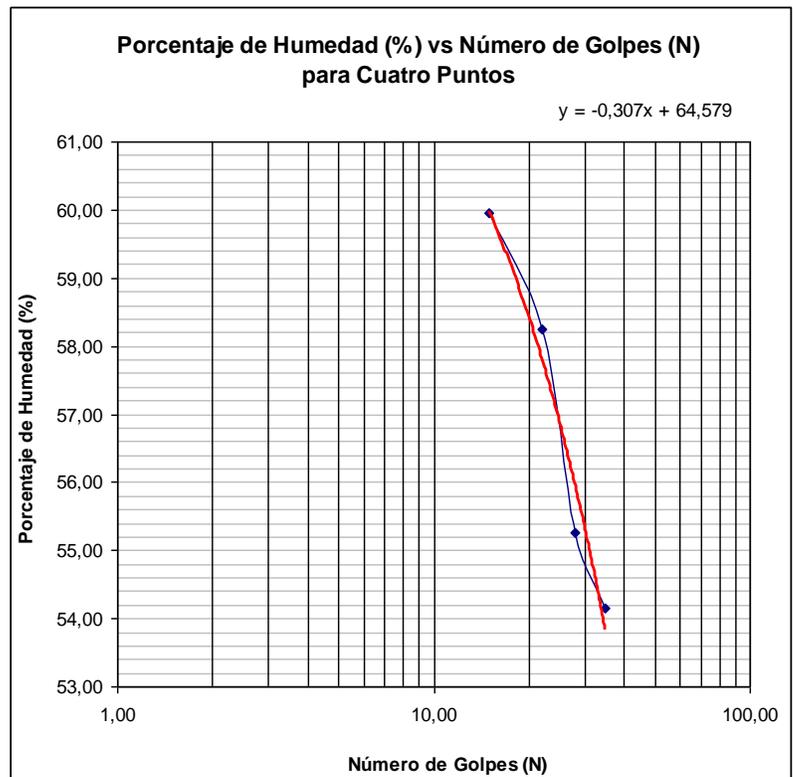


Figura 9. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No. 2 Prueba #1.

| CUADRO 18. PRUEBA # 2 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|---|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | A | R2 | 3-2 | Z | - | X | S1 | - |
| # Golpes | 35,00 | 29,00 | 24,00 | 17,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,86 | 7,23 | 7,18 | 7,26 | - | 7,96 | 7,23 | - |
| P_c+P_H (g) | 18,64 | 18,32 | 17,71 | 18,80 | - | 11,02 | 12,51 | - |
| P_H (g) | 10,78 | 11,09 | 10,53 | 11,54 | - | 3,06 | 5,28 | - |
| P_c+P_s (g) | 14,80 | 14,31 | 13,91 | 14,56 | - | 10,21 | 11,10 | - |
| P_s (g) | 6,94 | 7,08 | 6,73 | 7,30 | - | 2,25 | 3,87 | - |
| P_A (g) | 3,84 | 4,01 | 3,80 | 4,24 | - | 0,81 | 1,41 | - |
| % agua | 55,33 | 56,64 | 56,46 | 58,08 | - | 36,00 | 36,43 | - |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,140 |
| b | 60,294 |
| LL | 57 |
| LP | 36 |
| IP | 21 |

| Nomenclatura | |
|--------------|---------------------------|
| Pc: | Peso de Cápsula |
| PH: | Peso de la muestra húmeda |
| Ps: | Peso de la muestra seca |
| PA: | Peso de la masa de agua |
| m: | Pendiente |
| b: | Intersección |

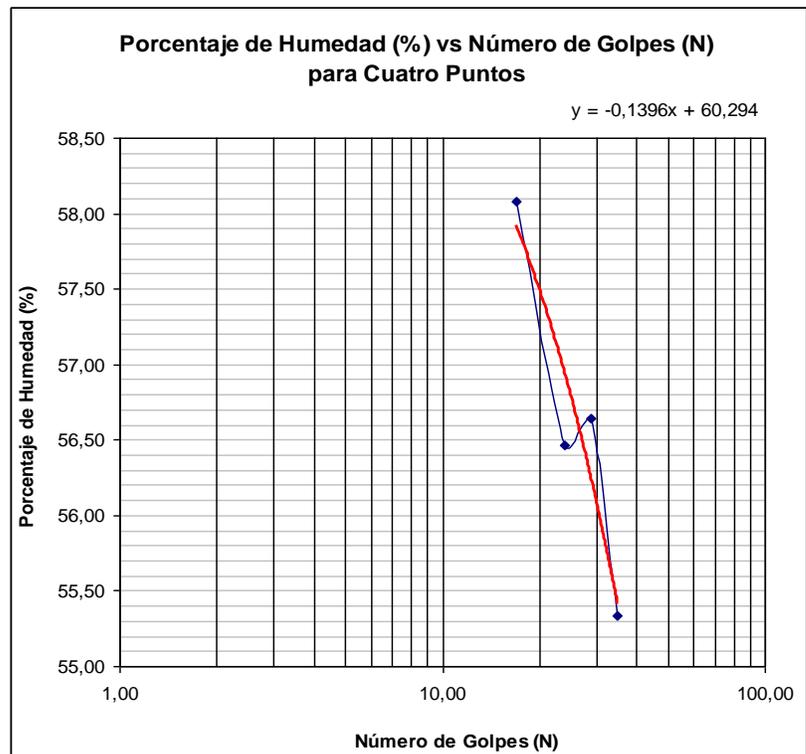


Figura 10. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No. 2 Prueba #2

| CUADRO 19. PRUEBA # 3 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|---|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | X | I | F | 2-S | - | RS | 2-7 | - |
| # Golpes | 33,00 | 28,00 | 23,00 | 16,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,96 | 7,82 | 7,98 | 7,23 | - | 7,10 | 7,19 | - |
| P_c+P_H (g) | 17,41 | 20,36 | 17,62 | 16,69 | - | 13,12 | 11,68 | - |
| P_H (g) | 9,45 | 12,54 | 9,64 | 9,46 | - | 6,02 | 4,49 | - |
| P_c+P_s (g) | 13,98 | 15,79 | 14,06 | 13,22 | - | 11,51 | 10,52 | - |
| P_s (g) | 6,02 | 7,97 | 6,08 | 5,99 | - | 4,41 | 3,33 | - |
| P_A (g) | 3,43 | 4,57 | 3,56 | 3,47 | - | 1,61 | 1,16 | - |
| % agua | 56,98 | 57,34 | 58,55 | 57,93 | - | 36,51 | 34,83 | - |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,067 |
| b | 59,383 |
| LL | 58 |
| LP | 36 |
| IP | 22 |

| Nomenclatura | |
|------------------|---------------------------|
| P _c : | Peso de Cápsula |
| P _H : | Peso de la muestra húmeda |
| P _s : | Peso de la muestra seca |
| P _A : | Peso de la masa de agua |
| m: | Pendiente |
| b: | Intersección |

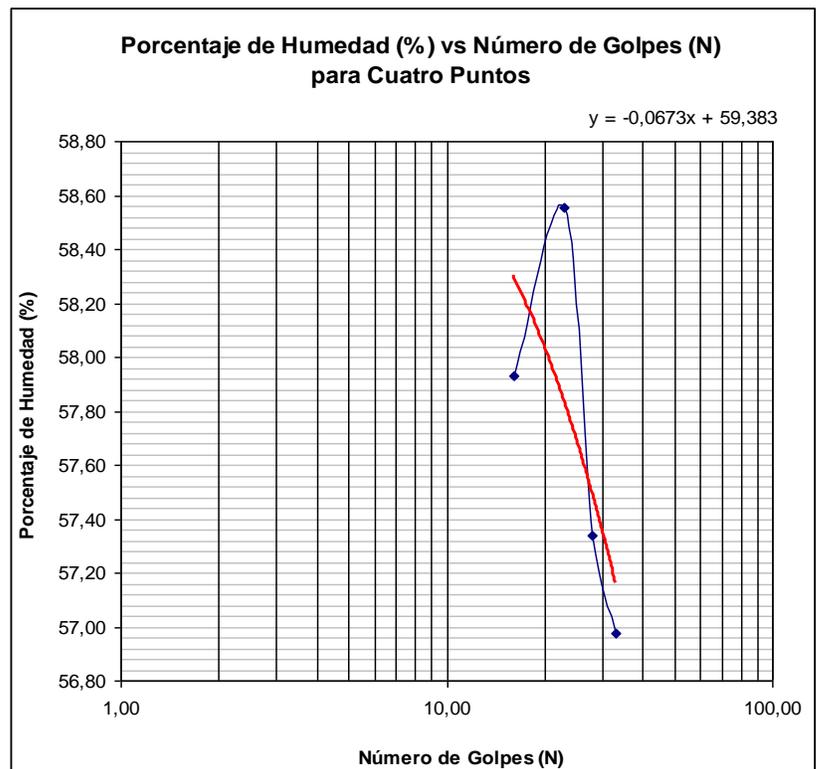


Figura 11. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No. 2 Prueba #3

Técnico No. 3

| CUADRO 20. PRUEBA # 1 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|---|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | 2-7 | A | 1-7 | A-3 | - | M-14 | C-4 | - |
| # Golpes | 33,00 | 26,00 | 20,00 | 16,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,24 | 7,86 | 7,27 | 7,25 | - | 14,85 | 15,10 | - |
| P_c+P_H (g) | 20,75 | 22,21 | 22,48 | 22,85 | - | 19,26 | 20,77 | - |
| P_H (g) | 13,51 | 14,35 | 15,21 | 15,60 | - | 4,41 | 5,67 | - |
| P_c+P_s (g) | 16,06 | 17,18 | 17,09 | 17,23 | - | 18,17 | 19,36 | - |
| P_s (g) | 8,82 | 9,32 | 9,82 | 9,98 | - | 3,32 | 4,26 | - |
| P_A (g) | 4,69 | 5,03 | 5,39 | 5,62 | - | 1,09 | 1,41 | - |
| % agua | 53,17 | 53,97 | 54,89 | 56,31 | - | 32,83 | 33,10 | - |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,176 |
| b | 58,760 |
| LL | 54 |
| LP | 33 |
| IP | 21 |

| Nomenclatura | |
|--------------|---------------------------|
| Pc: | Peso de Cápsula |
| PH: | Peso de la muestra húmeda |
| Ps: | Peso de la muestra seca |
| PA: | Peso de la masa de agua |
| m: | Pendiente |
| b: | Intersección |

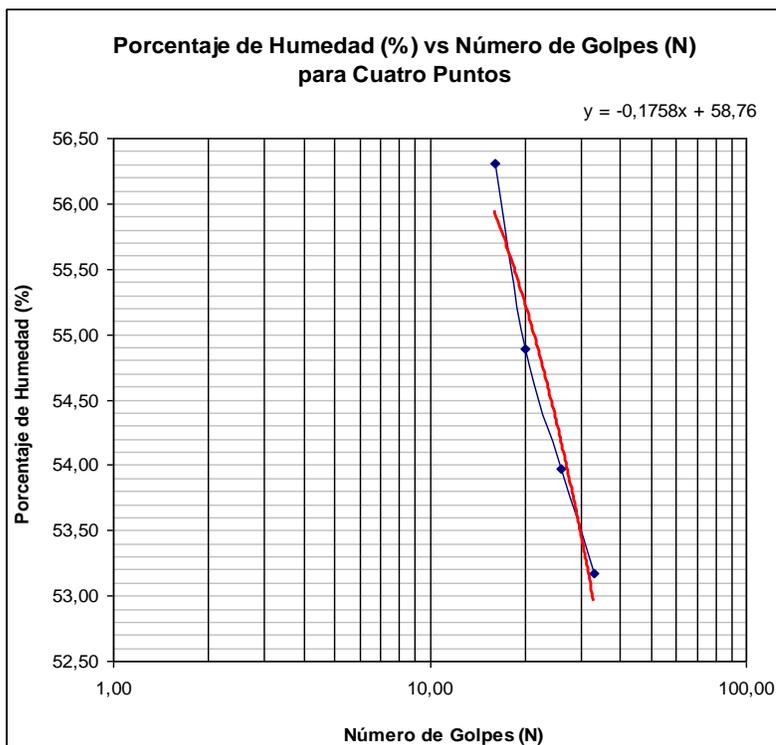


Figura 12. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No.3 Prueba #1

| CUADRO 21. PRUEBA # 2 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|---|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | 2-1 | A-1 | N | F | - | I | 3-2 | - |
| # Golpes | 31,00 | 27,00 | 23,00 | 17,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,20 | 7,91 | 7,27 | 7,98 | - | 7,83 | 7,19 | - |
| P_c+P_H (g) | 21,20 | 20,14 | 20,11 | 20,20 | - | 11,37 | 11,09 | - |
| P_H (g) | 14,00 | 12,23 | 12,84 | 12,22 | - | 3,54 | 3,90 | - |
| P_c+P_s (g) | 16,24 | 15,78 | 15,49 | 15,74 | - | 10,44 | 10,07 | - |
| P_s (g) | 9,04 | 7,87 | 8,22 | 7,76 | - | 2,61 | 2,88 | - |
| P_A (g) | 4,96 | 4,36 | 4,62 | 4,46 | - | 0,93 | 1,02 | - |
| % agua | 54,87 | 55,40 | 56,20 | 57,47 | - | 35,63 | 35,42 | - |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,189 |
| b | 60,618 |
| LL | 56 |
| LP | 36 |
| IP | 20 |

| Nomenclatura | |
|--------------|---------------------------|
| Pc: | Peso de Cápsula |
| PH: | Peso de la muestra húmeda |
| Ps: | Peso de la muestra seca |
| PA: | Peso de la masa de agua |
| m: | Pendiente |
| b: | Intersección |

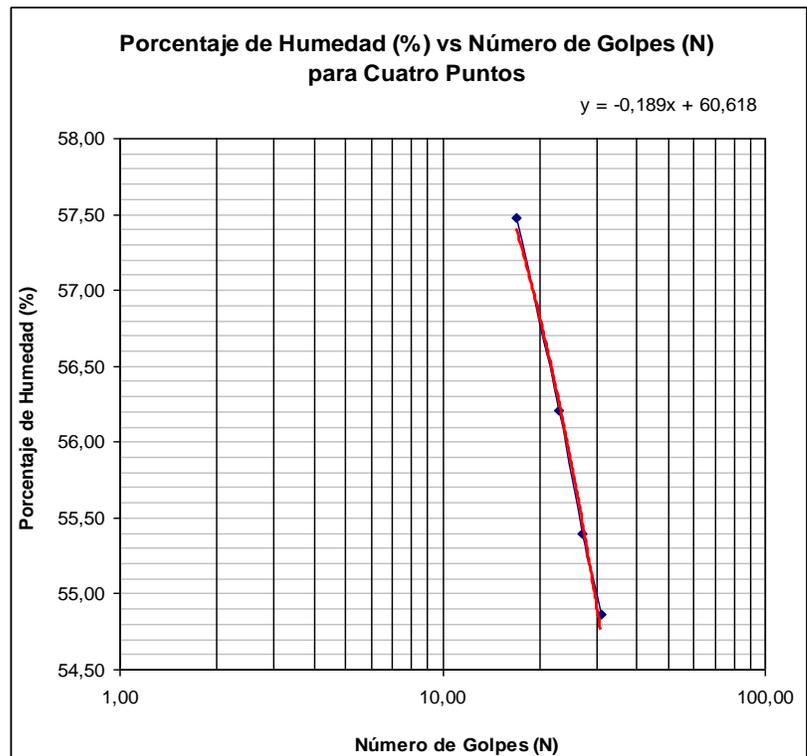


Figura 13. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No. 3 Prueba #2.

| CUADRO 22. PRUEBA # 3 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|---|----------------------|-------|---|
| Ensayo | Límite Líquido (LL) | | | | | Límite Plástico (LP) | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nº Cápsula | 1 | RS | R1 | X1 | - | T | O | - |
| # Golpes | 34,00 | 28,00 | 24,00 | 17,00 | - | - | - | - |
| P_c (g) | 7,20 | 7,19 | 6,28 | 7,31 | - | 13,61 | 13,61 | - |
| P_c+P_H (g) | 20,77 | 18,90 | 22,14 | 23,17 | - | 19,03 | 18,60 | - |
| P_H (g) | 13,57 | 11,71 | 15,86 | 15,86 | - | 5,42 | 4,99 | - |
| P_c+P_s (g) | 15,97 | 14,74 | 16,47 | 17,38 | - | 17,61 | 17,28 | - |
| P_s (g) | 8,77 | 7,55 | 10,19 | 10,07 | - | 4,00 | 3,67 | - |
| P_A (g) | 4,80 | 4,16 | 5,67 | 5,79 | - | 1,42 | 1,32 | - |
| % agua | 54,73 | 55,10 | 55,64 | 57,50 | - | 35,50 | 35,97 | - |

| Parámetros de Clasificación | |
|-----------------------------|--------|
| m | -0,163 |
| b | 59,951 |
| LL | 56 |
| LP | 36 |
| IP | 20 |

| Nomenclatura | |
|--------------|---------------------------|
| Pc: | Peso de Cápsula |
| PH: | Peso de la muestra húmeda |
| Ps: | Peso de la muestra seca |
| PA: | Peso de la masa de agua |
| m: | Pendiente |
| b: | Intersección |

