



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Proyecto de Suelo-Cemento:
pruebas de laboratorio y
ensayo de especímenes.**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Ricardo Torres Sierra

ASESOR DE INFORME

Ing. Heriberto Esquivel Castellanos



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Agradecimientos

A mis familiares

A mis padres, Fabiola y Alfredo, por siempre estar a mi lado dándome su apoyo incondicional y brindándome todo su cariño, gracias por hacer de mi lo que soy hoy.

A mis hermanos, Alex y Mariam, por ser un ejemplo a seguir.

A mis abuelos, Roberto, María Luisa y Eva, por preocuparse siempre por mí y por ayudarme en todo lo que necesitaba, además de todo el cariño que me tienen.

A mi novia

A Ailyn por todo su apoyo, amor y paciencia, por alentarme a seguir adelante sin rendirme y haberme ayudado a crecer como persona, con ella aprendí muchas cosas que no se enseñan en la escuela.

A mis maestros

En especial al ingeniero Heriberto Esquivel Castellanos por todo el conocimiento que me brindó y la motivación de aprender nuevas cosas por cuenta propia, así por toda la ayuda que me brindó durante toda la carrera.

Al equipo de trabajo del Centro de Tecnología Cemento y Concreto

Ya que con ellos aprendí muchísimas cosas, no sólo académicas y laborales, sino también personales. Un agradecimiento especial a Diego por su disposición y apoyo, a Noé por el conocimiento brindado, a Don Alex, mejor conocido como Tamales, por hacerme ver la vida desde otra perspectiva y a David Francia por esas buenas charlas personales.

También a Ernesto Bribiesca, quien llegó en un momento de importante cambio para mí, y me brindó todo su apoyo y conocimiento, fue excelente compañero de trabajo y un gran equipo.

Sobre todo, le agradezco inmensamente a Samantha Mendoza Acero, ya que gracias a ella pude estar en CEMEX y me permitió crecer de muchas formas, una de las mejores etapas de mi vida la viví con ayuda suya, gracias por todo lo que me enseñaste y por toda la paciencia que me tuviste.

A mis amigos

A Danielote porque, aunque estuviéramos físicamente lejos la amistad nunca murió y el apoyo se hizo más grande. A Brenda y Jesús, mis dos ingenieros favoritos, que me enseñaron que todo es posible.

Contenido

Introducción.....	1
I Cemex México.....	2
I.I Descripción de la empresa	2
I.II Historia'	2
I.III Organización	6
I.IV Centro de Tecnología de Cemento y Concreto	6
II Antecedentes	7
II.I Clasificación de los suelos	10
III Área de participación dentro de la empresa.	15
IV Descripción de las actividades realizadas.....	15
V Preparación del material	16
VI Pruebas básicas.....	19
VI.I Determinación de materia orgánica.....	19
VI.II Límites de consistencia.....	21
VI.II.I Límite líquido.....	21
VI.II.II Límite plástico.....	25
VI.II.III Límite de contracción.....	27
VI.III Determinación de la cantidad de cal óptima para estabilización	30
VI.IV Contenido de humedad mediante Proctor modificado	32
VII Elaboración de especímenes	42
VII.I Realización de la mezcla y llenado de los moldes	46
VIII Ensaye de los especímenes	49
VIII.I Compresión	49
VIII.II Permeabilidad.....	54
VIII.III Abrasión	57
VIII.IV Módulo Elástico	61
VIII.V Absorción capilar	64
IX Conclusiones.....	68
IX.I Conclusiones del proyecto suelo-cemento	68
IX.II Conclusiones personales.....	69
Referencias bibliográficas.....	72

Introducción

Este trabajo que estoy presentando lo ingreso como opción de titulación por experiencia profesional, en el cual describo las actividades que estuve realizando en la empresa Cementos Mexicanos S.A de C.V.

Mi participación en Cemex comenzó en octubre de 2015 y concluyó un año después, esto es, en octubre del 2016. Ingresé a la Gerencia de Investigación y Desarrollo, colaborando con la investigadora Ing. Samantha Mendoza Acero, que fue mi jefa directa por ocho meses y posteriormente estuve bajo las órdenes del Quím. Ernesto Bribiesca Contreras, en el proyecto “suelo-cemento”, que es el tema principal de este reporte de actividades profesionales.

Mi participación en la gerencia de Investigación y desarrollo fue el realizar las pruebas de laboratorio necesarias para el desarrollo del proyecto de suelo-cemento, así como la elaboración de los especímenes que posteriormente serían ensayados con un criterio que se explica en su respectiva sección. También me encargué de hacer un análisis de algunos datos obtenidos con dichas pruebas de laboratorio, así como también me involucré en un proyecto de concreto compactado con rodillo y de concreto lanzado, aunque en este trabajo me enfoco principalmente al proyecto de suelo-cemento por la amplitud y por el tiempo en el que estuve involucrado.

El objetivo de este reporte de actividades profesionales es dar a conocer las distintas actividades en las que estuve trabajando, así como explicar paso a paso en qué consisten las pruebas de laboratorio que llevé a cabo, así como dar a conocer brevemente el tema suelo-cemento y sus aplicaciones en la industria de la construcción.

De manera introductoria, el capítulo 1 abarca la historia de Cemex, la descripción de la empresa, así como las distintas áreas que posee, como es el Centro de Tecnología Cemento y Concreto, como marco de referencia del lugar donde laboré. En el capítulo 2, antecedentes, describo información importante que es necesaria conocer para entender mejor el proyecto del suelo-cemento, además de una parte especial en la clasificación de suelos ya que mucho de este trabajo está basado en lo que es un suelo.

En los capítulos 3 y 4 describo mi participación en la empresa, así como las actividades que realicé. En el capítulo 5 explico brevemente los primeros procedimientos que se le realizan a las nuevas muestras de suelos antes de su análisis integral.

Del capítulo 6 al 8 explicó a detalle todo el proceso que implican las distintas pruebas de laboratorio que son necesarias para hacer un estudio lo más completo posible del suelo-cemento, así como de los ensayos que se llevan a cabo del mismo.

Finalmente se presentan las metas y logros que alcancé dentro de la empresa, así como las conclusiones emanadas del proyecto suelo-cemento.

I Cemex México

I.I Descripción de la empresa

Cementos Mexicanos. S.A. de C.V., más conocida solamente como CEMEX, es una compañía global de soluciones para la industria de la construcción, que ofrece productos y servicio a clientes y comunidades en más de 50 países en el mundo a la vez que mantiene relaciones comerciales en más de 100 naciones.¹

I.II Historia^{2,3}

Los orígenes de la empresa datan del año 1906, cuando es fundada con la apertura de la planta Cementos Hidalgo en el norte de México, específicamente en Monterrey.

La Revolución Mexicana ocasiona que se suspenda la producción en la planta Cementos Hidalgo; la falta de energía eléctrica, vías de comunicación y recursos humanos previene que la compañía continúe su distribución de cemento. No es sino hasta el año de 1919, con un ambiente político y económico difícil, que se reinicia la producción parcial en la planta Cementos Hidalgo.