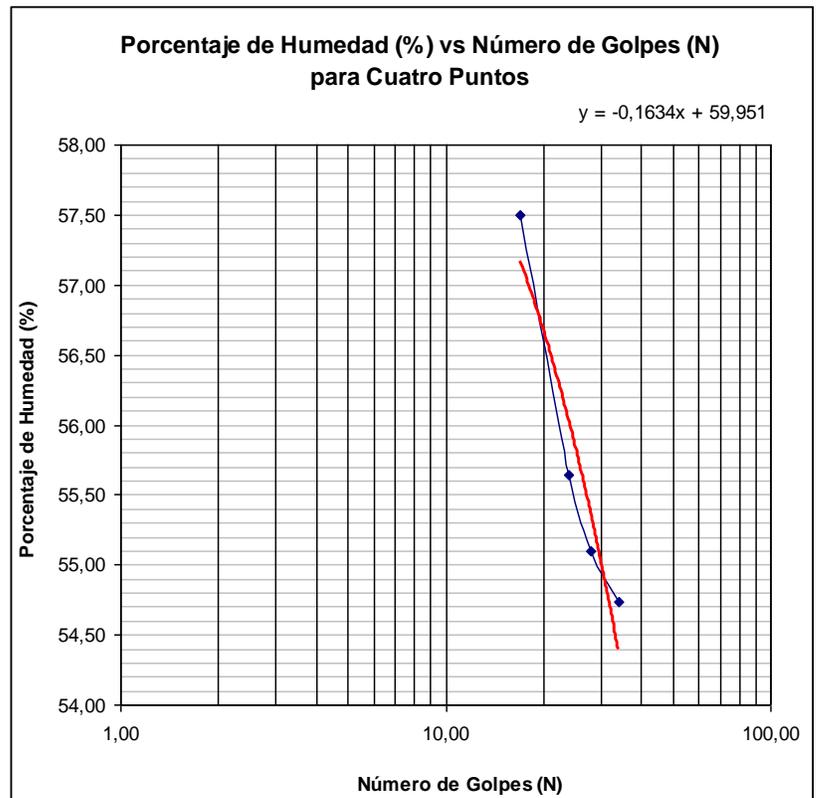
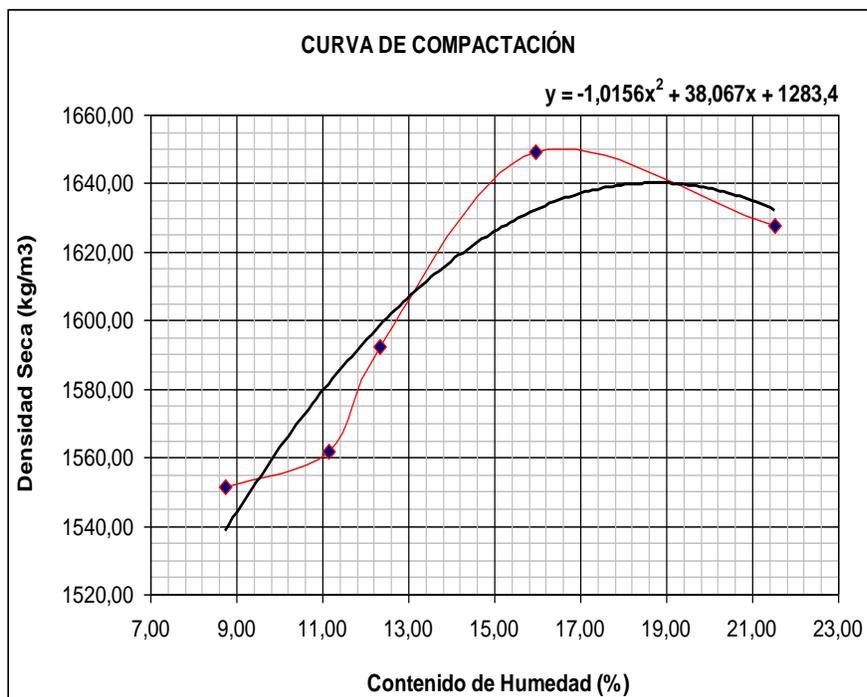


Figura 14. Curva Contenido de Humedad (%) vs Número de Golpes (N) Técnico No. 3 Prueba

Ensayo Próctor Estándar

Técnico No. 1

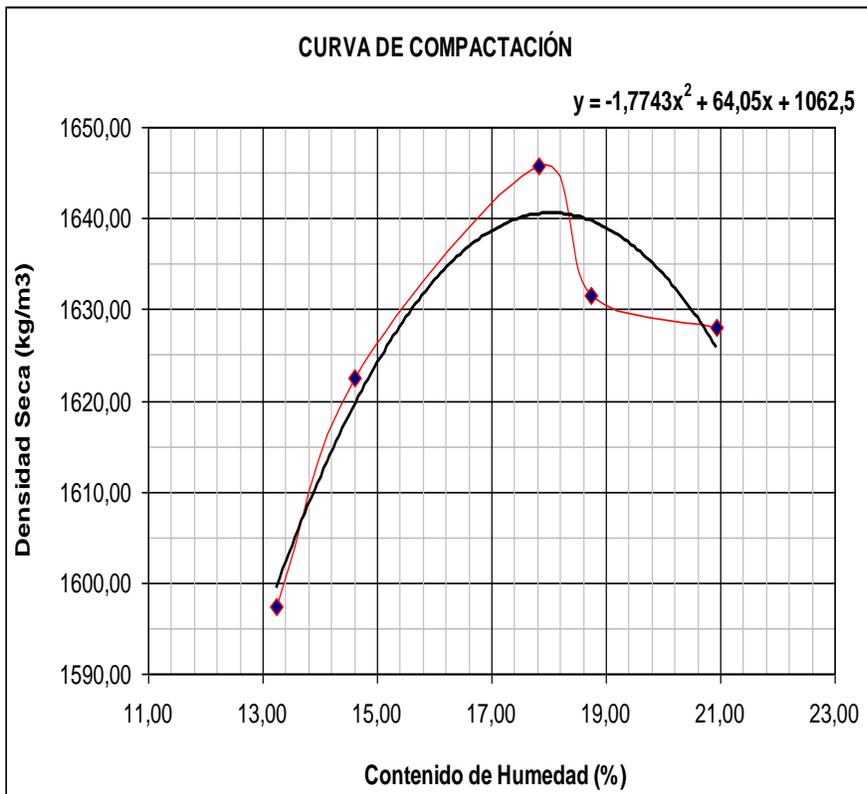
| CUADRO 23. PRUEBA # 1 | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 50 | 100 | 150 | 225 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,525 | 5,571 | 5,621 | 5,738 | 5,8 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,933 | 3,933 | 3,933 | 3,933 | 3,933 |
| V_{molde} (m ³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m ³) | 1687 | 1736 | 1789 | 1913 | 1978 |
| # Cápsula | A2 | A4 | A3 | B2 | X-04 |
| P_c (g) | 175 | 175 | 178 | 413 | 413 |
| P_H+P_c (g) | 710 | 783 | 734 | 1154 | 1220 |
| P_H (g) | 535 | 608 | 556 | 741 | 807 |
| P_s+P_c (g) | 667 | 722 | 673 | 1052 | 1077 |
| P_s (g) | 492 | 547 | 495 | 639 | 664 |
| P_A (g) | 43 | 61 | 61 | 102 | 143 |
| % Humedad | 8,74 | 11,15 | 12,32 | 15,96 | 21,54 |
| ρ_d (kg/m ³) | 1551,40 | 1561,59 | 1592,47 | 1649,41 | 1627,83 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|---------|
| a | -1,0156 |
| b | 38,067 |
| c | 1283,4 |
| % agua óptimo | 18,74 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1640,11 |

Figura 15. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 1 Prueba #1

| CUADRO 24. PRUEBA # 2 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,64 | 5,688 | 5,763 | 5,761 | 5,791 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,933 | 3,933 | 3,933 | 3,933 | 3,933 |
| Vmolde (m³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m³) | 1809 | 1860 | 1939 | 1937 | 1969 |
| # Cápsula | E | C-96 | X-05 | X-01 | B3 |
| P_c (g) | 252 | 411 | 416 | 408 | 471 |
| P_H+P_c(g) | 808 | 1250 | 1209 | 1175 | 1407 |
| P_H (g) | 556 | 839 | 793 | 767 | 936 |
| P_s+P_c (g) | 743 | 1143 | 1089 | 1054 | 1245 |
| P_s (g) | 491 | 732 | 673 | 646 | 774 |
| P_A(g) | 65 | 107 | 120 | 121 | 162 |
| % Humedad | 13,24 | 14,62 | 17,83 | 18,73 | 20,93 |
| ρ_d (kg/m³) | 1597,39 | 1622,54 | 1645,75 | 1631,48 | 1628,10 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -1,7743 |
| b | 64,05 |
| c | 1062,5 |
| % agua óptimo | 18,05 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1640,53 |

Figura 16. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 1 Prueba #2

| CUADRO 25. PRUEBA # 3 | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,635 | 5,694 | 5,774 | 5,749 | 5,805 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,933 | 3,933 | 3,933 | 3,933 | 3,933 |
| V_{molde} (m³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m³) | 1804 | 1866 | 1951 | 1924 | 1984 |
| # Cápsula | A1 | A9 | 1 | J8 | A10 |
| P_c (g) | 175 | 246 | 81 | 81 | 80 |
| P_H+P_c(g) | 715 | 801 | 606 | 962 | 667 |
| P_H (g) | 540 | 555 | 525 | 881 | 587 |
| P_s+P_c (g) | 652 | 729 | 527 | 822 | 563 |
| P_s (g) | 477 | 483 | 446 | 741 | 483 |
| P_A(g) | 63 | 72 | 79 | 140 | 104 |
| % Humedad | 13,21 | 14,91 | 17,71 | 18,89 | 21,53 |
| ρ_d (kg/m³) | 1593,14 | 1623,99 | 1657,29 | 1618,56 | 1632,24 |

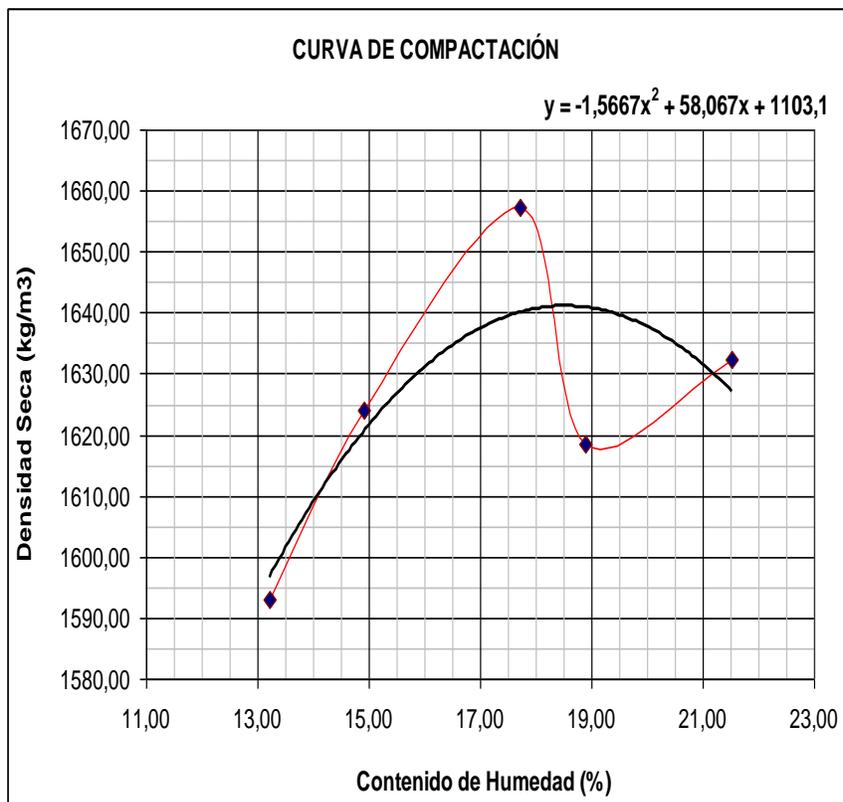
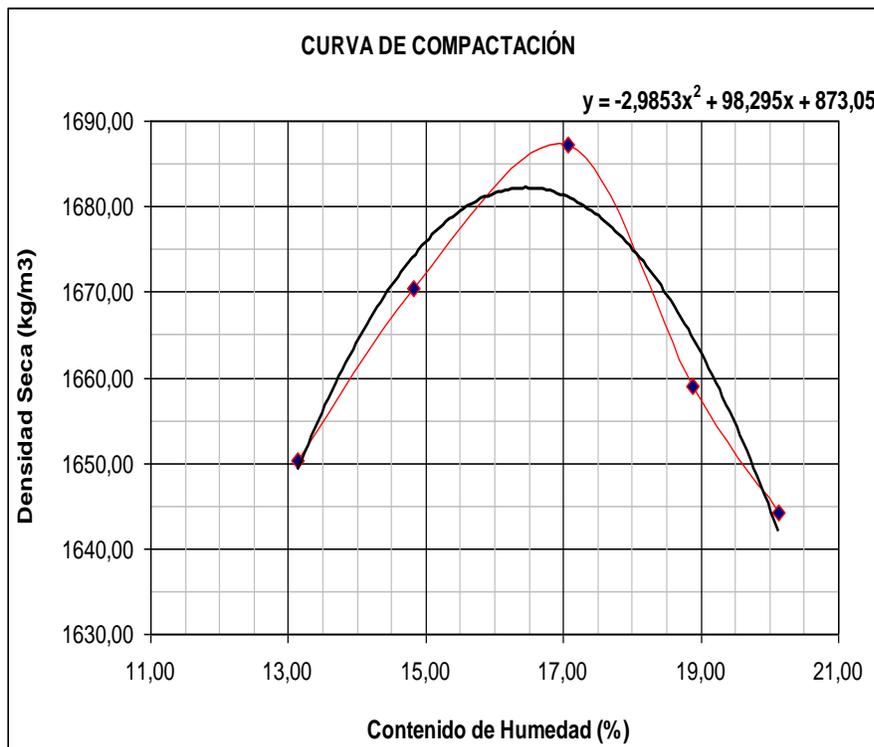


Figura 17. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 1 Prueba #3

| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -1,5667 |
| b | 58,067 |
| c | 1103,1 |
| % agua óptimo | 18,53 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1641,14 |

Técnico No. 2

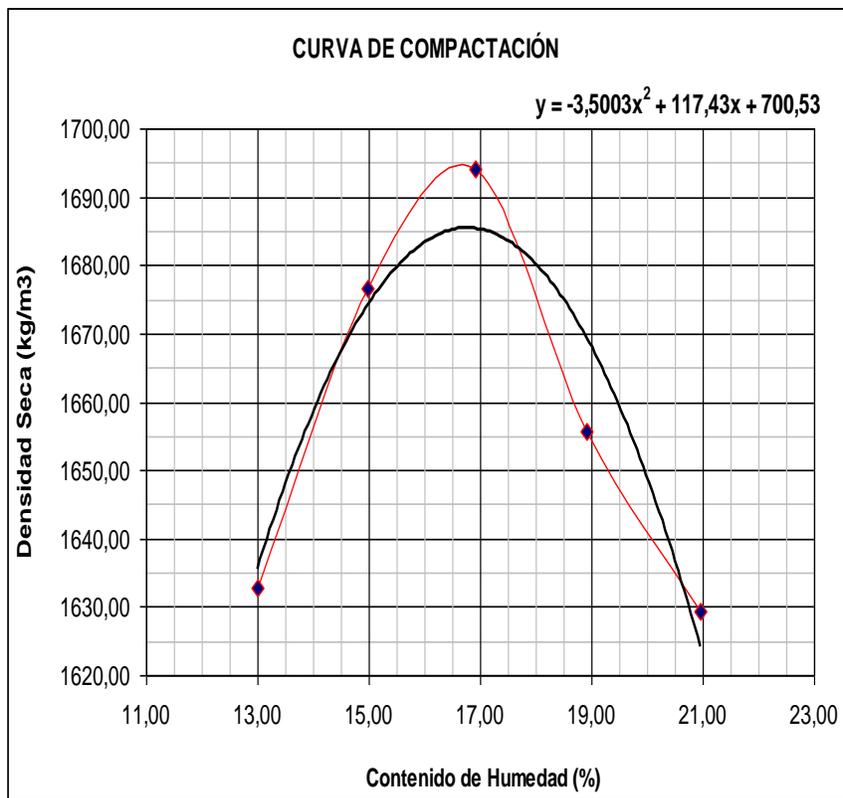
| CUADRO 26. PRUEBA #1 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,694 | 5,742 | 5,796 | 5,793 | 5,796 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 |
| Vmolde (m³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m³) | 1867 | 1918 | 1975 | 1972 | 1975 |
| # Cápsula | G | A-5 | B-4 | X-04 | X-07 |
| P_c (g) | 254 | 254 | 409 | 413 | 412 |
| P_H+P_c(g) | 607 | 657 | 793 | 835 | 788 |
| P_H (g) | 353 | 403 | 384 | 422 | 376 |
| P_s+P_c (g) | 566 | 605 | 737 | 768 | 725 |
| P_s (g) | 312 | 351 | 328 | 355 | 313 |
| P_A(g) | 41 | 52 | 56 | 67 | 63 |
| % Humedad | 13,14 | 14,81 | 17,07 | 18,87 | 20,13 |
| ρ_d (kg/m³) | 1650,27 | 1670,51 | 1687,17 | 1658,95 | 1644,27 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -2,9853 |
| b | 98,295 |
| c | 873,05 |
| % agua óptimo | 16,46 |
| ρ_{d max} (kg/m³) | 1682,17 |