En 1920, abre su planta de Cementos Portland Monterrey, con una capacidad de operaciones anual de 20,000 toneladas, lo que le permite abastecer la demanda de cemento del noroeste de la República. Gracias a la instalación del primer horno de un solo paso y proceso seco del

¹ Cemex México. Perfil de la Compañía. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/PerfilCompania.aspx>

² Cemex México. Acerca de Cemex: Nuestra Historia. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/Historia.aspx>

³ Javier Lara Bayón, Alejandra Betancourt, Ernesto Soto Páez. (2006). CEMEX, El libro del Centenario. Monterrey, México: Editorial Clío.

país, utilizando la tecnología más moderna de su época, la empresa se coloca a la vanguardia en tecnología.

Para el año 1930, Cementos Portland Monterrey instala su segundo horno e incrementa su capacidad en un 100% y la planta comercializa la marca Cemento Portland Monterrey para satisfacer la demanda del Noreste de México.

Un suceso importante para la empresa ocurre en el año 1931, cuando Cementos Hidalgo y Cementos Portland Monterrey se fusionan para formar Cementos Mexicanos S.A. Con la expansión de Planta Monterrey, CEMEX vende 230,420 toneladas de cemento gris y 14,692 toneladas de cemento blanco en el año 1959.

En 1966 CEMEX adquiere la planta de Cementos Maya en Mérida y continúa satisfaciendo la demanda del sur de México a través de la marca Cemento Portland Maya. A su vez inicia producción en su nueva planta Valles, que atiende a la región Huasteca en México con la marca Cemento Portland Monterrey.

Un año después inicia producción en su nueva planta de cemento Torreón a través de las marcas de Cemento Portland Puzolana Monterrey y Cemento Portland Monterrey para satisfacer la creciente demanda en el Noreste de México.

Para el año 1973 CEMEX adquiere la planta Cementos Portland del Bajío en la región central de México. Las exportaciones de CEMEX alcanzan 574 mil toneladas de cemento y clinker en el año 1985.

Otro suceso importante ocurre en el año 1986, cuando inicia operaciones la planta Huichapan con la más avanzada tecnología cementera. Distribuye cemento a constructores en la región central de México. La planta cuenta con una capacidad anual de producción de más de 1 millón de toneladas de cemento, y la compañía excede los 10.7 millones de toneladas al año de capacidad de producción instalada. Al año siguiente CEMEX adquiere Cementos Anáhuac y envía sus primeros equipos de integración post-adquisición para consolidar las nuevas operaciones.

CEMEX se convierte en una de las diez compañías cementeras más grandes del mundo al adquirir Cementos Tolteca, el segundo productor más grande de México, en el año 1989. Tres

años después CEMEX inicia su expansión internacional en el mercado europeo con la adquisición de Valenciana y Sanson, las dos compañías cementeras más grandes de España.

En el 1994 la empresa inicia operaciones en Sudamérica al adquirir Vencemos, la compañía cementera más grande de Venezuela, y en Centroamérica al adquirir Cemento Bayano en Panamá. También expande sus operaciones al adquirir Balcones, una planta cementera en Estados Unidos. Este año fue importante para el crecimiento y expansión de la empresa.

En años sucesivos CEMEX se establece en la región del Caribe al adquirir Cementos Nacionales, la compañía cementera líder en República Dominicana y se convierte en la tercera compañía cementera más grande del mundo al adquirir Cementos Diamante y Samper en Colombia.

CEMEX amplía sus operaciones internacionales, expandiéndose en el mercado asiático con la adquisición de Rizal Cement en Filipinas y con la adquisición de APO Cement en Filipinas e incrementa su inversión en Rizal Cement.

Siendo el año de 1999 CEMEX comienza operaciones en África al adquirir Assiut Cement Company, uno de los productores de cemento líderes de Egipto. También para este año CEMEX refuerza su presencia en Centroamérica y el Caribe al adquirir Cementos del Pacífico, la cementera más grande de Costa Rica.

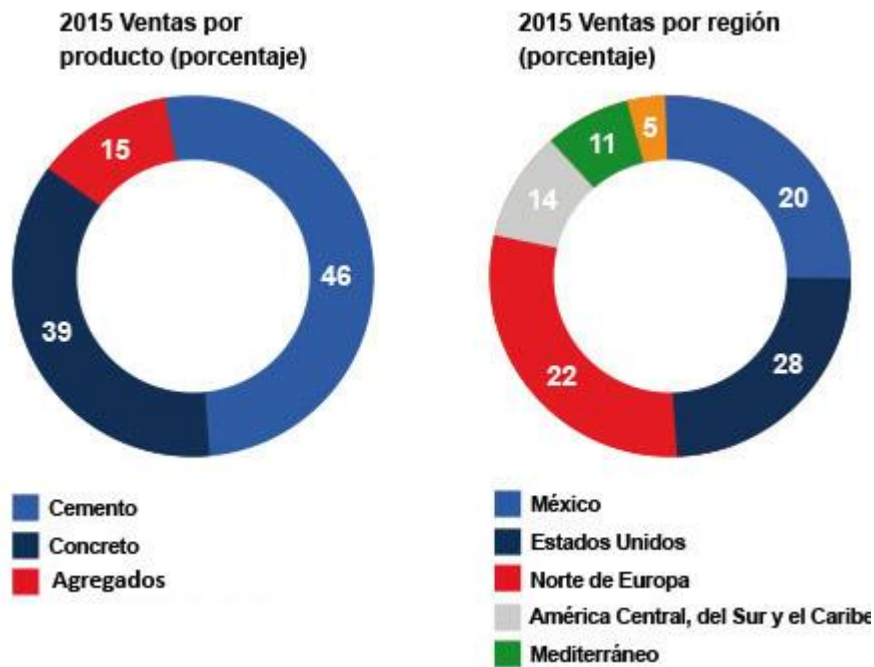
Entrando al nuevo milenio CEMEX se convierte en el productor de cemento más grande de Norteamérica al adquirir Southdown, Inc. en los Estados Unidos. En tan solo dos años más, CEMEX incrementa su presencia en Centroamérica al iniciar operaciones en Nicaragua y fortalece su presencia en el mercado asiático al adquirir Saraburi Cement Company en Tailandia y consolida su posición en el Caribe al adquirir Puerto Rican Cement Company.

Llegando al año en curso, 2016, CEMEX celebra 110 de existencia colocándose como uno de los principales productores de cemento del mundo y como líder mundial en concreto premezclado y uno de los mayores productores de agregados. Hoy por hoy es uno de los mayores comercializadores de cemento y clínker del mundo.

En la tabla 1 se aprecian datos relevantes de las operaciones de producción de la empresa, mientras que en la gráfica 1 se muestra la distribución de ventas que Cemex tiene a nivel internacional.

Cifras Clave	
Ventas Anuales	US \$14,127 millones
Flujo de Operación	US \$2,636 millones
Empleados en el mundo	43,000
Capacidad de Producción	Cemento 93M tons
Niveles Anuales de Producción	Agregados 148M tons Concreto 53M m ³

Tabla 1 Cifras clave de la empresa, al 31 de diciembre de 2015.⁴



⁴ Cemex México. Perfil de la compañía. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/PerfilCompania.aspx>

*Gráfica 1 Distribución de ventas, al 31 de diciembre del 2015.*⁵

I.III Organización⁶

CEMEX está organizado en más de 13 áreas funcionales interconectadas entre sí, dichas áreas se presentan a continuación en forma de listado:

- Operaciones
- Salud y Seguridad
- Mercadotecnia
- Comercial
- Logística
- Abasto
- Tecnología
- Investigación y Desarrollo
- Recursos Humanos
- Comunicación y Asuntos Corporativos
- Planeación
- Finanzas y Tesorería
- Legal
- Sustentabilidad

I.IV Centro de Tecnología de Cemento y Concreto⁷

El Centro de Tecnología Cemento y Concreto (CTCC) de CEMEX es el primer centro en desarrollo tecnológico del concreto y materiales para la construcción del más alto nivel en México y Latinoamérica.

Dentro del CTCC se desarrollan todas las líneas de investigación para la generación de nuevos productos y soluciones, a su vez que evalúa tecnologías innovadoras o de otras industrias para

⁵ Cemex México. Perfil de la compañía. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/PerfilCompania.aspx>

⁶ Cemex México. Nuestras Áreas. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/TrabajaConNosotros/NuestrasAreas.aspx>

⁷ Cemex México. Centro de Tecnología Cemento y Concreto. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemexmexico.com/Concretos/CTCC.aspx>

probar su incorporación en los productos y servicios desarrollados e incorpora desarrollos de nanotecnología en las soluciones ofertadas.

Otro campo importante dentro del CTCC es determinar el potencial uso de las materias primas y nuevas tecnologías en concreto y otros productos relacionados a la industria de la construcción.

Igualmente coordina el Comité de I+D (Investigación y Desarrollo) en conjunto con CEMEX Research Group y VP Operaciones y Técnica, así como la colaboración con instituciones educativas y de investigación.

Como parte del programa de investigación y desarrollo se han ejecutado más de 50 proyectos de investigación, logrando desarrollar una oferta de más de 30 concretos especiales. Entre algunos casos de éxito tenemos los siguientes productos:

- Concretos FORTIS Ultra Alta Resistencia
- Tecnología Antigraffiti
- Termoaislantes para concretos
- Morteros arquitectónicos
- Concretos de ultra baja permeabilidad
- Concretos con aroma
- Concreto y mortero Antihongo
- Concreto y mortero Antialga
- Concreto autocurable

II Antecedentes

En México, existen aproximadamente 160,000 km de carreteras que están revestidos de tierra y son de vital importancia para los caminos rurales.⁸

Para darle solución a estos caminos se implementó el suelo-cemento. Éste es una mezcla en seco de suelo o tierra con determinadas características granulométricas y cemento Portland. A la mezcla se le adiciona una cierta cantidad de agua para su fraguado y posteriormente se compacta.

⁸ Infraestructura Carretera. Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Subsecretaría de Infraestructura. 2004.

En general, se considera que la aplicación del suelo-cemento comenzó a estudiarse en forma metódica y científica en el periodo comprendido de 1910 a 1920, sin embargo, existe evidencia de su utilización en pisos y muros desde mucho tiempo atrás. El tratamiento del suelo cemento ha sido considerado como una aportación importante al desarrollo tecnológico y de la ingeniería, principalmente porque permite ampliar de manera considerable la utilización de casi todos los suelos como materiales de construcción.⁹

La Portland Cement Association propone la definición siguiente del suelo-cemento: “El suelo-cemento, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material duro, durable y rígido. Se le usa principalmente como base en los pavimentos de carreteras, calles y aeropuertos.”¹⁰

Según la Portland Cement Association, el suelo-cemento plástico se considera como: “La mezcla de cemento con un suelo fino muy húmedo en estado plástico. Cuando se le coloca tiene la consistencia de un mortero plástico. Frecuentemente se usa en zonas difíciles donde no es posible compactar. Requiere una cantidad de cemento mayor que el tipo compactado, esto es, mayor del 10% y no se compacta”.¹¹

El suelo modificado con cemento, según la Portland Cement Association se define como: “Una mezcla, dura o semidura, íntima de suelo pulverizado, agua y pequeñas cantidades de cemento que se compacta. Por lo que se distingue del suelo-cemento compactado exclusivamente en la menor cantidad de cemento que se le adiciona. La cantidad de cemento en peso varía entre el 1 y el 4%. Se le usa principalmente cuando se requiere:

- Obtener mayor resistencia del suelo, aunque no muy alta.
- Compactar el terreno en condiciones más favorables.
- Hacer más impermeables determinados suelos.”¹²

El suelo tratado con cemento puede ser hecho con:¹³

⁹ M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle. (2013). Suelo-Cemento. Sus Usos, Propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, A.C. México, pp. 86.

¹⁰ Portland Cement Association. Properties and Uses of Cement-Modified Soil. CR 034 S. 1977.

¹¹ Portland Cement Association. Properties and Uses of Cement-Modified Soil. CR 034 S. 1977.

¹² Portland Cement Association. Properties and Uses of Cement-Modified Soil. CR 034 S. 1977.

- Suelo granular limpio
- Mezcla de suelos granulares finos, predominantemente limosos.
- Mezcla de suelos granulares y finos, predominantemente arcillosos.
- Suelos limosos.
- Suelos arcillosos.

Mientras más finos posea el suelo, mayor cantidad de cemento requerirá y por lo tanto el costo se incrementará.

Los principales usos del suelo-cemento dentro de la construcción son los siguientes:¹⁴

- Carpetas para carreteras de poco tráfico.
- Como base de carreteras, calles, estacionamientos y aeropuertos.
- Construcción de ataguías para protección en la construcción de presas.
- Construcción de balastos y sub balastos para vías férreas.
- Construcción de cimentaciones.
- Construcción de cortinas de presas.
- Construcción de gaviones.
- Construcción de pisos y muros.
- Estabilización de muros de tierra armada.
- Estabilización de taludes.
- Protección contra la erosión de márgenes producida por corrientes de agua.
- Protección de taludes en presas y almacenamientos.
- Revestimiento de canales.
- Y un largo etcétera.

En nuestro país se ha empleado poco el cemento como elemento de estabilización de suelos. Los casos de los que se tiene noticia son contados, sin embargo, existen zonas extensas donde su empleo es indicado, como la zona del Sureste de la República, especialmente en el estado

¹³ M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle. (2013). Suelo-Cemento. Sus Usos, Propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, A.C. México, pp. 86.

¹⁴ M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle. (2013). Suelo-Cemento. Sus Usos, Propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, A.C. México, pp. 86.

de Tabasco, y al sur de Veracruz, donde escasean los materiales para bases y sub-bases, y es grande la existencia de materiales plásticos.¹⁵

II.I Clasificación de los suelos

El método del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), requiere obtener la información pertinente sobre algunas las características esenciales del suelo a estudiar.

Esta información se obtiene a partir de dos pruebas de laboratorio normadas internacionalmente por la American Society for Testing Materials (ASTM). Las pruebas necesarias de obtención de datos para poder clasificar el suelo son el análisis granulométrico y los límites de consistencia (límite líquido y plástico) los cuales permiten obtener la distribución de tamaños de partícula del suelo y los contenidos de humedad de frontera entre diferentes estados de consistencia.¹⁶

Cuando se hace el análisis granulométrico y menos del 50% del material en estudio ha pasado la malla #200, se estará hablando que se trata de un suelo granular, de lo contrario se tratará de un suelo fino. Si se trata de un suelo granular y más del 50% del material se encuentra retenido en la malla #4, por lo tanto, hay más grava que arena, por lo que se trata de gravas. En caso contrario se trata de arenas.¹⁷

En Mecánica de Suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.¹⁸

La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada por el científico Albert Mauritz Atterberg límite líquido, nombre que hoy se conserva, mientras que a la frontera convencional entre los estados plástico y semisólido la llamó límite plástico, definida también en términos de una manipulación de laboratorio.