Figura 18. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 2 Prueba #1

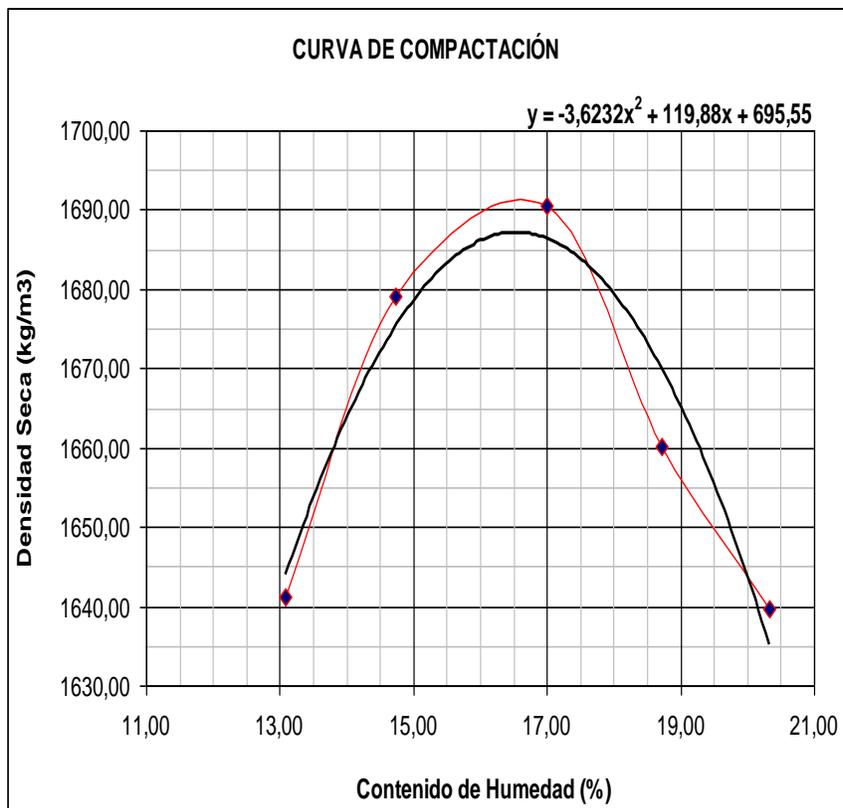
| CUADRO 27. PRUEBA #2 | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,673 | 5,751 | 5,801 | 5,79 | 5,792 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 |
| V_{molde} (m ³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m ³) | 1845 | 1928 | 1981 | 1969 | 1971 |
| # Cápsula | B-2 | E | B-3 | X-05 | C-96 |
| P_c (g) | 412 | 252 | 471 | 416 | 411 |
| P_H+P_c (g) | 612 | 659 | 789 | 812 | 763 |
| P_H (g) | 200 | 407 | 318 | 396 | 352 |
| P_s+P_c (g) | 589 | 606 | 743 | 749 | 702 |
| P_s (g) | 177 | 354 | 272 | 333 | 291 |
| P_A (g) | 23 | 53 | 46 | 63 | 61 |
| % Humedad | 12,99 | 14,97 | 16,91 | 18,92 | 20,96 |
| ρ_d (kg/m ³) | 1632,72 | 1676,53 | 1694,03 | 1655,63 | 1629,42 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|---------|
| a | -3,5003 |
| b | 117,43 |
| c | 700,53 |
| % agua óptimo | 16,77 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1685,43 |

Figura 19. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 2 Prueba #2

| CUADRO 28. PRUEBA #3 | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,6835 | 5,75 | 5,7985 | 5,792 | 5,794 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 |
| V_{molde} (m³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m³) | 1856 | 1926 | 1978 | 1971 | 1973 |
| # Cápsula | H | A-6 | T | ST | X |
| P_c (g) | 333 | 253 | 440 | 414,5 | 411,5 |
| P_H+P_c(g) | 609,5 | 658 | 791 | 823,5 | 775,5 |
| P_H (g) | 276,5 | 405 | 351 | 409 | 364 |
| P_s+P_c (g) | 577,5 | 606 | 740 | 759 | 714 |
| P_s (g) | 244,5 | 353 | 300 | 344,5 | 302,5 |
| P_A(g) | 32 | 52 | 51 | 64,5 | 61,5 |
| % Humedad | 13,09 | 14,73 | 17,00 | 18,72 | 20,33 |
| ρ_d (kg/m³) | 1641,21 | 1679,13 | 1690,49 | 1660,15 | 1639,73 |

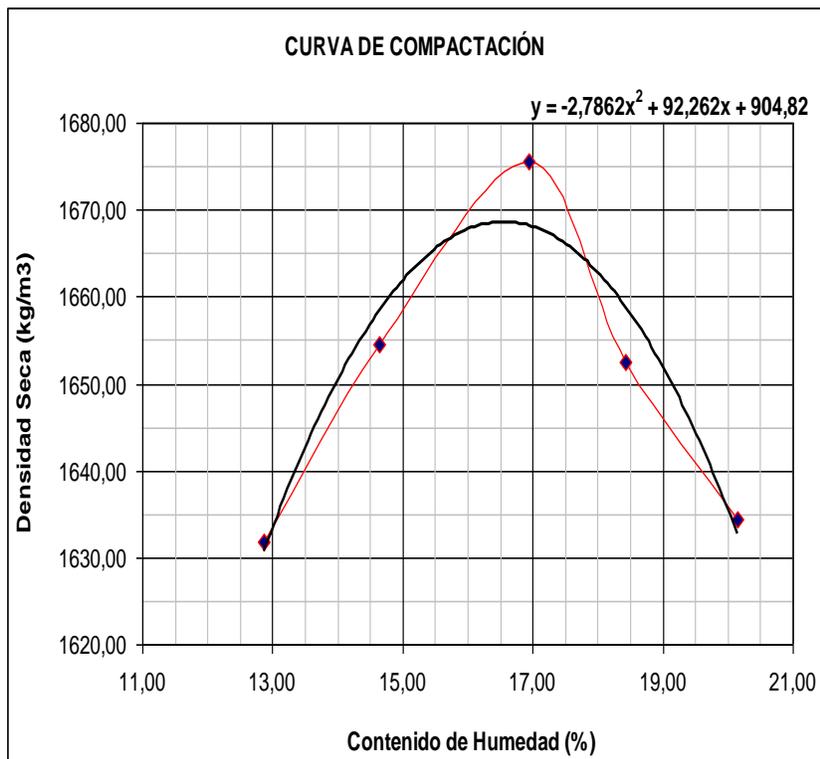


| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -3,6232 |
| b | 119,88 |
| c | 695,55 |
| % agua óptimo | 16,54 |
| ρ_{d max} (kg/m³) | 1687,16 |

Figura 20. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 2 Prueba #3

Técnico No. 3

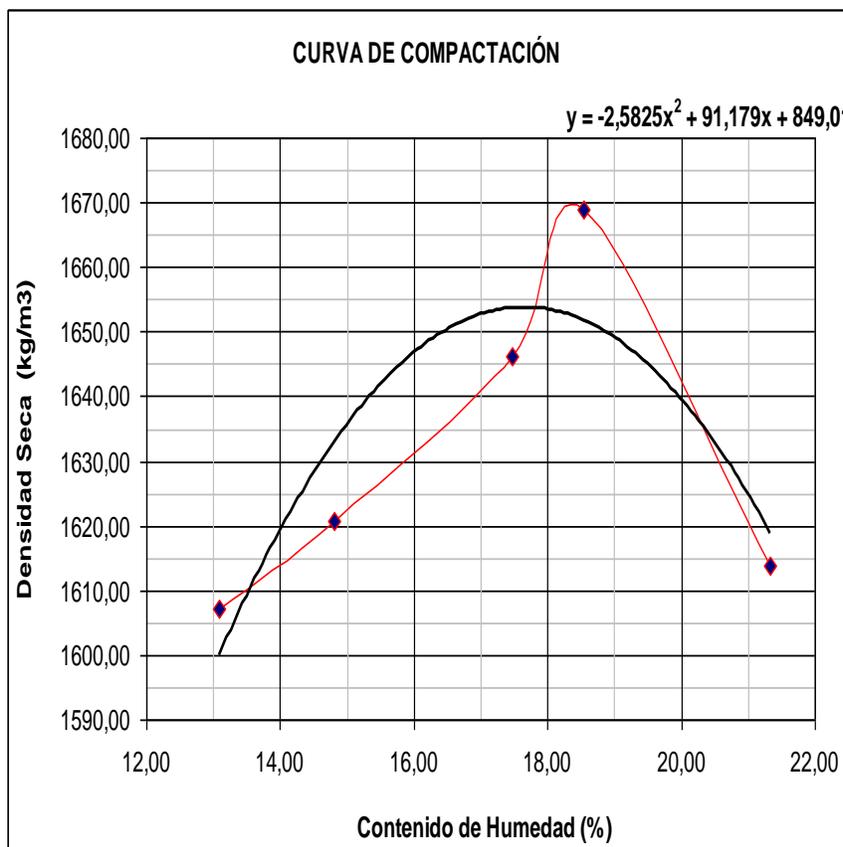
| CUADRO 29. PRUEBA #1 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,67 | 5,722 | 5,781 | 5,779 | 5,785 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 |
| Vmolde (m³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m³) | 1842 | 1897 | 1959 | 1957 | 1964 |
| # Cápsula | C-96 | B3 | E | X-05 | X-01 |
| P_c (g) | 411 | 471 | 252 | 416 | 408 |
| P_H+P_c(g) | 911 | 980 | 763 | 930 | 915 |
| P_H (g) | 500 | 509 | 511 | 514 | 507 |
| P_s+P_c (g) | 854 | 915 | 689 | 850 | 830 |
| P_s (g) | 443 | 444 | 437 | 434 | 422 |
| P_A(g) | 57 | 65 | 74 | 80 | 85 |
| % Humedad | 12,87 | 14,64 | 16,93 | 18,43 | 20,14 |
| ρ_d (kg/m³) | 1631,75 | 1654,58 | 1675,59 | 1652,58 | 1634,37 |



| Tabla 8. Resultados Obtenidos | |
|---|---------|
| a | -2,7862 |
| b | 92,262 |
| c | 904,82 |
| % agua óptimo | 16,56 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1668,61 |

Figura 21. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 3 Prueba #1

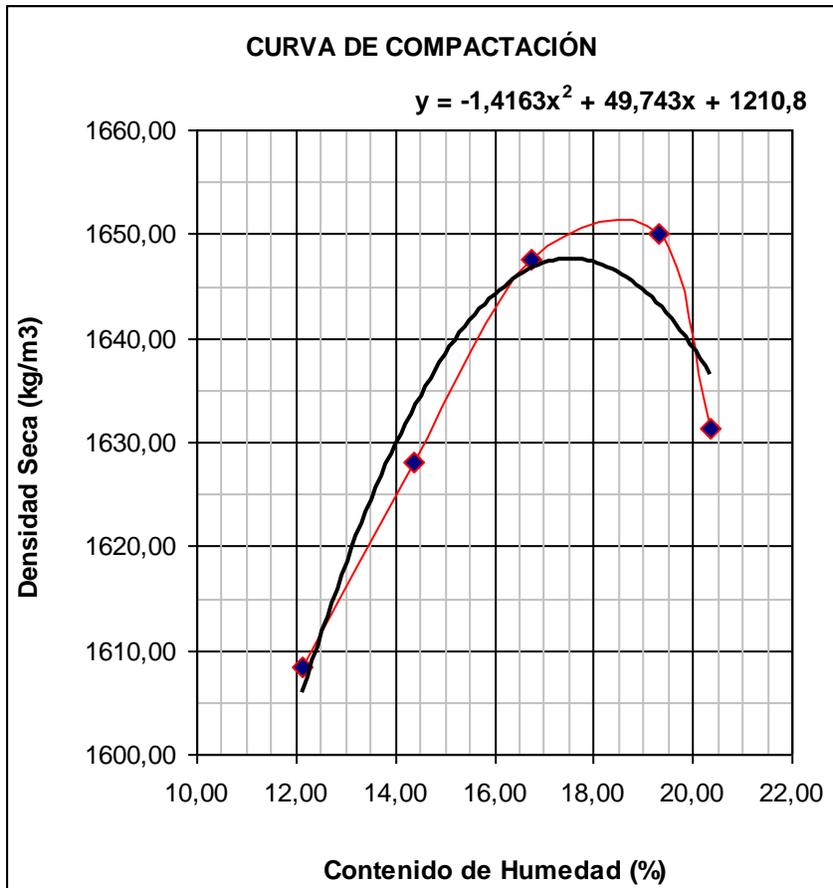
| CUADRO 30. PRUEBA #2 | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,647 | 5,688 | 5,757 | 5,799 | 5,78 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 |
| V_{molde} (m³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m³) | 1817 | 1861 | 1934 | 1978 | 1958 |
| # Cápsula | A-2 | A-3 | A-4 | X-15 | C-96 |
| P_c (g) | 176 | 179 | 175 | 415 | 410 |
| P_H+P_c(g) | 686 | 683 | 713 | 1016 | 973 |
| P_H (g) | 510 | 504 | 538 | 601 | 563 |
| P_s+P_c (g) | 627 | 618 | 633 | 922 | 874 |
| P_s (g) | 451 | 439 | 458 | 507 | 464 |
| P_A(g) | 59 | 65 | 80 | 94 | 99 |
| % Humedad | 13,08 | 14,81 | 17,47 | 18,54 | 21,34 |
| ρ_d (kg/m³) | 1607,09 | 1620,80 | 1646,33 | 1668,97 | 1613,92 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -2,5825 |
| b | 91,179 |
| c | 849,01 |
| % agua óptimo | 17,65 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1653,81 |

Figura 22. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 3 Prueba #2

| CUADRO 31. PRUEBA #3 | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| P_{TOTAL} (kg) | 5,634 | 5,689 | 5,747 | 5,79 | 5,785 |
| P_{MOLDE} (kg) | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 | 3,932 |
| V_{molde} (m³) | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| ρ_m (Kg/m³) | 1804 | 1862 | 1923 | 1969 | 1964 |
| # Cápsula | X-07 | A-5 | B-4 | G | X-04 |
| P_c (g) | 411 | 255 | 408 | 254 | 413 |
| P_H+P_c(g) | 993 | 948 | 945 | 779 | 874 |
| P_H (g) | 582 | 693 | 537 | 525 | 461 |
| P_s+P_c (g) | 930 | 861 | 868 | 694 | 796 |
| P_s (g) | 519 | 606 | 460 | 440 | 383 |
| P_A(g) | 63 | 87 | 77 | 85 | 78 |
| % Humedad | 12,14 | 14,36 | 16,74 | 19,32 | 20,37 |
| ρ_d (kg/m³) | 1608,32 | 1628,10 | 1647,52 | 1650,09 | 1631,33 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -1,4163 |
| b | 49,743 |
| c | 1210,8 |
| % agua óptimo | 17,56 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1647,57 |

Figura 23. Curva de Compactación Próctor Estándar Técnico No. 3 Prueba #3

Ensayo Próctor Modificado

Técnico No. 1

| CUADRO 32. PRUEBA #1 | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,427 | 11,525 | 11,577 | 11,544 | 11,576 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 |
| V_{molde} (m ³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m ³) | 2094 | 2141 | 2165 | 2149 | 2165 |
| # Cápsula | F | G | R | ZP | E |
| P_c (g) | 254 | 254 | 244 | 243 | 253 |
| P_H+P_c (g) | 913 | 934 | 836 | 831 | 981 |
| P_H (g) | 659 | 680 | 592 | 588 | 728 |
| P_s+P_c (g) | 850 | 865 | 771 | 762 | 894 |
| P_s (g) | 596 | 611 | 527 | 519 | 641 |
| P_A (g) | 63 | 69 | 65 | 69 | 87 |
| % Humedad | 10,57 | 11,29 | 12,33 | 13,29 | 13,57 |
| ρ_d (kg/m ³) | 1894,15 | 1923,33 | 1927,31 | 1897,24 | 1905,87 |