¹⁵ Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Especial, el primer artículo. Revista IMCYC. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en:

http://www.imcyc.com/revistacyt/enero2013/pdfs/especial_uno.pdf

¹⁶ Steven Quesada. Clasificación de un suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Instituto Tecnológico de Costa Rica. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en:

https://www.academia.edu/17252459/Clasificacion_de_los_suelos_segun_la_SUCS

¹⁷ ASTM D2487. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

¹⁸ Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez (1973). Mecánica de suelos, Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos. Limusa. México, pp. 499.

Para obtener el límite plástico, Atterberg colaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un rollito de espesor no especificado. El agrietamiento y desmoronamiento del rollito, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico y el contenido de agua en tal momento era la frontera deseada.¹⁹

Los límites líquido y plástico se ejecutan sobre material correspondiente a la fracción menor del Tamiz #40 de todos los suelos, incluyendo gravas, arenas y suelos finos. Estos límites se utilizan con un diagrama llamado carta de plasticidad, la cual se puede apreciar en la figura 1. En esta carta se destacan dos líneas, que actúan a modo de límites:

Línea A = $0.73(LL-20)$

Línea b = 50% (en el eje de las abscisas)

Para poder obtener la caracterización del suelo se necesita obtener el índice de plasticidad, después de haber realizado las pruebas del límite líquido y límite plástico.

El índice de plasticidad se calcula de la siguiente forma:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = índice de Plasticidad

LL = Límite líquido, expresado en porcentaje

LP = Límite plástico, expresado en porcentaje

Para esto, la clasificación se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades. En la tabla 2 se muestran dichos símbolos y su significación.²⁰

¹⁹ Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez (1973). Mecánica de suelos, Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos. Limusa. México, pp. 499.

²⁰ Manual de carreteras, Vol. 2, Capítulo 15 Suelos. Clasificación de suelos. Luis Banón Blázquez.

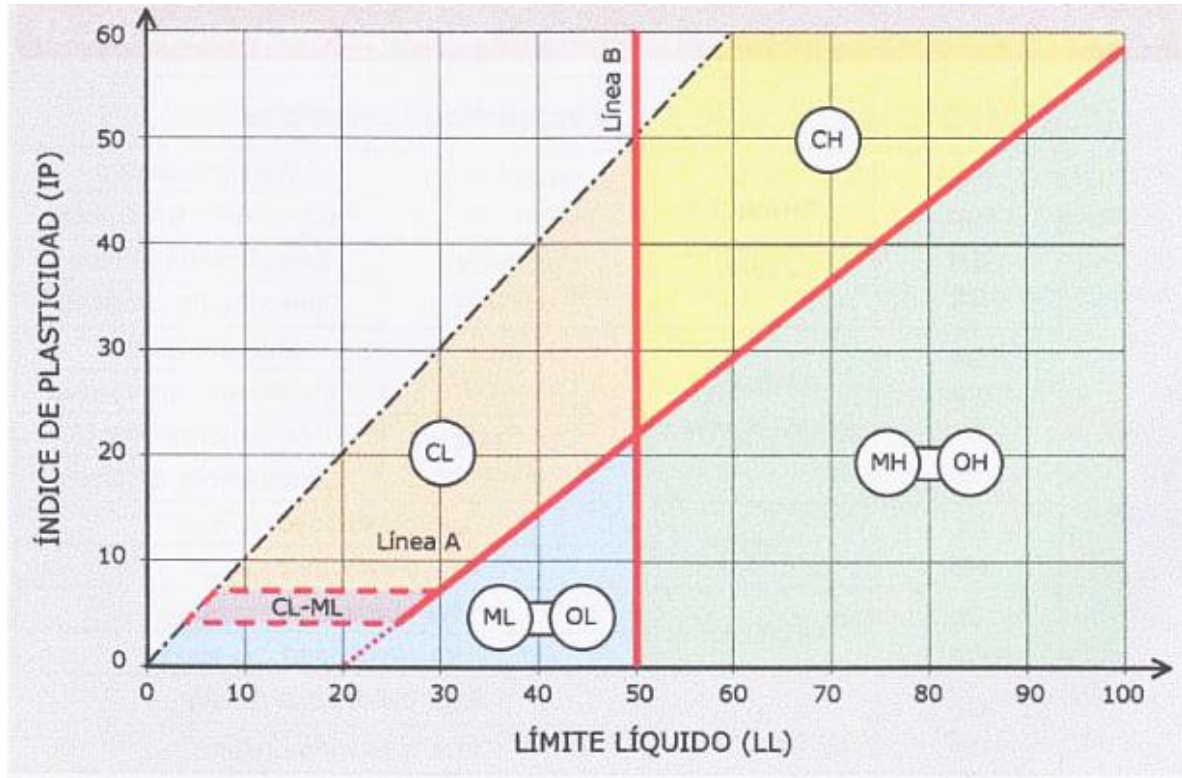


Figura 1 Carta de Plasticidad para suelos cohesivos. Obtenida de Manual de carreteras, Vol. 2 Luis Banón Blázquez, Capítulo 15 Suelos. Clasificación de suelos.

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrememente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

Tabla 2 Símbolos para clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Obtenido de Manual de carreteras, Vol. 2, Capítulo 15 Suelos. Clasificación de suelos. Luis Banón Blázquez.

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo, según se muestra es la tabla 3, mientras que la tabla 4 nos da una descripción más detallada de las diferentes combinaciones que se pueden hacer.

SÍMBOLO	Características generales		
GW GP GM GC	GRAVAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
			Pobremente graduadas
		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
			Componente arcilloso
SW SP SM SC	ARENAS (<50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
			Pobremente graduadas
		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
			Componente arcilloso
ML MH	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
CL CH	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
OL OH	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

Tabla 3 Tipología de suelos según el SUCS. Obtenido de Manual de carreteras, Vol. 2, Capítulo 15 Suelos. Clasificación de suelos. Luis Banón Blázquez.

La clasificación de un suelo es importante debido a que esta nos da información valiosa sobre las características típicas que presenta un suelo y sirve como base para tomar decisiones en los criterios de diseño de distintas obras ingenieriles de carácter civil.

En la tabla 5 se muestran algunas características que presentan los diferentes tipos de suelos.