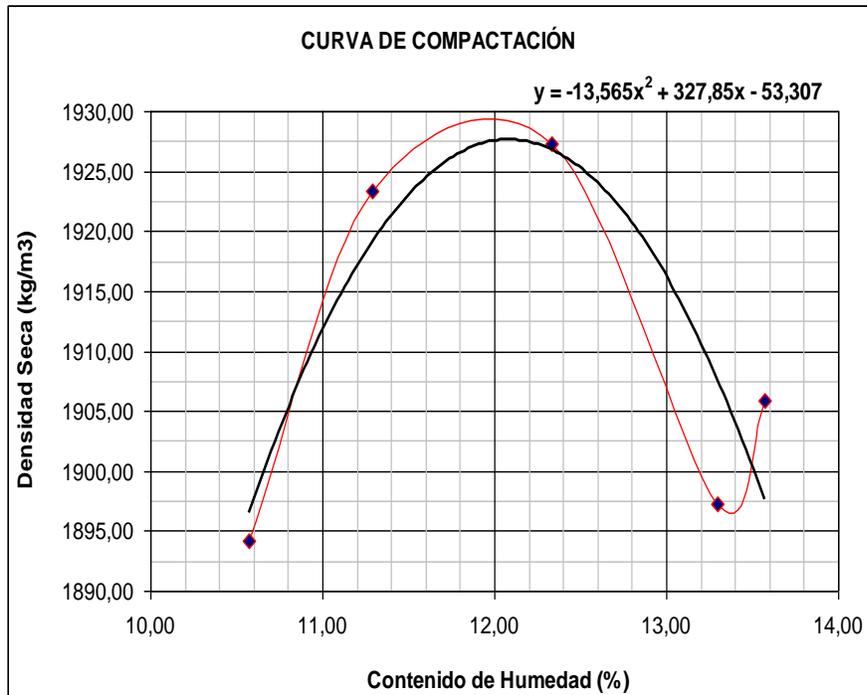
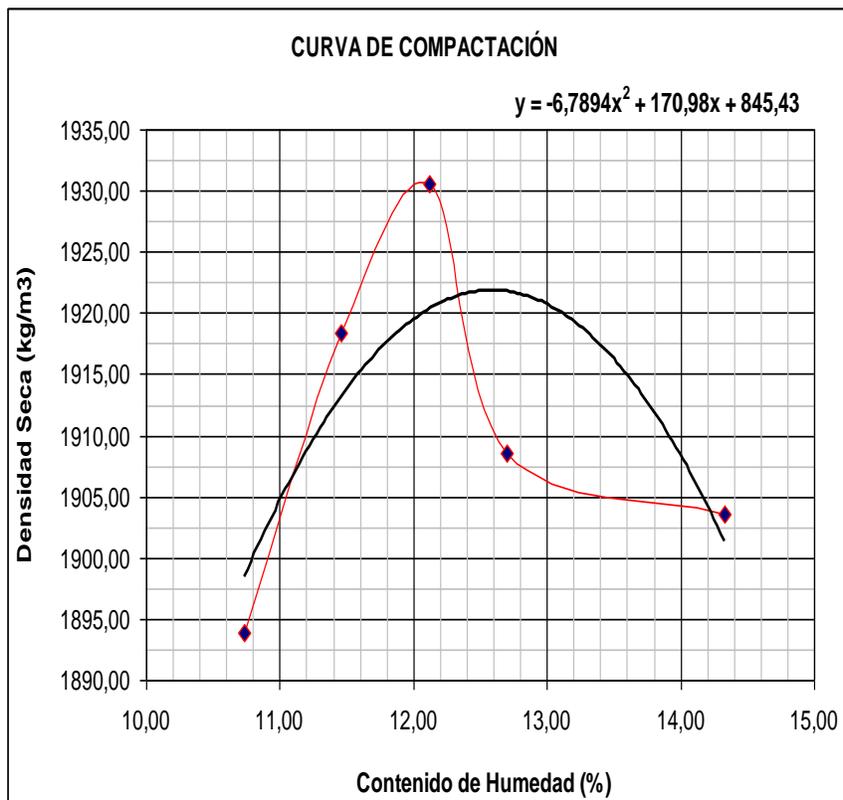


Figura 24. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No. 3 Prueba #1

| Resultados Obtenidos | |
|---|---------|
| a | -13,565 |
| b | 327,85 |
| c | -53,307 |
| % agua óptimo | 12,08 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1927,63 |

| CUADRO 33. PRUEBA #2 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,433 | 11,52 | 11,576 | 11,547 | 11,601 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 |
| Vmolde (m³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m³) | 2097 | 2138 | 2165 | 2151 | 2176 |
| # Cápsula | X04 | B4 | X05 | C96 | B2 |
| P_c (g) | 413 | 408 | 416 | 411 | 413 |
| P_H+P_c(g) | 1063 | 1011 | 1036 | 1059 | 1538 |
| P_H (g) | 650 | 603 | 620 | 648 | 1125 |
| P_s+P_c (g) | 1000 | 949 | 969 | 986 | 1397 |
| P_s (g) | 587 | 541 | 553 | 575 | 984 |
| P_A(g) | 63 | 62 | 67 | 73 | 141 |
| % Humedad | 10,73 | 11,46 | 12,12 | 12,70 | 14,33 |
| ρ_d (kg/m³) | 1893,93 | 1918,33 | 1930,64 | 1908,58 | 1903,56 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -6,7894 |
| b | 170,98 |
| c | 845,43 |
| % agua óptimo | 12,59 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1921,89 |

Figura 25. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No.1 Prueba #2

| CUADRO 34. PRUEBA #3 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,427 | 11,527 | 11,569 | 11,55 | 11,58 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 |
| Vmolde (m³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m³) | 2094 | 2141 | 2161 | 2152 | 2166 |
| # Cápsula | B1 | X-07 | G | A5 | X-06 |
| P_c (g) | 468 | 413 | 254 | 255 | 410 |
| P_H+P_c(g) | 1110 | 819 | 1013 | 977 | 923 |
| P_H (g) | 642 | 406 | 759 | 722 | 513 |
| P_s+P_c (g) | 1047 | 778 | 931 | 892 | 861 |
| P_s (g) | 579 | 365 | 677 | 637 | 451 |
| P_A(g) | 63 | 41 | 82 | 85 | 62 |
| % Humedad | 10,88 | 11,23 | 12,11 | 13,34 | 13,75 |
| ρ_d (kg/m³) | 1888,85 | 1925,21 | 1927,76 | 1898,92 | 1904,60 |

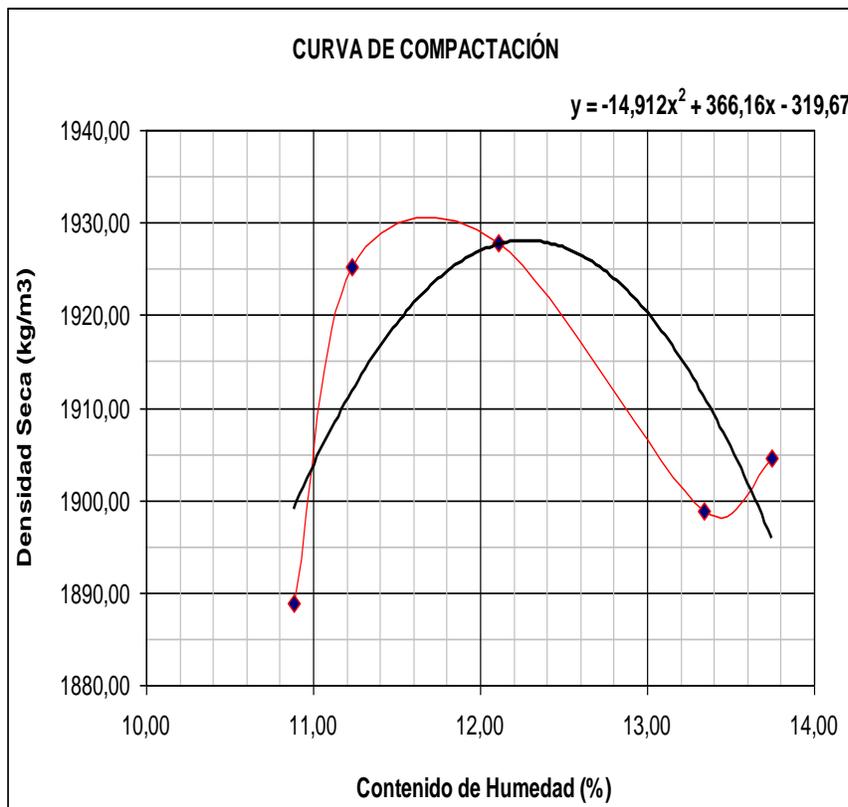
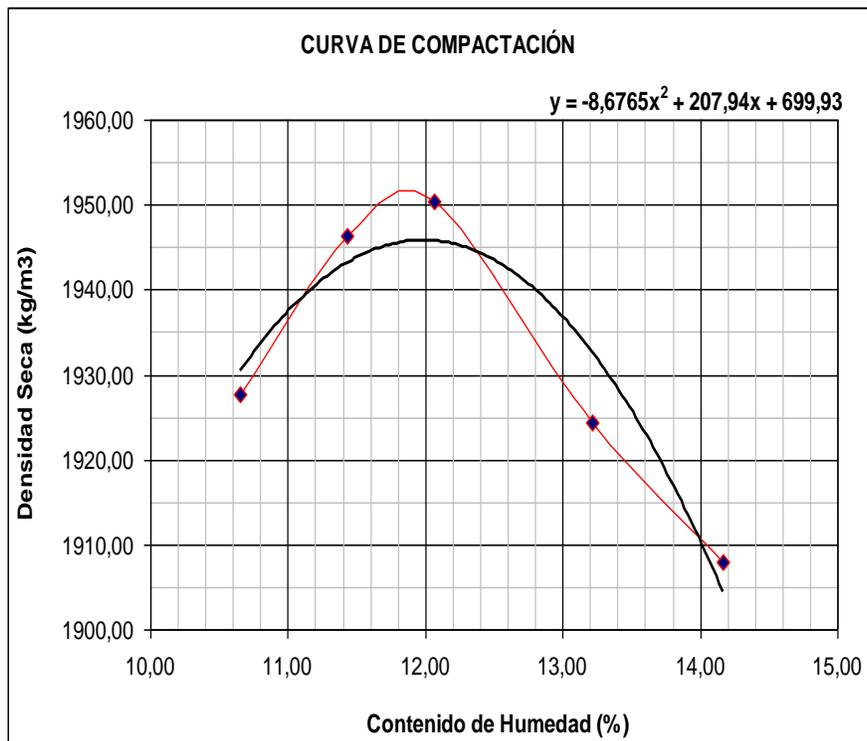


Figura 26. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No.1 Prueba #3

| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -14,912 |
| b | 366,16 |
| c | -319,67 |
| % agua óptimo | 12,28 |
| ρ_{d max} (kg/m³) | 1928,07 |

Técnico No. 2

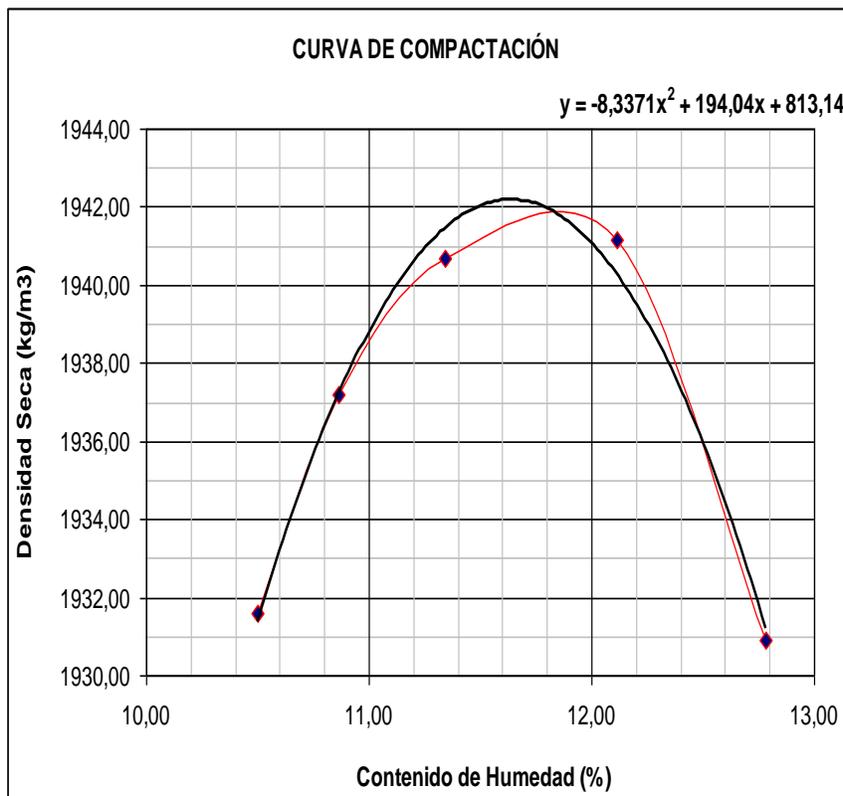
| CUADRO 35. PRUEBA #1 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,509 | 11,585 | 11,621 | 11,606 | 11,605 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 |
| Vmolde (m³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m³) | 2133 | 2169 | 2186 | 2179 | 2178 |
| # Cápsula | C45 | G | ZP | F | E |
| P_c (g) | 413 | 254 | 242 | 255 | 253 |
| P_H+P_c(g) | 1275 | 1521 | 1245 | 1189 | 1220 |
| P_H (g) | 862 | 1267 | 1003 | 934 | 967 |
| P_s+P_c (g) | 1192 | 1391 | 1137 | 1080 | 1100 |
| P_s (g) | 779 | 1137 | 895 | 825 | 847 |
| P_A(g) | 83 | 130 | 108 | 109 | 120 |
| % Humedad | 10,65 | 11,43 | 12,07 | 13,21 | 14,17 |
| ρ_d (kg/m³) | 1927,61 | 1946,26 | 1950,39 | 1924,42 | 1907,90 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -8,6765 |
| b | 207,94 |
| c | 699,93 |
| % agua óptimo | 11,98 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1945,80 |

Figura 27. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No.2 Prueba #1

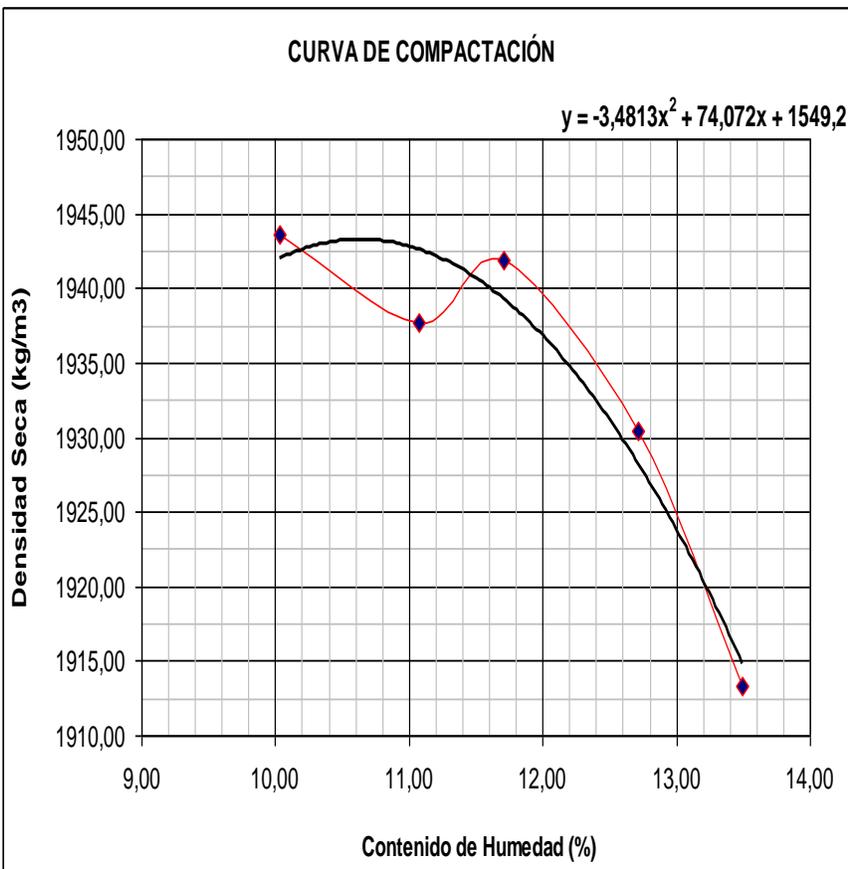
| CUADRO 36. PRUEBA #2 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,512 | 11,54 | 11,568 | 11,601 | 11,604 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 |
| Vmolde (m³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m³) | 2134 | 2148 | 2161 | 2176 | 2178 |
| # Cápsula | X-05 | B4 | C96 | B2 | B3 |
| P_c (g) | 416 | 408 | 411 | 413 | 471 |
| P_H+P_c(g) | 1258 | 1347 | 1216 | 1394 | 1512 |
| P_H (g) | 842 | 939 | 805 | 981 | 1041 |
| P_s+P_c (g) | 1178 | 1255 | 1134 | 1288 | 1394 |
| P_s (g) | 762 | 847 | 723 | 875 | 923 |
| P_A(g) | 80 | 92 | 82 | 106 | 118 |
| % Humedad | 10,50 | 10,86 | 11,34 | 12,11 | 12,78 |
| ρ_d (kg/m³) | 1931,61 | 1937,18 | 1940,68 | 1941,16 | 1930,88 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -8,3371 |
| b | 194,04 |
| c | 813,14 |
| % agua óptimo | 11,64 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1942,18 |