Símbolo de grupo	Nombre de grupo
GW	< 15% arena → Grava bien graduada
	≥ 15% arena → Grava bien graduada con arena
GP	< 15% arena → Grava mal graduada
	≥ 15% arena → Grava mal graduada con arena
GW-GM	< 15% arena → Grava bien graduada con limo
	≥ 15% arena → Grava bien graduada con limo y arena
GW-GC	< 15% arena → Grava bien graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	≥ 15% arena → Grava bien graduada con arcilla y arena (o arcilla limosa y arena)
GP-GM	< 15% arena → Grava mal graduada con limo
	≥ 15% arena → Grava mal graduada con limo y arena
GP-GC	< 15% arena → Grava mal graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	≥ 15% arena → Grava mal graduada con arcilla y arena (o arcilla limosa y arena)
GM	< 15% arena → Grava limosa
	≥ 15% arena → Grava limosa con arena
GC	< 15% arena → Grava arcillosa
	≥ 15% arena → Grava arcillosa con arena
GC-GM	< 15% arena → Grava limo-arcillosa
	≥ 15% arena → Grava limo-arcillosa con arena
SW	< 15% grava → Arena bien graduada
	≥ 15% grava → Arena bien graduada con grava
SP	< 15% grava → Arena mal graduada
	≥ 15% grava → Arena mal graduada con grava
SW-SM	< 15% grava → Arena bien graduada con limo
	≥ 15% grava → Arena bien graduada con limo y grava
SP-SC	< 15% grava → Arena bien graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	≥ 15% grava → Arena bien graduada con arcilla y grava (o arcilla limosa y grava)
SP-SM	< 15% grava → Arena mal graduada con limo
	≥ 15% grava → Arena mal graduada con limo y grava
SP-SC	< 15% grava → Arena mal graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	≥ 15% grava → Arena mal graduada con arcilla y grava (o arcilla limosa y grava)
SM	< 15% grava → Arena limosa
	≥ 15% grava → Arena limosa con grava
SC	< 15% grava → Arena arcillosa
	≥ 15% grava → Arena arcillosa con grava
SC-SM	< 15% grava → Arena limo-arcillosa
	≥ 15% grava → Arena limo-arcillosa con grava

Tabla 4 Diagrama de flujo para grupo de suelos tipo grava y arenosos (Das, 2001, p. 42). Obtenido de Steven Quesada. Clasificación de un suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Instituto Tecnológico de Costa Rica.

DIVISIONES PRINCIPALES		SÍMBOLO	COMPORTAMIENTO MECÁNICO	CAPACIDAD DE DRENAJE	Densidad óptima P.M.	CBR In situ
SUELOS DE GRANO GRUESO	Gravas	GW	Excelente	Excelente	2.00 - 2.24	60 - 80
		GP	Buena a excelente	Excelente	1.76 - 2.08	25 - 60
		GM { d u	Buena a excelente	Aceptable a mala	2.08 - 2.32	40 - 80
			Buena	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
		GC	Buena	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
	Arenas	SW	Buena	Excelente	1.76 - 2.08	20 - 40
		SP	Aceptable a buena	Excelente	1.60 - 1.92	10 - 25
		SM { d u	Aceptable a buena	Aceptable a mala	1.92 - 2.16	20 - 40
			Aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
		SC	Mala a aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
SUELOS DE GRANO FINO	Limos y arcillas (LL < 50)	ML	Mala a aceptable	Aceptable a mala	1.60 - 2.00	5 - 15
		CL	Mala a aceptable	Casi impermeable	1.60 - 2.00	5 - 15
		OL	Mala	Mala	1.44 - 1.70	4 - 8
	Limos y arcillas (LL > 50)	MH	Mala	Aceptable a mala	1.28 - 1.60	4 - 8
		CH	Mala a aceptable	Casi impermeable	1.44 - 1.76	3 - 5
		OH	Mala a muy mala	Casi impermeable	1.28 - 1.68	3 - 5
SUELOS ORGÁNICOS		Pt	Inaceptable	Aceptable a mala	-	-

Tabla 5 Características de los suelos. Obtenido de *Manual de carreteras, Vol. 2, Capítulo 15 Suelos. Clasificación de suelos. Luis Banón Blázquez.*

III Área de participación dentro de la empresa.

Ingresa a Cemex para realizar prácticas profesionales en octubre del 2015, puesto en el que dure un año.

Durante mi estancia trabajando para Cemex estuve en la Gerencia de Investigación y Desarrollo, dentro del Centro de Tecnología de Cemento y Concreto.

IV Descripción de las actividades realizadas

En mi estancia en Cemex estuve colaborando en un proyecto de suelo cemento, un proyecto de concreto compactado con rodillo y en menor intensidad en un proyecto de concreto lanzado.

En este escrito describo el proyecto de suelo cemento, debido a que fue el proyecto en el que estuve participando más activamente y fue el proyecto con el que entré a trabajar y que a mí salida aún se encontraba en estudio. Dicho proyecto de suelo-cemento fue el que le dediqué el mayor tiempo en mi estadía dentro de la empresa.

Los objetivos del proyecto de Suelo-Cemento en el que participé fue realizar la elaboración de especímenes, ensayo de los mismo y posterior evaluación con distintos aditivos, los cuales, pueden ayudar a mejorar las propiedades del suelo y así lograr que un suelo de mala calidad se vuelva una estructura de buena calidad apto para ser usado en diversos proyectos de ingeniería.

Las actividades principales que desarrollé del proyecto fueron las pruebas de laboratorio para el análisis de las propiedades de un suelo mezclado con cemento. En un orden lógico las actividades realizadas son las siguientes:

- Preparación del material
- Determinación de materia orgánica
- Límites de consistencia
- Contenido de humedad óptimo
- Contenido óptimo de cal para estabilización
- Elaboración de especímenes mediante Proctor modificado y Porter
- Prueba de compresión
- Prueba de permeabilidad
- Prueba de abrasión
- Análisis de resultados

Estás actividades mencionadas se detallan a continuación.

V Preparación del material

Para hacer las distintas pruebas de laboratorio mencionadas con anterioridad se necesita preparar material proveniente de distintos bancos de material de diversas regiones del país con características particulares.

El material utilizado viene en tambos de 200 litros de capacidad, proviniendo directamente del banco de material sin un proceso de selección ni tratamiento. En la fotografía 1 se aprecia el envío de material.



Fotografía 1 Disposición de material tal cual viene de banco de material. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

Como primer paso, este material pasa por un proceso de cribado manual, utilizando una malla de 2" para retirar todo el material con sobre tamaño para facilitar posteriormente su cribado con una malla más fina. En la fotografía 2 se muestra un material de excepcional tamaño proveniente de un tambo de suelo.

Una vez retirado el sobre tamaño, el material restante es pasado por una malla #4, como se muestra en la fotografía 3, para conservar solo el material que pasa dicha malla y desechando el material que es retenido por está.

Esta es la primera actividad que realizaba yo cuando llegaba un material de nueva procedencia, en el caso de que lo necesitará debido a que había algunos materiales en las que no era necesario hacer el cribado inicial ya que el tamaño presente de las partículas pasaba la malla #4.

El material que pasó la malla se mete a un horno para eliminar la humedad natural que pueda contener el suelo, esta actividad la realizaba inmediatamente después de haber cribado el material para tener el material listo lo más antes posible.

Cuando el material está totalmente seco, lo cual se comprueba colocando una placa de vidrio sobre el material caliente y si este no empaña el vidrio significa que ya no posee agua, se procede a guardarse en cubetas de 19 litros bien selladas para evitar que el suelo seco pueda absorber humedad del ambiente. Este será el material que se va a utilizar para las pruebas y elaboración de especímenes del proyecto de suelo cemento.

La comprobación de que el material ya no posee agua la hacía aproximadamente 24 horas después de haber metido el material al horno.



Fotografía 2 Retiro de material de sobre tamaño. (Fotografía tomada por el autor, 2016).



Fotografía 3 Cribado de material final. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

VI Pruebas básicas

VI.I Determinación de materia orgánica

Para obtener el contenido de materia orgánica presente en el suelo, que puede influir en la resistencia a compresión del suelo cemento, se utiliza la Norma Mexicana NMX-C-088-1997-ONNCCE Agregados, Determinación de impurezas orgánicas. Dicha prueba se utiliza para la determinación aproximada de presencia de materia orgánica dañina en agregados finos.