Figura 28. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No.2 Prueba #2

| CUADRO 37. PRUEBA #3 | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,521 | 11,55 | 11,586 | 11,6 | 11,591 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 | 6,98 |
| V_{molde} (m³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m³) | 2139 | 2152 | 2169 | 2176 | 2172 |
| # Cápsula | X05 | C96 | B4 | B3 | C6 |
| P_c (g) | 416 | 411 | 408 | 470 | 254 |
| P_H+P_c(g) | 1337 | 1454 | 1343 | 1472 | 1364 |
| P_H (g) | 921 | 1043 | 935 | 1002 | 1110 |
| P_s+P_c (g) | 1253 | 1350 | 1245 | 1359 | 1232 |
| P_s (g) | 837 | 939 | 837 | 889 | 978 |
| P_A(g) | 84 | 104 | 98 | 113 | 132 |
| % Humedad | 10,04 | 11,08 | 11,71 | 12,71 | 13,50 |
| ρ_d (kg/m³) | 1943,59 | 1937,69 | 1941,89 | 1930,47 | 1913,37 |

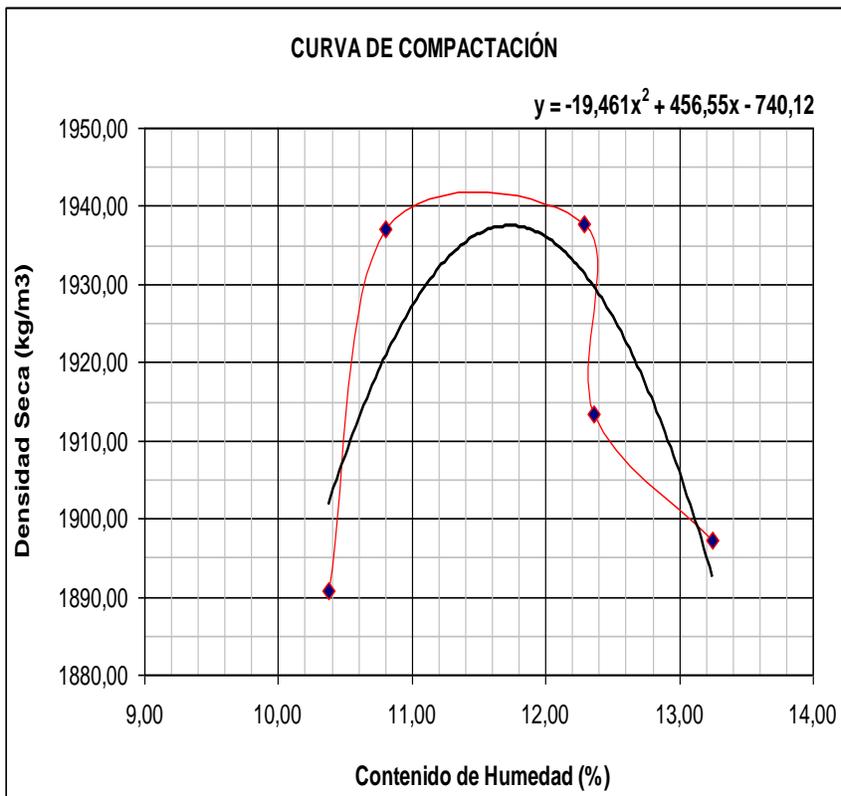


| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -3,4813 |
| b | 74,072 |
| c | 1549,2 |
| % agua óptimo | 10,64 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1943,21 |

Figura 29. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No.2 Prueba #3

Técnico No. 3

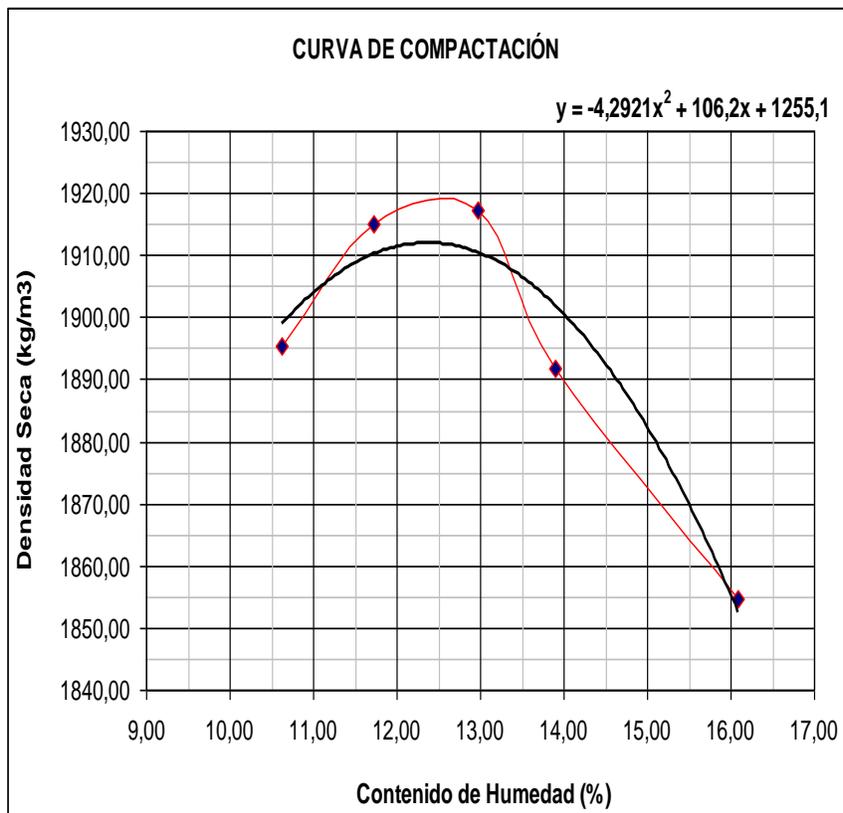
| CUADRO 38. PRUEBA #1 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,412 | 11,538 | 11,601 | 11,546 | 11,543 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,981 | 6,981 | 6,981 | 6,981 | 6,981 |
| Vmolde (m³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m³) | 2087 | 2146 | 2176 | 2150 | 2149 |
| # Cápsula | A2 | A1 | E | B4 | A4 |
| P_c (g) | 176 | 175 | 253 | 408 | 175 |
| P_H+P_c(g) | 676 | 688 | 975 | 908 | 705 |
| P_H (g) | 500 | 513 | 722 | 500 | 530 |
| P_s+P_c (g) | 629 | 638 | 896 | 853 | 643 |
| P_s (g) | 453 | 463 | 643 | 445 | 468 |
| P_A(g) | 47 | 50 | 79 | 55 | 62 |
| % Humedad | 10,38 | 10,80 | 12,29 | 12,36 | 13,25 |
| ρ_d (kg/m³) | 1890,68 | 1937,00 | 1937,77 | 1913,45 | 1897,20 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -19,461 |
| b | 456,55 |
| c | -740,12 |
| % agua óptimo | 11,73 |
| ρ_{d max} (kg/m³) | 1937,52 |

Figura 30. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No.3 Prueba #1

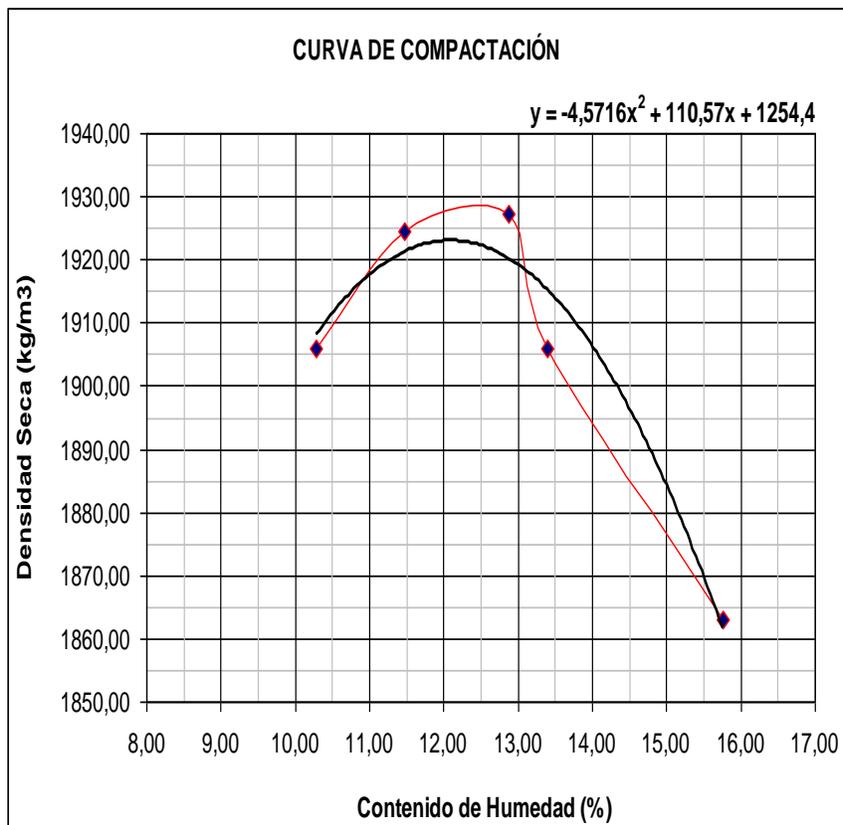
| CUADRO 39. PRUEBA #2 | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,433 | 11,524 | 11,58 | 11,556 | 11,553 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,981 | 6,981 | 6,981 | 6,981 | 6,981 |
| V_{molde} (m³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m³) | 2097 | 2140 | 2166 | 2155 | 2153 |
| # Cápsula | A3 | A2 | S | A4 | A1 |
| P_c (g) | 179 | 176 | 253 | 176 | 175 |
| P_H+P_c(g) | 689 | 700 | 950 | 676 | 680 |
| P_H (g) | 510 | 524 | 697 | 500 | 505 |
| P_s+P_c (g) | 640 | 645 | 870 | 615 | 610 |
| P_s (g) | 461 | 469 | 617 | 439 | 435 |
| P_A(g) | 49 | 55 | 80 | 61 | 70 |
| % Humedad | 10,63 | 11,73 | 12,97 | 13,90 | 16,09 |
| ρ_d (kg/m³) | 1895,28 | 1915,01 | 1917,36 | 1891,79 | 1854,78 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -4,2921 |
| b | 106,2 |
| c | 1255,1 |
| % agua óptimo | 12,37 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1912,03 |

Figura 31. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No.3 Prueba #2

| CUADRO 40. PRUEBA #3 | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ml agua | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| P_{TOTAL} (kg) | 11,444 | 11,536 | 11,6 | 11,57 | 11,56 |
| P_{MOLDE} (kg) | 6,981 | 6,981 | 6,981 | 6,981 | 6,981 |
| Vmolde (m³) | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| ρ_m (Kg/m³) | 2102 | 2145 | 2175 | 2161 | 2157 |
| # Cápsula | A-4 | A-1 | S | A-3 | A-2 |
| P_c (g) | 176 | 175 | 253 | 179 | 176 |
| P_H+P_c(g) | 680 | 690 | 770 | 687 | 683 |
| P_H (g) | 504 | 515 | 517 | 508 | 507 |
| P_s+P_c (g) | 633 | 637 | 711 | 627 | 614 |
| P_s (g) | 457 | 462 | 458 | 448 | 438 |
| P_A(g) | 47 | 53 | 59 | 60 | 69 |
| % Humedad | 10,28 | 11,47 | 12,88 | 13,39 | 15,75 |
| ρ_d (kg/m³) | 1905,90 | 1924,47 | 1927,13 | 1905,99 | 1863,05 |



| Resultados Obtenidos | |
|---|----------------|
| a | -4,5716 |
| b | 110,57 |
| c | 1254,4 |
| % agua óptimo | 12,09 |
| ρ_d max (kg/m³) | 1922,97 |

Figura 32. Curva de Compactación Próctor Modificado Técnico No.3 Prueba #3

Análisis Estadístico

Ensayo Límites de Atterberg

| CUADRO 41. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE REPETITIVIDAD | | | | | | | | | |
|---|----|----|-----------------|----|----|-----------------------|----|----|----|
| Límite Líquido | | | Límite Plástico | | | Índice de Plasticidad | | | |
| ENSAYO | T1 | T2 | T3 | T1 | T2 | T3 | T1 | T2 | T3 |
| 1 | 58 | 57 | 54 | 36 | 36 | 33 | 22 | 21 | 21 |
| 2 | 58 | 57 | 56 | 38 | 36 | 36 | 20 | 21 | 20 |
| 3 | 54 | 58 | 56 | 33 | 36 | 36 | 21 | 22 | 20 |

Análisis de Varianza Límite Líquido

| CUADRO 42. VARIANZA ENTRE GRUPOS | | | | | |
|----------------------------------|--------|------|-------------|-------------|-----------|
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | Desv. Est |
| T1 (Técnico 1) | 3 | 170 | 56,66666667 | 5,333333333 | 3,771236 |
| T2 (Técnico 2) | 3 | 172 | 57,33333333 | 0,333333333 | 0,235702 |
| T3 (Técnico 3) | 3 | 166 | 55,33333333 | 1,333333333 | 0,942809 |

| CUADRO 43. ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 6,222222222 | 2 | 3,111111111 | 1,333333333 | 0,331816113 | 5,14325285 |
| Dentro de los grupos | 14 | 6 | 2,333333333 | | | |
| Total | 20,22222222 | 8 | | | | |

$$F_{\alpha} > F$$

$$5,14325285 > 1,33333333$$

Los técnicos trabajan de una forma muy similar

Análisis de Varianza Límite Plástico

| CUADRO 44. VARIANZA ENTRE GRUPOS | | | | | |
|---|--------|------|-------------|-------------|-----------|
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | Desv. Est |
| T1 (Técnico 1) | 3 | 107 | 35,66666667 | 6,333333333 | 4,478343 |
| T2 (Técnico 2) | 3 | 108 | 36 | 0 | 0 |
| T3 (Técnico 3) | 3 | 105 | 35 | 3 | 2,121320 |

| CUADRO 45. ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------|---------------------------|------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 1,555555556 | 2 | 0,777777778 | 0,25 | 0,786527082 | 5,14325285 |
| Dentro de los grupos | 18,66666667 | 6 | 3,111111111 | | | |
| Total | 20,22222222 | 8 | | | | |

$$F_{\alpha} > F$$

$$5,14325285 > 0,25$$

Los técnicos trabajan de una forma muy similar

Análisis de Varianza Índice de Plasticidad

| CUADRO 46. VARIANZA ENTRE GRUPOS | | | | | |
|---|--------|------|-------------|-------------|------------|
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | Desv. Est. |
| T1 (Técnico 1) | 3 | 63 | 21 | 1 | 0,707107 |
| T2 (Técnico 2) | 3 | 64 | 21,33333333 | 0,333333333 | 0,235702 |
| T3 (Técnico 3) | 3 | 61 | 20,33333333 | 0,333333333 | 0,235702 |

| CUADRO 47. ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------|---------------------------|-----|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 1,555555556 | 2 | 0,777777778 | 1,4 | 0,316960932 | 5,14325285 |
| Dentro de los grupos | 3,333333333 | 6 | 0,555555556 | | | |
| Total | 4,888888889 | 8 | | | | |

$$F_{\alpha} > F$$

$$5,14325285 > 1,40$$

Los técnicos trabajan de una forma muy similar

Ensayo Próctor Estándar

| CUADRO 48. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE REPETITIVIDAD | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|------------------------------|-------|-------|
| Densidad Seca Máxima (kg/m ³) | | | | Contenido de Agua Óptimo (%) | | |
| ENSAYO | T1 | T2 | T3 | T1 | T2 | T3 |
| 1 | 1640,11 | 1682,17 | 1668,61 | 18,74 | 16,46 | 16,56 |
| 2 | 1640,53 | 1685,43 | 1653,81 | 18,05 | 16,77 | 17,65 |
| 3 | 1641,14 | 1687,16 | 1647,57 | 18,53 | 16,54 | 17,56 |

Análisis de Varianza Densidad Seca Máxima

| CUADRO 49. VARIANZA ENTRE GRUPOS | | | | | |
|---|---------------|-------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| <i>Grupos</i> | <i>Cuenta</i> | <i>Suma</i> | <i>Promedio</i> | <i>Varianza</i> | <i>Desv. Est.</i> |
| T1 (Técnico 1) | 3 | 4921,78 | 1640,593333 | 0,26823333 | 0,18967 |
| T2 (Técnico 2) | 3 | 5054,76 | 1684,92 | 6,4201 | 4,53969 |
| T3 (Técnico 3) | 3 | 4969,99 | 1656,663333 | 116,776533 | 82,5735 |

| CUADRO 50. ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------|---------------------------|-----------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 3021,537489 | 2 | 1510,768744 | 36,709279 | 0,000431209 | 5,14325285 |
| Dentro de los grupos | 246,9297333 | 6 | 41,15495556 | | | |
| Total | 3268,467222 | 8 | | | | |

$$F > F_{\alpha}$$

$$36,709279 > 5,14325285$$

Los técnicos trabajan de forma diferente

Análisis de Varianza Contenido de Humedad Óptimo

| CUADRO 51. VARIANZA ENTRE GRUPOS | | | | | |
|---|--------|-------|-------------|------------|------------|
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | Desv. Est. |
| T1 (Técnico 1) | 3 | 55,32 | 18,44 | 0,1251 | 0,08846 |
| T2 (Técnico 2) | 3 | 49,77 | 16,59 | 0,0259 | 0,01831 |
| T3 (Técnico 3) | 3 | 51,77 | 17,25666667 | 0,36603333 | 0,25882 |

| CUADRO 52. ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 5,267222222 | 2 | 2,633611111 | 15,2810908 | 0,00441934 | 5,14325285 |
| Dentro de los grupos | 1,034066667 | 6 | 0,172344444 | | | |
| Total | 6,301288889 | 8 | | | | |

$$F > F_{\alpha}$$

$$15,2810908 > 5,14325285$$

Los técnicos trabajan de forma diferente

Ensayo Próctor Modificado

| CUADRO 53. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE REPETITIVIDAD | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|------------------------------|-------|-------|
| Densidad Seca Máxima (kg/m ³) | | | | Contenido de Agua Óptimo (%) | | |
| ENSAYO | T1 | T2 | T3 | T1 | T2 | T3 |
| 1 | 1927,63 | 1945,80 | 1937,52 | 12,08 | 11,98 | 11,73 |
| 2 | 1921,89 | 1942,18 | 1912,03 | 12,59 | 11,64 | 12,37 |
| 3 | 1928,07 | 1943,21 | 1922,27 | 12,28 | 10,64 | 12,09 |

Análisis de Varianza Densidad Seca Máxima

| CUADRO 54. VARIANZA ENTRE GRUPOS | | | | | |
|---|--------|---------|-------------|------------|------------|
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | Desv. Est. |
| T1 (Técnico 1) | 3 | 5777,59 | 1925,863333 | 11,8889333 | 8,406745 |
| T2 (Técnico 2) | 3 | 5831,19 | 1943,73 | 3,4789 | 2,459953 |
| T3 (Técnico 3) | 3 | 5771,82 | 1923,94 | 164,5267 | 116,3379 |

| CUADRO 55. ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 714,5610889 | 2 | 357,2805444 | 5,95816679 | 0,03755834 | 5,14325285 |
| Dentro de los grupos | 359,7890667 | 6 | 59,96484444 | | | |
| Total | 1074,350156 | 8 | | | | |

$$F > F_{\alpha}$$

$$5,95816679 > 5,14325285$$

Los técnicos trabajan de forma diferente

Análisis de Varianza Contenido de Humedad Óptimo

| CUADRO 56. VARIANZA ENTRE GRUPOS | | | | | |
|---|--------|-------|-------------|------------|------------|
| Grupos | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | Desv. Est. |
| T1 (Técnico 1) | 3 | 36,95 | 12,31666667 | 0,06603333 | 0,04669 |
| T2 (Técnico 2) | 3 | 34,26 | 11,42 | 0,4852 | 0,34309 |
| T3 (Técnico 3) | 3 | 36,19 | 12,06333333 | 0,10293333 | 0,07278 |

| CUADRO 57. ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------|---------------------------|-----------|--------------|----------------------|
| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
| Entre grupos | 1,282066667 | 2 | 0,641033333 | 2,9397707 | 0,12884119 | 5,14325285 |
| Dentro de los grupos | 1,308333333 | 6 | 0,218055556 | | | |
| Total | 2,5904 | 8 | | | | |

$$F_{\alpha} > F$$

$$5,14325285 > 2,9397707$$

Los técnicos trabajan de una forma muy similar

Análisis de los resultados

Limitaciones Generales

Una de las mayores limitantes durante el desarrollo de la presente Práctica Profesional Dirigida corresponde a la confidencialidad de la documentación elaborada. Toda la documentación incluida dentro de un Sistema de Gestión de Calidad debe estar debidamente codificada así como referenciada para garantizar un buen manejo de los procedimientos así como para llevar una trazabilidad de la documentación. Por esta razón, los instructivos técnicos así como los registros y las hojas electrónicas anexas en el presente informe omiten todas las referencias así como la codificación.

La disponibilidad de los técnicos significó un problema con respecto a las capacitaciones y a la evaluación de desempeño. Las capacitaciones no siguieron un orden secuencial pues la gran cantidad de trabajo obligaba a que los técnicos recibieran su debida capacitación en cualquier momento. En principio se tenía un plan de capacitación grupal (Apéndice 16), sin embargo, fue imposible llevarlo a cabo de dicha manera.

Al mismo tiempo, las evaluaciones de desempeño del personal sufrieron ciertas discontinuidades durante su ejecución, lo cual en cierta medida pudieron afectar los resultados. Con respecto al ensayo Próctor de Compactación, era necesario que el técnico llevara a cabo sus pruebas de forma continua, preferiblemente el mismo día, pues dicha prueba se basa en la aplicación de una fuerza para compactar un espécimen de suelo. Dicha fuerza y el ritmo en que es aplicada depende del ejecutor y la trazabilidad de éste en la ejecución. La realización de dichas pruebas en distintos días ocasionó variaciones en la compactación reflejadas en los resultados lo cual se convirtió en una limitante. Además, el almacenamiento de las muestras patrón no garantizan que éstas mantenga el contenido de agua natural ya que en

algún momento pueden sufrir pérdidas lo cual afectan los resultados.

A continuación, se discuten los resultados obtenidos para cada objetivo y algunas limitaciones presentes durante su desarrollo.

Capacitación Personal

La capacitación personal representó un punto de partida muy importante para el desarrollo de los objetivos propuestos en la presente Práctica Profesional Dirigida. La lectura de la norma INTE:ISO/IEC 17025:2005 significó el comienzo de la capacitación personal. Durante esta etapa, se notaron algunos apartados de la norma, los cuales presentaban un panorama confuso, pues no se contaba aún con una aplicación práctica de ésta ni una relación estrecha con respecto a algunos términos contenidos en ella. Sin embargo, cuando el Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A fue analizado y comparado con el contenido de la norma, la comprensión de ambos se convirtió en un proceso más sencillo y rápido. Por esta razón, se considera que la metodología de capacitación seguida fue de gran importancia y resultó ser el proceso de capacitación más eficaz.

Instructivos Técnicos

El diseño de los instructivos técnicos no se consideró al inicio, un objetivo complicado de realizar debido a que se contaba con ciertas ventajas. Una de éstas fue el hecho de que la empresa ya contaba con un formato preestablecido para los instructivos técnicos, como parte del Sistema de Gestión de Calidad, lo cual significaba que ya estaban definidos los aspectos que éstos debían de contener. Sin embargo, una vez realizado el primer instructivo técnico correspondiente al ensayo de Límites de

Atterberg, se supo con certeza cuáles eran los verdaderos alcances de la elaboración de este tipo de documentación. Primero, el contenido de un instructivo debe referenciar todos los documentos relacionados con el ensayo. Esto significó que los registros de toma de datos y las hojas de cálculo relacionadas con la ejecución del ensayo debían ser citados en el instructivo mediante una codificación establecida por la empresa. Además, las normas ASTM establecen las especificaciones del equipo por utilizar y las tolerancias permitidas para éstos. Esto obligó a la comprobación de algunos equipos claves para la ejecución de las pruebas así como para el trabajo diario de la empresa y las pruebas de evaluación de desempeño de las cuales se discutirá más adelante. Al momento en que se conocieron las tareas por realizar antes de aprobar el uso de un instructivo, el cumplimiento del objetivo relacionado con los instructivos técnicos se tornó un poco complicado más no imposible. Simplemente se debió trabajar más de lo esperado. Sin embargo, esto fue necesario para beneficio de la empresa y la calidad del instructivo en sí.

Una de las limitaciones encontradas durante la elaboración de los instructivos está asociada con el desconocimiento de la ejecución de la prueba, pero no el resultado de ésta. Por esta razón, la definición del procedimiento de prueba en el instructivo constituyó el apartado más complejo de realizar. Otra de las limitantes está asociada a los pocos ensayos que fueron realizados por parte de su servidor. Se hizo únicamente una prueba de límites de Atterberg y no fue posible ejecutar ningún ensayo de compactación. Sin embargo, bastó con observar detenidamente la ejecución de los ensayos por parte de los técnicos encargados de la parte de suelos para elaborar el procedimiento. La ventaja de contar con la norma ASTM como referencia absoluta, no era garantía suficiente para concluir que el contenido del instructivo era lo suficientemente explícito. Por esta razón, la observación de las pruebas fue fundamental pues el procedimiento incluido en el documento debió ser acoplado a la forma de ejecución por parte de cada técnico y se evitó en lo posible que existiera una diferencia notable entre la norma ASTM y el técnico competente.

El idioma se sumó como otra barrera en el diseño de los instructivos. Por ejemplo, para el instructivo de Límites de Atterberg, Contenido de

Humedad y granulometría en suelos no fue posible contar con la norma traducida al idioma español. Esto provocó la confusión y la mala traducción de algunas palabras de índole técnico, lo cual ocasionó la constante corrección de los instructivos. Únicamente para los ensayos de compactación se contó con la norma ASTM traducida, lo cual representó una ventaja, no sólo por poseer la norma traducida, sino también por ser una prueba que contiene un lenguaje técnico muy específico y complicado si se hubiese trabajado con la versión en inglés.

Al iniciar con el cumplimiento del objetivo, solamente se tenía programado elaborar los documentos para Límites de Atterberg y Próctor de Compactación. Sin embargo, algunos pasos contenidos en dichos instructivos estaban referenciados en las normas correspondientes al ensayo de Contenido de Humedad y la distribución de tamaño de partículas en suelos, lo cual significó la elaboración de un procedimiento propio de la empresa para ambas pruebas. Posteriormente, fueron codificadas y referidas en los instructivos respectivos.

Además, los estándares ASTM, toman como unidades de medida, tanto el Sistema Inglés como el Sistema Internacional de Unidades. El Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A. utiliza únicamente las unidades del Sistema Internacional de Unidades, esto causó un atraso en la aprobación de los documentos porque algunas magnitudes poseían unidades no incluidas en el SI.

Por último, la política de calidad de la empresa así como el Sistema de Gestión de Calidad maneja de forma muy estricta la confidencialidad de los documentos y los procedimientos, lo cual significó en cierta medida una limitante para efectos del presente proyecto más no para los intereses de la empresa. Por esta razón, la documentación anexa a dicho informe omite toda seña que revele códigos y formatos asociados a la empresa.

A pesar de todas las limitantes dadas, se cumplió con el objetivo de implementar los instructivos técnicos para los ensayos en estudio con base en el Sistema de Gestión de Calidad de la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A.; se inició el proceso de implementación de los procedimientos técnicos en ensayos de suelos.

Registro de Toma de Datos

Al igual que los instructivos técnicos, la elaboración de los registros de toma de datos significó el diseño de un documento, el cual debió adaptarse a las necesidades del personal técnico. Lo anterior, implicó una constante corrección en las hojas de registro. Dichas correcciones estaban fundamentadas por errores tales como formatos no lo suficientemente explícitos, unidades de medida o falta de algún espacio para la anotación de una medición adicional. La elaboración de los registros siguió una metodología definida a partir del primer documento de este tipo que se obtuvo. La observación de las pruebas y la anotación de las mediciones que se debían registrar constituyeron aspectos fundamentales.

Este tipo de documentación técnica debió ser codificada, ya que el contenido de los instructivos técnicos hace referencia a los registros que se deben utilizar para la ejecución de un ensayo. Lo anterior, como parte del Sistema de Gestión de Calidad de la empresa.

En un principio se desconocía la necesidad de diseñar un registro de toma de datos para los ensayos de contenido de agua en suelos y granulometría. En el momento en que los instructivos se encontraban listos, se identificó la necesidad de realizar una hoja de registro de toma de datos para ambas pruebas, adicionales a las que debían de realizarse inicialmente (Límites de Atterberg y Próctor Estándar y Modificado). Esto porque son ensayos que se encuentran incluidos en forma indirecta dentro los instructivos. No obstante, se decidió únicamente realizar la documentación relacionada con el ensayo de granulometría en suelos pues únicamente las pruebas de compactación incluyen dentro del procedimiento la graduación del material. No fue necesario un registro para el contenido de humedad pues, tanto en el documento elaborado para la prueba de compactación como para los Límites de Consistencia, se incluyó la anotación de las mediciones correspondientes a dicha prueba. Estas pruebas son consideradas como universales, porque en la mayoría de ensayos, se encuentran incluidas de forma indirecta.

Con respecto a los registros de verificación de equipos, la necesidad de llevar un control sobre la verificación de las dimensiones de los equipos implicó la confección de dos registros adicionales para moldes y mazos de compactación. El proceso de elaboración de estos documentos siguió un proceso de revisión similar a los anteriores y no se apreció algún factor que pudiera convertirse en una limitante.

La hoja de registro para el ensayo de Límites de Atterberg sufrió la modificación más extrema de todos los registros elaborados. En principio, el documento contaba con dos páginas. Una de ellas estaba asociada al método multipunto mientras que la siguiente al método de un punto, ambas para la determinación del Límite Líquido. Sin embargo, se llegó a la conclusión de que la segunda página era innecesaria, pues las mediciones para el método de un punto se podían realizar de igual forma en la primera página. Por esta razón, se procedió a eliminar dicho registro.

En resumen, las hojas de registro de toma de datos fueron un éxito, no obstante, el hecho de estar incluido dentro de un Sistema de Gestión de Calidad abre la posibilidad de aplicar en el diseño de esta documentación una acción de mejora continua.

Hojas de Cálculo

El diseño de las hojas de cálculo se consideró una tarea muy provechosa, no sólo personalmente, sino también para la empresa en sí. La rutina diaria seguida en el laboratorio consiste en que los técnicos entregan los datos a los encargados los cuales proceden a introducir los datos a las hojas de cálculo respectivas. Esto interrumpe la labor de los encargados y de los técnicos y se reducen los tiempos de elaboración de informes, lo cual sin duda es una desventaja. Por esta razón, la realización de hojas de cálculo para los ensayos bajo el alcance de la Práctica Profesional Dirigida se presenta como una opción, no solo para facilitar la obtención de resultados, sino como una herramienta que permita consolidar la superación y la autosuficiencia de los técnicos, además de mejorar los rendimientos de los ensayos y la determinación de resultados más precisos.

Las hojas de cálculo se elaboraron simultáneamente con las hojas de registro de

resultados. El principio manejado durante la realización de las hojas electrónicas fue definir un formato el cual coincidiera con la hoja de registro respectiva. Por esta razón, en los anexos relacionados con las hojas de cálculo y los registros de toma de datos, se puede observar que las tablas contenidas en los registros técnicos presentan una forma muy similar a las tablas de ingreso de datos de las hojas de cálculo, es decir, las anotaciones realizadas en el registro se introducen de igual manera en la hoja de cálculo. Las hojas de cálculo creadas son capaces de arrojar el resultado deseado solamente con introducir la información anotada en el registro sin necesidad de realizar un cálculo manualmente. Esto no exige al programa de una revisión periódica sea, manualmente o con ayuda de la información de la hoja de respaldo.

Lo expuesto anteriormente, enfatiza en una limitación que ha existido en la empresa desde su creación: la falta de conocimientos en materia computacional de la mayor parte del personal técnico. Eso obligó a tomar las medidas necesarias para llevar el trabajo de la manera más sencilla posible. Una de éstas medidas está asociada con lo discutido anteriormente. Una vez que el técnico ejecuta la prueba y anota los datos respectivos en el registro, debe digitar los mismos datos en la hoja de cálculo con la ventaja que la tabla de datos iniciales de cada una de las hojas de cálculo es igual a la tabla del registro.

Otro de los aspectos por rescatar es la diferenciación realizada entre las celdas programadas y las celdas no programadas. Las celdas no programadas fueron denotadas con un color específico. Éstas se asocian a las celdas en las cuales se debe introducir un dato. En cambio, las celdas programadas no sufrieron ninguna modificación. Esto ayuda al usuario del programa a contar con una guía para manipular la hoja electrónica de buena forma.