El procedimiento que yo realizaba para esta prueba es el siguiente:²¹

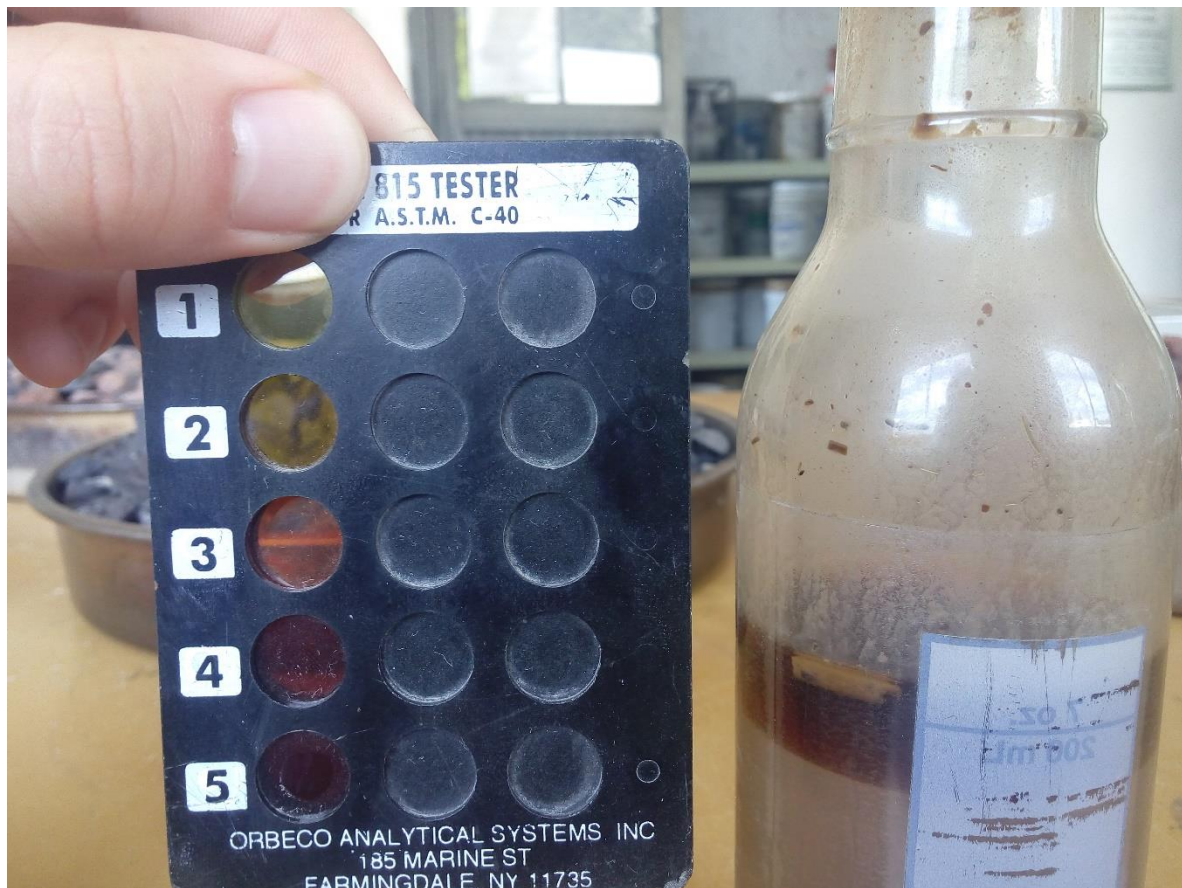
Se criba una parte de material seco por la malla #40 para obtener el agregado fino de la muestra. Seguido de esto se prepara una solución de hidróxido de sodio (sosa cáustica) al 3%. Esta solución se prepara disolviendo tres partes en masa de hidróxido de sodio en 97 partes en masa de agua destilada, dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico concentrado con una densidad de 1.84.

Después Se introduce la muestra seca de agregado fino en una botella de vidrio transparente, incolora, graduada cada 10 cm^3 (recordando que 1 cm^3 equivale a 1 ml) con capacidad de 220 cm^3 , de boca ancha, provistas de tapón de hule, de plástico o de vidrio, que logren un cierre hermético, hasta la marca de 130 cm^3 . Se agrega la solución al 3% de hidróxido de sodio hasta

²¹ Norma Mexicana NMX-C-088-1997-ONNCCE Agregados, Determinación de impurezas orgánicas.

que el volumen del agregado y de la solución se aproxime a 200 cm^3 ; después de agitarse vigorosamente, se completan los 200 cm^3 . Se tapa la botella y se deja reposar 24 h.

Después de este tiempo de reposo, se determina el color de la solución que queda sobre el agregado. Para definir con mayor aproximación la coloración del líquido de la muestra de prueba al final del tiempo de reposo, se compara con la tabla de colores patrón o con el juego de vidrios con coloraciones patrón, señalando entre cuáles de ellas se halla o con cual coincide, como se muestra en la fotografía 4 en la cual se aprecia una prueba que realicé a un suelo proveniente de Sonora que al final fue descartado para su utilización posterior debido a que presentaba una fuerte contaminación y no era apto ni conveniente para ser estudiado.



Fotografía 4 Determinación de la coloración en la prueba de contenido de materia orgánica, se aprecia que tiene un color número 4. Suelo proveniente de Sonora. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

Si el color del líquido que está sobre el agregado es más oscuro que el color normalizado número 3, puede considerarse que el agregado bajo prueba contiene compuestos orgánicos en

cantidades perjudiciales y se analiza si se rechaza o puede utilizarse el suelo para los fines del proyecto.

VI.II Límites de consistencia

Los límites de consistencia incluyen el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción lineal. Estos límites yo me encargaba de obtenerlos con el procedimiento que se describe a continuación.

VI.II.I Límite líquido

Si el suelo en estudio presenta condiciones cualitativas de que es apto para seguir haciéndole pruebas, se procede a realizar un estudio más cuantitativo. En este caso lo siguiente que realizaba era obtener los límites de consistencia del suelo, primeramente, comenzaba con el límite líquido.

Esta prueba, junto con el límite plástico, era de las que más tiempo me llevaba realizar debido en un inició a la falta de destreza para determinar el punto en el que el suelo se encuentra en dichos estados por lo que tuve que hacer bastantes veces la prueba para poder llegar al punto exacto en donde el suelo presentaba las características correspondientes al límite líquido, y plástico en su caso.

La importancia de esta prueba es obtener el límite líquido, para que junto con el límite plástico se calculara el índice de plasticidad y con este, y mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), se obtuviera la caracterización del suelo, esto es, obtener la clasificación del suelo. En la tabla 6, al final de la sección de la prueba de límite de contracción (página 28 de este documento), se presentan resultados parciales obtenidos de distintos materiales en los que se muestran los valores de los límites líquidos, de plasticidad y contracción, así como el cálculo del índice de plasticidad y la humedad óptima obtenida, la cual se detalla en otro apartado.