Otra de las medidas establecidas en la hoja de cálculo fue el bloqueo de aquellos componentes del programa cuya alteración podía provocar una irregularidad en la hoja. La falta de capacitación del personal técnico podía provocar un mal uso de la hoja reflejado en la alteración de uno de sus componentes programados. Entonces, al bloquear las celdas de este tipo, era imposible algún cambio o introducción de un dato en la celda, lo cual fue de gran ayuda pues ha mantenido la integridad de la hoja durante el tiempo que ha sido utilizada.

De la misma manera que los registros técnicos, se realizaron las hojas de cálculo para Límites de Atterberg, Próctor de Compactación, verificación de equipos y granulometría de suelos. Por las razones ya presentadas en el apartado de hojas de registro de toma de datos, no se creó ninguna base de datos para el ensayo de contenido de humedad.

Sin duda, la creación de las hojas de cálculo permitió obtener rápidamente los resultados para la verificación de equipos y las pruebas de repetitividad, de las cuales se escribirá y hablará más adelante.

La documentación técnica realizada fue de gran importancia para la evaluación del desempeño del personal, así como para la verificación de equipos, ya que ésta fue utilizada para llevar a cabo dichas tareas. Es por esto que la eficiencia de la documentación técnica está definida por los resultados obtenidos en la evaluación del desempeño. A pesar de todos los inconvenientes, las hojas de cálculo cumplieron con las expectativas y actualmente forman parte del Sistema de Gestión de Calidad de la empresa.

Verificación de Equipos

Verificación de Moldes de Compactación

Según los resultados obtenidos para la verificación de los moldes de compactación, tanto los cuatro moldes de 101,6mm como los dos moldes de 152,4mm cumplen con las especificaciones y tolerancias definidas por la norma ASTM 698 y 1557. Esto es reflejado en el error porcentual obtenido para cada molde con respecto al volumen teórico. Según el *cuadro 1*, para los moldes de 101,6mm de diámetro, solamente el molde #3 se encuentra muy cercano al volumen teórico, lo cual se evidencia en un error porcentual de 0,09%. Los moldes restantes presentan un comportamiento similar aunque un poco más lejanos del valor teórico. Curiosamente, la incertidumbre en la medición obtenida para el molde #3 es mayor a las otras. Esto ocurre, porque a diferencia de los otros moldes, el molde #3 presenta una mayor diferencia entre el diámetro superior e inferior que los demás, lo cual no refleja mucha confiabilidad en la medición,

aunque esto no significa que el molde no se pueda usar. Además, un error a la hora de realizar las mediciones con el Pie de rey o Vernier pudo haber contribuido en el valor de la incertidumbre.

Con respecto a los dos moldes de 152,4mm, los *cuadros* 3 y 4, demuestran que ambos moldes cumplen con las tolerancias permitidas. Se puede observar que la diferencia entre los diámetros promedio es muy poca. Sin embargo, la incertidumbre obtenida es discutida pues presentan valores más altos que los obtenidos en las mediciones del molde pequeño. Esto ocurre pues las mediciones para el diámetro inferior del molde #1 presenta una dispersión considerable, lo cual se traduce en una incertidumbre mayor. Con respecto al molde #2, el diámetro superior y la altura interna presentan una dispersión considerable de los datos con respecto a sus medias, lo cual se traduce en una desviación estándar mayor, y por ende una incertidumbre en la medición considerable pero no inquietante.

Verificación de Mazos de Compactación

De acuerdo con los *cuadros* 5 y 6, solamente uno de los tres mazos no cumple con las especificaciones, por lo tanto debe ser revisado por el personal técnico de la empresa. Todos los mazos fueron verificados con respecto a su masa, distancia de caída libre y diámetro del área de contacto. El mazo estándar cumple con las dimensiones máximas y mínimas para todos los parámetros evaluados al igual que el mazo modificado #1. Ambos presentan una incertidumbre relativamente pequeña, lo cual garantiza la confiabilidad de la medición.

El mazo modificado #2 es el mazo que se considera no apto para la ejecución de la prueba de compactación modificada, pues para un ensayo en el cual el resultado final está expuesto a condiciones no muy favorables como el Próctor, se deben eliminar en la medida de lo posible las diversas fuentes de error que puedan presentarse. Cabe destacar que tanto el diámetro del mazo como la masa cumplen con los requerimientos de la norma, sin embargo, el parámetro que no satisface las necesidades del ensayo es la distancia de caída libre. Se observa en el *cuadro* 5 que el promedio de distancia de

caída libre del mazo se encuentra por debajo del mínimo establecido por la norma ASTM 1557. Por lo tanto se puede concluir que únicamente el mazo estándar y el mazo modificado #1 se consideran aptos para la ejecución del ensayo, a diferencia del mazo modificado #2 el cual debe pasar por un proceso de revisión con respecto a su distancia de caída libre.

Verificación de Mallas

Se comprobó que todas las mallas cumplen con los requerimientos establecidos en la norma ASTM E11 (Anexo) para la comprobación de mallas. Los tamaños de abertura obtenidos se encuentran muy cercanos respecto a los tamaños nominales de cada malla. Con relación a las incertidumbres, la malla N° 4 presenta la menor de las incertidumbres en la medición. Esto porque, según el método empleado para la verificación de las mallas, se midieron una mayor cantidad de aberturas que los otros tamaños de mallas, porque al ser una malla con tamaños más pequeños de abertura, implica una mayor presencia de aberturas con respecto a la diagonal trazada en el centro de la malla. No obstante, las incertidumbres asociadas a las otras mallas son bastante confiables.

Por otra parte, se realizó una corrección por temperatura para comprobar si los efectos volumétricos de expansión y contracción por temperatura tenían que ser considerados, sin embargo, los cuadros asociados a la determinación del tamaño de las aberturas para cada tamaño de malla, comprueban que los resultados corregidos varían el resultado hasta el cuarto decimal, lo cual concluye que los efectos de temperatura se consideran relativamente nulos.

Capacitación al Personal

Antes de iniciar con la evaluación del desempeño del personal, fue necesario capacitarlo sobre el uso de la documentación técnica. Al inicio, se pensó en seguir una metodología basada en la capacitación masiva bajo un plan de capacitaciones (ver Apéndice 16) y reunir al personal técnico dentro del alcance de la acreditación para exponer los procedimientos técnicos y escuchar recomendaciones u observaciones por parte del personal, sin

embargo, existía una limitante que imposibilitó llevar a cabo una capacitación masiva, la gran cantidad de trabajo bajo la cual se encontraba el personal técnico de la empresa. Esto significó una capacitación por cada técnico, lo cual provocó un atraso en la programación del proyecto pues, no era posible iniciar la evaluación de desempeño si el personal no sabía con certeza el contenido de un instructivo, el formato de las hojas de registro o la forma de funcionamiento de las hojas electrónicas.

Un aspecto que se evitó a toda costa fue realizar una capacitación aburrida y de poco interés. Era necesario que cada persona conociera el procedimiento al pie de la letra y tuviera un dominio sobre el registro de los datos; por esta razón, las capacitaciones iniciaron siempre con una motivación y una breve explicación del ensayo y sus principios, pues, algunas veces, un técnico puede manejar el procedimiento de la prueba pero éste desconoce el significado de los datos, lo cual se evitó de la mejor forma posible.

Es importante destacar el interés del personal técnico sobre el trabajo realizado. Esto fue reflejado en las acciones de mejora y recomendaciones brindadas por éstos en cada una de las capacitaciones. Además, los cuestionamientos dirigidos hacia mi persona sobre el contenido de la documentación técnica se consideraron como parte fundamental de la capacitación, pues daba a conocer el avance en el aprendizaje, lo cual fue muy provechoso.

Se puede concluir que las capacitaciones brindadas fueron ejecutadas de manera eficaz, sin embargo, se considera que pueden mejorar, principalmente, en el contenido de los instructivos, pues, como se puede observar en los resultados de las pruebas de repetitividad y reproducibilidad, algunas de éstas presentan errores en la ejecución del ensayo, lo cual debe ser corregido mediante capacitaciones más completas y enfocadas en el contenido de los instructivos técnicos. Esto será discutido en apartados posteriores.

Muestras Patrón

Muestra Patrón para el Ensayo de Límites de Atterberg

La muestra patrón asociada al ensayo de Límites de Consistencia debía representar un material de alta plasticidad que brindara un resultado muy significativo. Por esta razón, se seleccionó un limo arcilloso el cual, presentara una gran capacidad de absorción de agua, cuya propiedad es muy característica de los materiales con altas propiedades plásticas.

Con respecto al proceso de preparación de la muestra, tomó varios días finalizar con las muestras patrón debido a que la gran cantidad de material para triturar por la presencia de grumos, así como el material por pasar por la malla #40, era considerable. El proceso de trituración constituyó el paso más tedioso por la gran cantidad de grumos presentes en el material y por el equipo con que se contaba para triturar. Como se mencionó en la metodología, una cápsula de porcelana y un pistilo eran necesarios para realizar la trituración. Se trituró una gran cantidad de material con equipo muy pequeño.

Afortunadamente, no hubo ningún inconveniente con el tipo de material ni con la cantidad de muestra por preparar pues el material extraído del campo fue suficiente. Según los resultados de las pruebas de repetitividad, el material cumplió con las expectativas que demandaba la evaluación de desempeño del personal reflejado en la coherencia del resultado final y en el análisis estadístico, el cual será analizado posteriormente.

Muestra Patrón para el Ensayo Próctor Estándar

Uno de los principales problemas presentes en la preparación de las muestras patrón para el ensayo de compactación estándar se relaciona con el contenido de humedad de cada una de ellas. Cuando se contaba con el material suficiente para cubrir todos los ensayos se presentó una duda con respecto a si se debían cerrar las bolsas que contenían las muestras o no. Cuando se prepararon las primeras bolsitas, éstas fueron debidamente cerradas pero

desafortunadamente, al seguir el consejo brindado por una persona conocedora del tema, las bolsitas fueron abiertas y al ejecutarse la primera prueba de repetitividad, la curva de compactación obtenida no coincidía con la curva esperada, pues absolutamente todos los puntos de dicha figura, estaban muy dispersos uno del otro. Cuando se analizó lo sucedido, se llegó a la conclusión de que la pérdida del contenido de humedad original de las muestras al abrir las bolsas, provocó un desbalance en las humedades lo cual no era sano para las pruebas. Lo anterior obligó a repetir la preparación de las muestras, lo que provocó un atraso de 2 a 3 días en el desarrollo de los objetivos propuestos. Por esta razón, algunas veces es mejor confiar en el conocimiento propio y no guiarse solamente en la experiencia de otra persona, por más que ésta sepa.

En términos más técnicos, la prueba de compactación se basa en la variación de humedades con respecto a una humedad óptima, partiendo del supuesto de que todos los puntos de la prueba poseen una humedad similar. Al abrir las bolsas, cada una de ellas estaban expuestas a diferentes espacios de secado, lo cual implicó que unos puntos se secaran más rápido que otros y esto alteró por completo el resultado de la primera prueba. Afortunadamente, el error fue identificado rápidamente y corregido a tiempo.

Las nuevas muestras preparadas, utilizando el material descrito en la metodología, cumplieron a cabalidad con las exigencias de la prueba Próctor Estándar así como los requisitos de los ensayos de repetitividad.

Muestra Patrón para el Ensayo Próctor Modificado

Al igual que las muestras patrón para el ensayo Próctor Estándar, las muestras para el ensayo de compactación modificado sufrieron una variante en el contenido de humedad inicial debido a la situación descrita anteriormente respecto a las bolsas que contenían las muestras. Para este caso, repetir la preparación de las muestras representaba el doble del tiempo que el necesitado para preparar las muestras estándar (aproximadamente de 4 a 5 días). Esto porque el procedimiento de preparación para este ensayo presentaba una mayor cantidad de trabajo debido

al tipo de material por utilizar. Como se describió en el marco teórico, cada uno de los puntos debía tener un 60% de material grueso y un 40% de material fino, lo cual implicaba pesar material grueso y material fino por aparte, homogenizar y llenar las bolsas. Esto para cada punto por utilizar en la prueba.

Sumado a ello, la cantidad de material extraído del lugar de muestreo no fue suficiente para cubrir las necesidades de las pruebas de repetitividad. En total se debían preparar 45 puntos, y el material alcanzó únicamente para preparar 30 puntos. Para cubrir las 15 muestras restantes, se decidió visitar de nuevo el Quebrador Santa Ana para extraer más material de base. El problema en ese momento era, que a pesar de ser un material de base y tener una graduación similar a la muestra extraída originalmente, no provenía de un mismo estrato rocoso. Esto se identificó una vez que el material se dejó secando en el laboratorio. La muestra inicial en condición seca presentaba un color gris oscuro mientras que la muestra extraída posteriormente semejaba un color café oscuro. Entonces se tomó la decisión de mezclar el material de los 30 puntos ya preparados y mezclarlos con el nuevo material. Una vez combinados, se homogenizaron y pasaron por las mallas respectivas para separar el material fino del grueso. Posteriormente, se prepararon los puntos con los porcentajes de finos y gruesos mencionados anteriormente, y las muestras se almacenaron en bolsitas debidamente cerradas. Los hechos señalados en los párrafos anteriores, provocaron un atraso de aproximadamente 2 semanas.

De acuerdo con lo obtenido en las pruebas de evaluación de desempeño, el material fue preparado correctamente y presentó las condiciones óptimas para la ejecución de los ensayos respectivos.

Pruebas de Repetitividad y Reproducibilidad

En este apartado, se discutirá la ejecución de las pruebas y las limitaciones presentadas a la hora de su elaboración con base en los resultados obtenidos.

Ensayo de Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos de Límites de Consistencia son satisfactorios, ya que éstos cumplen con los valores de Límite Líquido, Límite Plástico e índice de Plasticidad, que caracterizan un limo arcilloso. Si no se hubiera tenido certeza del material utilizado a la hora de realizar las pruebas, los valores obtenidos en cada ensayo hubiesen permitido clasificar el material mediante los sistemas de clasificación y seguramente, obtener una caracterización relacionada a un limo arcilloso.

Sin embargo, no siempre un buen resultado justifica un buen procedimiento. Esta afirmación está asociada a varios ensayos cuyos resultados son aceptables, mas no concuerdan con la lógica y el procedimiento de ensayo. Por ejemplo, las pruebas #2 y #3 llevadas a cabo por el técnico No.2 (*ver cuadros 18 y 19*), muestran un comportamiento anómalo en las gráficas respectivas pues éstas sufren una especie de quiebre, lo cual no concuerda con el comportamiento que deberían mostrar. Teóricamente, conforme se aumenta el contenido de humedad de la muestra se disminuye el número de golpes necesarios para cerrar la ranura en la Copa Casagrande. Esto se refleja gráficamente, mediante una recta de mejor ajuste decreciente. Lo que sucede en los ensayos ejecutados por el técnico No. 2 es que, probablemente la muestra en un momento determinado fue descuidada y perdió un poco de humedad o bien, un exceso de espatuleo durante la homogenización provocó el escape de humedad. Por ejemplo, en la figura 10 se puede observar que en el tercer punto se obtuvo un porcentaje de humedad inferior al obtenido para el segundo punto, cuando éste debió ser mayor. Además se aprecia que el primer y segundo punto muestran un comportamiento creciente en humedad y número de golpes, pero al llegar al tercer punto, se produce una disminución del contenido de agua a un mayor número de golpes, lo cual contradice la lógica del ensayo. No obstante, el resultado no hubiese sufrido una variación considerable si el ensayo hubiese seguido la lógica esperada. A raíz de la discusión anterior, el técnico debe ejecutar de nuevo las dos pruebas para garantizar que, tanto la ejecución del ensayo como el resultado obtenido, son complacientes. Las pruebas restantes se

realizaron con bastante normalidad y no sufrieron limitación alguna.

Ensayo Próctor Estándar

Los valores obtenidos para los ensayos estándar son aceptables, pero un poco confusos si se compara lo obtenido por un técnico con el otro.

Comúnmente, los ensayos de compactación en el laboratorio son propensos a errores relacionados con la ejecución del ensayo. La pérdida de humedad del espécimen por no tapanlo adecuadamente, una mala compactación mediante el mazo o una mala homogenización generalmente constituyen los factores de más cuidado en este tipo de ensayos y esto se considera pudo haber ocasionado la dispersión en los valores obtenidos tanto para la densidad seca máxima como el contenido de humedad óptimo.

Como se observa en los resultados asociados a dicho ensayo, algunas curvas de compactación cumplen con el comportamiento deseado, es decir, una curva suave cóncava hacia abajo en la cual, se tienen dos puntos del lado seco y dos del lado húmedo respecto al punto óptimo. Sin embargo, algunas figuras no muestran dicho comportamiento a pesar de que el resultado final es aceptable. Por ejemplo, en la figura 15 se puede apreciar que tres puntos se encuentran del lado seco y un solo punto se sitúa del lado húmedo con respecto al punto óptimo. Dicha figura corresponde al primer ensayo realizado. En ese momento, no se tenía certeza qué cantidad de agua se debía agregar a la primera muestra para llevar el material al punto óptimo. Por esta razón, el técnico No.1 decidió agregar 150ml de agua para llevar al espécimen al contenido de agua óptimo. La decisión se basó en la experiencia del mismo. La gráfica muestra que el punto óptimo se alcanzó en el cuarto punto donde se agregaron 225ml de agua. Dicha conclusión guió a los otros técnicos a realizar el ensayo partiendo del supuesto que el contenido de humedad óptimo, y por ende, la densidad seca máxima se hallaba directamente agregando 250ml de agua al primer punto. A partir de esa cantidad, era posible agregar más o menos agua para obtener dos puntos húmedos y dos puntos secos respectivamente. De ahí, la importancia del primer ensayo y su justificación.

Otro punto a discutir se observa en la figura 17. La forma de la curva de compactación

no concuerda con la forma que se debería tener. Como se muestra en el gráfico, el cuarto punto se sale del orden de la curva. En teoría, este punto en discusión debería presentar una densidad seca mayor a la del quinto punto, lo cual no ocurre. Debe ser mayor puesto que una vez que la muestra cuenta con la cantidad de agua óptima requerida, el hecho de agregar más agua provoca que al compactar la muestra con una misma energía, el agua contenida en esta, salga a la superficie ya que no tiene un punto de evacuación, provocando siempre un aumento en la humedad y una disminución de la densidad seca. En este caso, esto no ocurre ya que, como se observa en el cuadro 25, el ρ_m (Densidad Húmeda) no concuerda con el orden ascendente que tienen los demás puntos. Si éste hubiese sido mayor, la curva de compactación hubiese contado con una forma aceptable.

Con respecto a las figuras 22 y 23, se obtuvieron tres puntos secos y un punto húmedo. Probablemente, una mala homogenización del material o una pérdida de humedad durante el moldeo pudieron haber afectado el resultado en el punto óptimo. Una mala homogenización pues el agua debe ser distribuida de forma homogénea en todo el material para evitar concentraciones en un solo punto, lo cual pudo provocar que algunas regiones del material se compactaran más que otras. También, la pérdida de humedad en el moldeo fue una posible causa pues al ser un material fino, éste se seca más fácilmente y cualquier descuido puede haber ocasionado la pérdida de humedad.

Los ensayos restantes muestran resultados aceptables y no sufrieron limitante alguna durante su ejecución.

Ensayo Próctor Modificado

El ensayo Próctor Modificado no evidenció tantas dudas en los resultados en comparación con el ensayo estándar. Al igual que el anterior, se inició con una prueba de verificación para encontrar la cantidad de agua necesaria para obtener el punto óptimo. Dicha prueba determinó que debían agregarse 300ml de agua a la muestra y de ahí, obtener dos puntos secos y dos húmedos respecto al óptimo. Con base en este resultado se ejecutaron con normalidad las pruebas restantes.

Una de las limitantes que existió en la ejecución de la pruebas se relaciona con el gran

despliegue físico llevado a cabo por el personal de la empresa. La prueba de compactación modificada requiere compactar cinco capas de material con 56 golpes, utilizando un mazo con un peso considerable. Esto significó que cada técnico debía realizar 1400 golpes por prueba, lo cual es agotador. Cuando se llegaban a compactar los dos últimos puntos, el ritmo con que se compactaron los dos primeros puntos en ese momento no era el mismo debido al cansancio. Esto provocaba que algunas pruebas en el cuarto y quinto punto presentaran densidades secas muy bajas a humedades relativamente altas con respecto a la densidad seca máxima. El caso anterior se observa en las figuras 24,25,26 y 27. Además, se tuvo la precaución de que ningún técnico ejecutará dos pruebas seguidas ya que esto podía significar, aparte de un gran esfuerzo físico, un error en el procedimiento y en los resultados finales, lo cual por la limitada cantidad de muestras patrón y para el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto, no era recomendable.

Las pruebas restantes se hicieron con mucha normalidad y con resultados aceptables.

Análisis Estadístico

Como se mencionó en el marco teórico, el objetivo de la aplicación de un análisis estadístico para el presente proyecto se basa en determinar si el personal técnico dentro del alcance de la acreditación trabaja de forma similar o de una forma diferente entre sí. El resultado esperado para las tres pruebas radica en que todo el personal técnico se guíe bajo una misma forma de realizar el ensayo. En términos estadísticos, si el estadístico de prueba F es menor a F_α , se concluye que el personal trabaja de una forma similar. En caso contrario, se dice que el personal ejecuta los ensayos de una forma diferente. En este apartado se discuten únicamente los resultados y no la ejecución del ensayo pues no se encuentra dentro del alcance de un análisis estadístico. Los resultados se discuten para cada uno de los ensayos.

Ensayo de Límites de Atterberg

La evaluación del personal técnico involucrado en el ensayo de Límites de Atterberg, detallado en los cuadros 43, 45 y 47, presenta resultados

satisfactorios para el interés de la empresa y de la investigación con miras a una futura auditoría externa por parte del ECA.

Todos los parámetros asociados a dicha prueba cumplieron con las expectativas de la evaluación.

Con respecto al límite líquido, la variación en los resultados obtenidos por cada técnico fue muy poca. La mayor variación se presentó en los resultados correspondientes al técnico No1. Por su parte, la obtención del límite plástico presentó márgenes de variación muy pequeños. Tan es así, que el técnico No 2 obtuvo una variación de cero en sus resultados, lo cual es satisfactorio. No obstante, se debe recordar que esta persona deberá repetir los ensayos pues la ejecución del ensayo presentó algunas anomalías. A pesar de esto, los resultados son válidos. Con respecto a la obtención del índice de plasticidad, al ser un parámetro dependiente de los dos anteriores, era de suponerse que la variabilidad en sus resultados sería poca, y esto se comprueba en la evaluación realizada.

Para todos los parámetros anteriores, el análisis global realizado a los tres técnicos, muestra que el estadístico de prueba F es menor al valor crítico F_{α} , por lo tanto, el personal técnico dentro del alcance de la acreditación ejecuta el ensayo de Límites de Atterberg bajo un mismo procedimiento y de una forma muy similar.

Ensayo Próctor Estándar

El ensayo de compactación Estándar presentó un mayor grado de confusión en los resultados finales, tanto en la densidad seca máxima como en el contenido de humedad óptimo. Los valores obtenidos son dispersos y estuvieron sujetos a varias anomalías en la ejecución. Esto se refleja en el análisis estadístico donde se concluyó que la evaluación del desempeño del personal fue negativa y obliga a replantear una nueva evaluación. Esto se muestra en los cuadros 50 y 52. El valor de F obtenido es mucho mayor al valor crítico de F_{α} , por lo tanto, se concluye que los técnicos no trabajan de la misma manera o no conocen a cabalidad el procedimiento. Las pruebas de compactación son complicadas y requieren de cuidado a la hora de ejecutarlas.

La densidad seca máxima es el parámetro con la mayor variación de las medias muestrales y entre grupos. En el cuadro 50 se observa que el T3 es el que presenta una gran

dispersión de los resultados con respecto a la media. Esto provocó un desequilibrio en los resultados lo cual se tradujo en el resultado final. El contenido de humedad óptimo representó un parámetro con una gran variación aunque menor a la de la densidad seca. En el cuadro 51 se aprecia que la variación de los resultados para cada técnico con respecto a su media fue muy poca. La diferencia se fundamenta en que las medias obtenidas por los tres técnicos son diferentes. Esto a fin de cuentas provocó el desequilibrio en los resultados lo cual no es beneficioso para los intereses de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A.

Ensayo Próctor Modificado

Un caso particular ocurre en la evaluación del desempeño del personal correspondiente a la prueba Próctor Modificado. El análisis estadístico muestra que los valores de densidad seca máxima promedio presentan una variabilidad relativamente pequeña pero suficiente para concluir que no cumple con lo esperado. Como se observa en el cuadro 55, el estadístico de prueba F supera por poco el valor crítico F_{α} . La variación asociada a cada uno de los técnicos, especialmente, para el T3 determinó el resultado del análisis estadístico para los valores de densidad seca máxima.

Con respecto al contenido de agua óptimo, el cuadro 57 muestra un resultado positivo para efectos de la evaluación del desempeño. Se obtuvo un valor de F menor a F_{α} , lo cual indica que los técnicos trabajaron de forma similar a la hora de obtener los contenidos de humedad óptimos.

A pesar de esto, no se cumplió con los resultados esperados, pues ambos parámetros debían cumplir con la evaluación del desempeño del personal. No tiene sentido considerar que un ensayo cumple con lo esperado si únicamente un parámetro alcanzó las expectativas. Por esta razón, los ensayos deben ser ejecutados nuevamente para garantizar que los técnicos obtengan resultados más congruentes.

Con base en lo anterior, se concluye que los técnicos dentro del alcance de la acreditación ejecutan los ensayos de una manera diferente, lo cual no es bien visto para efectos del Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A.

Conclusiones

- La lectura en conjunto de la norma INTE:ISO/IEC 17025:2005 y la documentación del Sistema de Gestión de Calidad de la empresa Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A significó el método más eficiente para la comprensión de la norma y del sistema en sí.
- La implementación de un Sistema de Gestión de Calidad implica la elaboración y el control de una cantidad considerable de documentación técnica mediante un sistema de codificación que facilite la referencia de los documentos.
- Se realizaron con éxito los instructivos técnicos para los ensayos de Límites de Atterberg y Próctor de Compactación así como los instructivos adicionales para Contenido de humedad y granulometría en suelos, siguiendo los lineamientos y los formatos bajo los cuales se rige el Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A.
- La experiencia de un técnico y el conocimiento científico que éste adquiere así como los pasos que sigue en la ejecución de un ensayo colabora con los procedimientos contenidos en cualquier norma internacional.
- Las hojas de registro de toma de datos deben ser lo suficientemente explícitas para facilitar la ejecución de los ensayos y agilizar la anotación de las mediciones.
- Las hojas de cálculo representan una herramienta mediante la cual se dinamiza la obtención de los resultados y se agiliza la labor diaria de la empresa.
- La documentación técnica debe adaptarse, no sólo a las disposiciones de las normas ASTM, sino también a los resultados por obtener y a las necesidades del personal técnico.
- Los moldes de compactación cumplen con las dimensiones máximas y mínimas según la Norma ASTM 698 y ASTM 1557, por lo tanto, todos los moldes son aptos para ser utilizados en cualquier momento.
- Únicamente el mazo estándar y el mazo modificado #1 son aptos para la realización de los ensayos de compactación. El mazo #2 no satisface las necesidades del ensayo, por lo tanto, se considera no apto.
- Las mallas de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " y #4 cumplen con las tolerancias establecidas y pueden ser utilizadas en cualquier ensayo de compactación.
- La capacitación brindada al personal técnico se completó de manera eficiente mas ésta no se exime de una mejora continua con respecto a la forma de su ejecución.
- Las muestras patrón para los ensayos de Límites de Atterberg y Próctor de Compactación cumplen con las características deseadas y las exigencias de las pruebas de repetitividad y reproducibilidad, según los resultados obtenidos.
- No siempre la obtención de un buen resultado viene precedido de una buena ejecución. Tanto el procedimiento como el resultado final deben cumplir con la lógica causa-efecto, es decir, un buen procedimiento debe llevar a un buen resultado.
- Se cumplió de manera eficiente con la evaluación del desempeño del personal técnico dentro del alcance de la acreditación, lo cual se evidenció en los resultados de las pruebas de repetitividad y reproducibilidad así como del análisis estadístico.

- Según el análisis de varianza, la forma de trabajar del personal técnico es válida únicamente para el ensayo de Límites de Atterberg. Los ensayos de compactación fueron ejecutados de manera diferente por el personal técnico, lo cual, no es válido en la evaluación de desempeño del personal.
- Los procedimientos técnicos elaborados fueron implementados con éxito y actualmente forman parte del Sistema de Gestión de Calidad de Ingeniería Técnica de Pavimentos S.A.

Recomendaciones

- Es recomendable que el personal encargado de elaborar los instructivos técnicos realice la mayor cantidad de ensayos posible, pues algunas veces el procedimiento no es lo bastante explícito lo cual dificulta el desarrollo de la documentación técnica.
- La documentación técnica elaborada debe ser revisada nuevamente con el fin de establecer acciones de mejora que permitan incrementar la eficiencia en la ejecución del ensayo.
- Se recomienda ejecutar capacitaciones al personal sobre el uso de programas computacionales utilizados día a día en la empresa.
- Los mazos de compactación deben ser revisados periódicamente, por ser el equipo con mayor posibilidad de sufrir desperfectos que afecten la ejecución de un ensayo y del resultado final.
- Es recomendable realizar capacitaciones dinámicas, las cuales incentiven la participación del personal y al mismo tiempo fomenten el deseo de aprendizaje y superación del personal técnico.
- Es necesario mejorar las medidas de supervisión durante la ejecución de las pruebas de repetitividad para identificar rápidamente posibles fuentes de error que perjudiquen la prueba y corregirlas a tiempo.
- Es importante realizar nuevas capacitaciones sobre las pruebas de compactación que expliquen de forma más eficaz el procedimiento del ensayo y al mismo tiempo aplicar las medidas correctivas que subsanen los errores cometidos en la primera versión de la evaluación del desempeño.

Apéndices

Apéndice 1

Instructivo Técnico: *Límites de Atterberg.*

Apéndice 2

Registro de toma de datos: *Límites de Atterberg.*

Apéndice 3

Hoja Electrónica: *Límites de Atterberg.*

Apéndice 4

Instructivo Técnico: *Próctor Estándar.*

Apéndice 5

Instructivo Técnico: *Próctor Modificado.*

Apéndice 6

Registro de toma de datos: *Próctor Estándar y Modificado.*

Apéndice 7

Hoja Electrónica: *Próctor Estándar y Modificado.*

Apéndice 8

Instructivo Técnico: *Contenido de humedad en Suelos.*

Apéndice 9

Instructivo Técnico: *Distribución de tamaño de las partículas en suelos.*

Apéndice 10

Registro de toma de datos: *Distribución de tamaño de las partículas en suelos.*

Apéndice 11

Hoja Electrónica: *Distribución de tamaño de las partículas en suelos.*

Apéndice 12

Registro de toma de datos: *Verificación de moldes de compactación.*

Apéndice 13

Hoja Electrónica: *Verificación de moldes de compactación de 101,6mm y 152,4mm.*

Apéndice 14

Registro de toma de datos: *Verificación de mazos de compactación.*

Apéndice 15

Hoja Electrónica: *Verificación de mazos de compactación.*

Apéndice 16

Plan de Capacitaciones.

Anexos

ANEXO 1

Tabla de Valores de F_{α} para Análisis Estadístico.
"Introducción a la Probabilidad y la Estadística",
Mendehall, William.

ANEXO 2

Tabla de Especificaciones para Mallas
American Society for Testing and Materials ASTM E-11. American Society for Testing and Materials, (ASTM). 2003 Annual Book of ASTM Standard, ASTM, EUA, 2003.

ANEXO 3

Equipo para Límites de Atterberg.

ANEXO 4

Equipo para Próctor Estándar y Modificado.

ANEXO 5

Molde de Compactación de 101,6mm.

ANEXO 6

Molde de Compactación de 152,4mm.

ANEXO 7

Mazo de Compactación Estándar.

ANEXO 8

Mazo de Compactación Modificado.

ANEXO 9

Malla $\frac{3}{4}$ ".

ANEXO 10

Malla $\frac{3}{8}$ ".

ANEXO 11

Malla #4.

ANEXO 12.

Muestra Patrón Límites de Atterberg

ANEXO 13

Muestra Patrón Próctor Estándar.

ANEXO 14

Muestra Patrón Próctor Modificado.

ANEXO 15

Pruebas de Repetitividad Próctor Modificado:
Compactación.

ANEXO 16

Pruebas de Repetitividad Próctor Modificado:
Moldeo de Muestras.

ANEXO 17

Pruebas de Repetitividad Próctor Modificado:
Contenido de Humedad.

ANEXO 18.

Quebrador Santa Ana. Lugar de Extracción de
Muestra Patrón Próctor Modificado.

Referencias

- Mendenhall, W. 1987. **INTRODUCCIÓN A LA PROBABILIDAD Y LA ESTADÍSTICA**. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 626p.
- ASTM. 2003. *ASTM D-4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 2003 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARS**. Volumen 04.08: 582:595 p.
- ASTM. 2003. *ASTM D-698 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400ft-lbf/ft³(600kN-m/m³))*. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 2003 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARS**. Volumen 04.08: 78:88 p.
- ASTM. 2003. *ASTM D-1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000ft-lbf/ft³(2700kN-m/m³))*. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 2003 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARS**. Volumen 04.08: 133:142 p.
- ASTM. 2003. *ASTM D-2216 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass* **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 2003 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARS**. Volumen 04.08: 219:223 p.
- ASTM. 2003. *ASTM D-422 Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils*. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 2003 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARS**. Volumen 04.08: 10:17 p.
- ASTM. 2000. *ASTM E11*. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 2000 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARS**.
- INTECO.2005. *Norma INTE-ISO/IEC 17025:2005: Requisitos Generales para la Competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración*. **NORMA INTE-ISO/IEC 17025:2005**. 1:38 p.