Para la realización de esta prueba se utiliza una copa de Casagrande con las características mostradas en la figura 2, así como una muestra de suelo que será cribada según el procedimiento que se describe a continuación:²²

²² Libro NMP. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales, parte 1 Suelos y Materiales para Terracerías. Título 7 Límites de consistencia. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Según el procedimiento indicado en el Manual M-MMP 1-03 Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, de la muestra del material se aparta una porción de tamaño tal que, una vez cribada en forma manual por la malla número #40, se obtengan aproximadamente 300 g del material que pase esa malla y éste se coloca en una charola; después se separan aproximadamente 250 g del material, se obtiene y se registra la masa del material separado, con aproximación de 0.01 g.

Se coloca el material separado en un recipiente apropiado, se le agrega el agua necesaria para saturar el material y se deja en reposo durante aproximadamente 24 h, en un lugar fresco, cubriendo el recipiente con un paño que se mantendrá húmedo a fin de reducir al mínimo la pérdida de agua por evaporación.

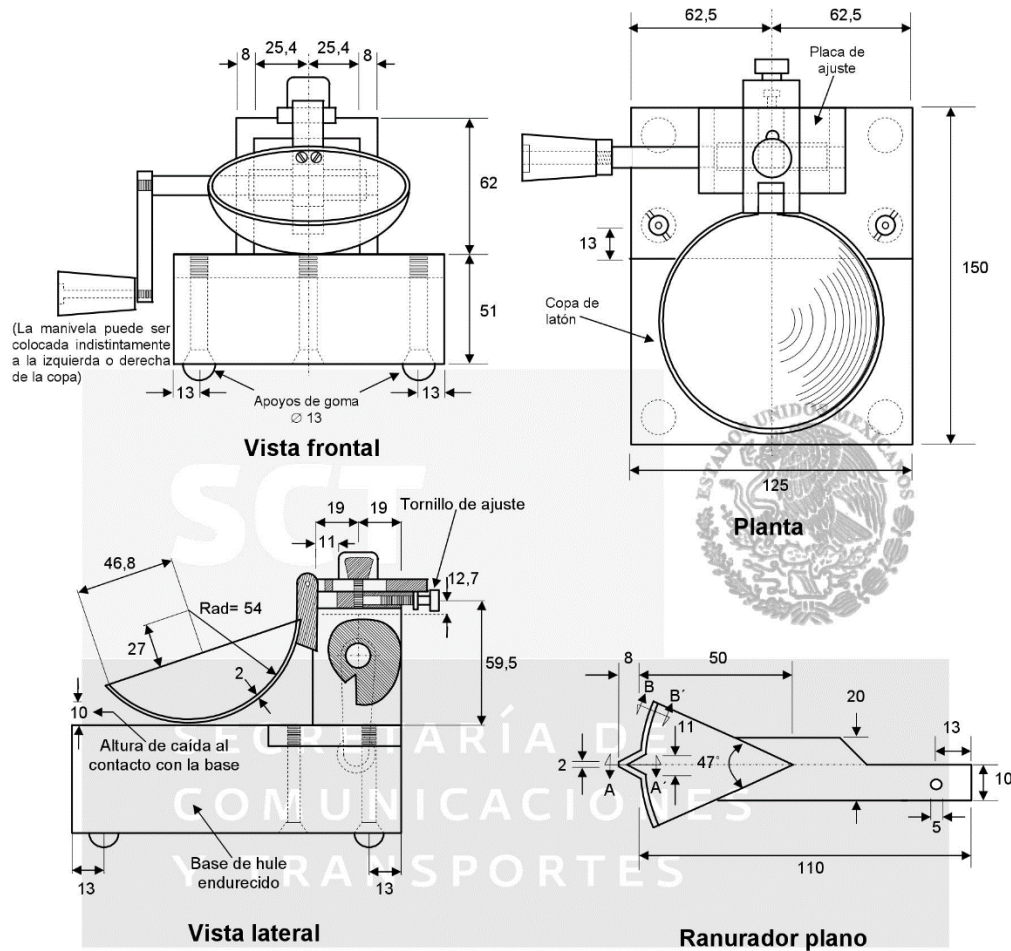


Figura 2 Características de la Copa de Casagrande. Obtenido del libro NMP. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales, parte 1 Suelos y Materiales para Terracerías. Título 7 Límites de consistencia. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

De la fracción del material preparada, se toma una porción de aproximadamente 150 g que se coloca en la cápsula de porcelana donde se homogeneiza utilizando una espátula de acero inoxidable, de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho, con punta redonda.

En la copa de Casagrande, se coloca una cantidad suficiente de material para que, una vez extendido con la espátula, se alcance un espesor de 8 a 10 mm en la parte central de la copa. Es conveniente poner una cantidad ligeramente mayor y eliminar el sobrante al enrasarlo con la espátula. Después mediante una pasada firme del ranurador se hace una abertura en la parte central del material contenido en la copa, como se muestra en la fotografía 5.

Inmediatamente después de colocado y ranurado el material, se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa a razón de dos golpes por segundo, y se registra el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm.



Fotografía 5 Formación de la ranura para la determinación del límite líquido en una muestra de suelo proveniente de Guanajuato. (Fotografía tomada por el autor, 2015).

Logrado lo anterior se toman con la espátula aproximadamente 10 g de material de la porción cerrada de la ranura y se determina su contenido de agua. Una vez que se ha tomado la porción requerida para la determinación del contenido de agua, el material restante se reintegra a la cápsula de mezclado, para lavar y secar la copa y el ranurador.

Todo el procedimiento mencionado se repite hasta completar cuatro determinaciones. La cantidad de agua que se adicione al material será tal que las cuatro determinaciones queden comprendidas entre 10 y 35 golpes en la copa de Casagrande, siendo necesario obtener dos valores por arriba y dos por abajo de los 25 golpes.

El porcentaje de humedad, al conocer este límite se determina de la siguiente forma:

$$\%H_{LL} = \left(\frac{W_h - W_s}{W_s - W_v} \right) \times 100$$

Donde:

$\%H_{LL}$: Contenido de agua cuando se ha encontrado el límite líquido, en %

Wh: Masa de la muestra húmeda más el vidrio de reloj, en g

Ws: Masa de la muestra seca más el vidrio de reloj, en g

Wv: Masa del vidrio vacío, en g

VI.II.II Límite plástico²³

Como se mencionó anteriormente, esta prueba nos sirve para obtener, junto con el límite líquido, el índice de plasticidad y con esto obtener la clasificación del suelo.

Al realizar esta prueba, tuve que aprender a ser muy cuidadoso y paciente ya que en muchos casos los rollitos de suelo que estaba haciendo terminaban por romperse, lo cual puede resultar ser un poco frustrante si no se tiene la habilidad necesaria para poder hacerlos. No es un secreto que esta prueba requiere de más maña que fuerza, por lo que tuve que desarrollar las habilidades necesarias para poder lograr formar los rollitos con el tamaño y espesor necesario para cumplir con lo que establece la norma.

En la tabla 6, al final de la sección de la prueba de límite de contracción (página 28), se presentan resultados parciales obtenidos de distintos materiales en los que se muestran los valores de los límites líquidos, de plasticidad y contracción, así como el cálculo del índice de plasticidad y la humedad óptima calculada, la cual se detalla en otro apartado.

El equipo necesario para efectuar esta prueba es una balanza, horno, desecador, cápsulas de porcelana, espátula, vidrios de reloj y placa de vidrio.

De la fracción del material preparada de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·1·01, Muestreo de Materiales para Terracerías, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, se toma una porción de tamaño tal que se pueda formar una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, la que se moldea con los dedos para que pierda agua y se manipula sobre la palma de la mano para formar un cilindro.

A continuación, el cilindro se hace girar con los dedos de las manos sobre la placa de vidrio para reducir su diámetro hasta que sea aproximadamente de 3 mm en toda su longitud. La

²³ Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003). Métodos de muestreo y prueba de materiales, parte 1. Suelos y materiales para terracerías. Límites de consistencia.

velocidad de girado será de 60 a 80 ciclos por minuto, entendiéndose por "ciclo" un movimiento de la mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición de partida.

Si al alcanzar un diámetro de 3 mm el cilindro no se rompe en tres secciones simultáneamente, significa que su contenido de agua es superior al del límite plástico. En tal caso se junta nuevamente todo el material para formar la pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar su pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma, repitiendo el procedimiento descrito anteriormente, hasta que el cilindro se rompa tres segmentos precisamente en el momento de alcanzar dicho diámetro, el cual se verifica comparándolo contra el alambre de referencia. En la fotografía 6 se muestra cómo deben de quedar los rollitos.

Inmediatamente se colocan sobre un vidrio de reloj los fragmentos del cilindro y se determina el contenido de agua de ese material, ω_i , de acuerdo con el procedimiento indicado en el Manual M·MMP·1·04, Contenido de Agua. Para mayor seguridad en los resultados, la prueba se efectuará por triplicado, obteniendo para cada una de las determinaciones, el contenido de agua, ω_i .

El porcentaje de humedad, al conocer este límite se calcula de la siguiente forma:

$$\%LP = \left(\frac{W_h - W_s}{W_s - W_v} \right) \times 100$$

Donde:

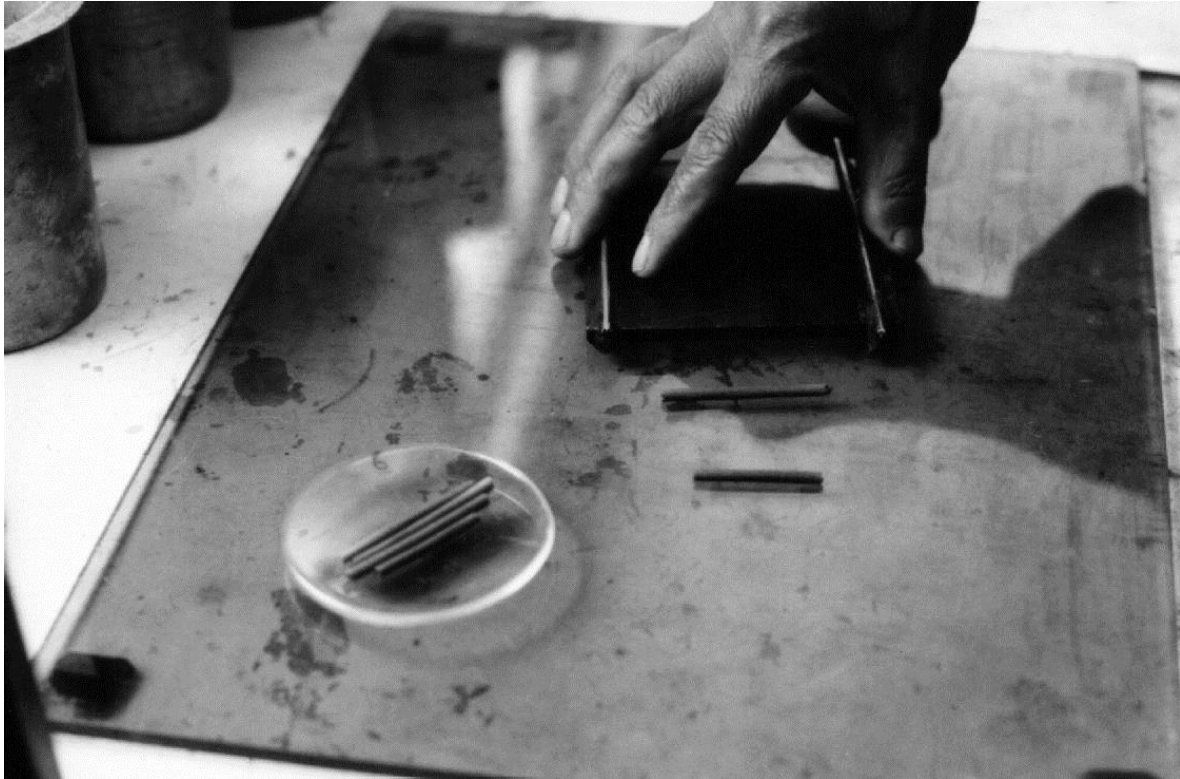
%LP: Contenido de agua definido como el estado de límite plástico, en %

Wh: Masa promedio de las muestras húmedas más el vidrio de reloj, en g

Ws: Masa promedio de las muestras secas más el vidrio de reloj, en g

Wv: Masa del vidrio vacío, en g

Cuando el material sea muy arenoso y no pueda determinarse el límite plástico, se reportan el límite plástico y el índice plástico como NP (no plástico).



Fotografía 6 Elaboración de los rollitos para obtención del límite plástico. Obtenido de Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003), *Métodos de muestreo y prueba de materiales, parte 1. Suelos y materiales para terracerías. Límites de consistencia.*

VI.II.III Límite de contracción²⁴

Se define como la reducción en mayor dimensión de un espécimen en forma prismática rectangular, elaborado con la fracción de suelo que pasa la malla #40 (0.425 mm), cuando su contenido de agua disminuye del correspondiente límite líquido hasta la pérdida total de agua, expresada dicha reducción como un porcentaje de la longitud inicial del espécimen.

Para la ejecución de esta prueba se deberá emplear material que se encuentre en el límite líquido (obtenido en el golpe 25) aprovechando siempre el material de la prueba de límites de consistencias.

Con el material preparado en las condiciones indicadas se procede a llenar el molde de prueba, al cual se le aplico previamente una capa delgada de grasa en su interior para evitar que el material se adhiera a sus paredes. El llenado del molde se efectúa en tres capas, utilizando la

²⁴ NMX-C-416-ONNCCE-2003. Industria de la Construcción, Muestreo de Estructuras Térreas y Métodos de Prueba. (Capítulos 6 y 7)

espátula y golpeándolo después de la colocación de cada capa contra una superficie dura; para esto último, se debe tomar el molde por sus extremos, procurando siempre que el impacto lo reciba en toda su base, lo cual se logra conservando su paralelismo entre dicha base y la superficie sobre la cual se golpea.

En cada caso las operaciones de golpeo deben prolongarse lo suficiente para lograr la expulsión del aire contenido en el material colocado, lo que se pone de manifiesto cuando ya no aparecen burbujas en su superficie.

A continuación, se enrasa el material en el molde utilizando la espátula y se deja orear a la sombra hasta que cambie ligeramente su color, después de lo cual se coloca dentro del horno para su secado por un período de $20 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$, a una temperatura constante de $383 \text{ K} \pm 5 \text{ K}$ ($110 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$) una vez seco y frío, se extrae del horno el molde con el espécimen y a continuación se saca la barra del molde.

Finalmente, se mide con el calibrador la longitud media de la barra del material seco y la longitud interior del molde con aproximación de 0.1 mm.



Fotografía 7 Resultado de barras de contracción lineal después de 24 horas de secado. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

La contracción lineal se calcula de la siguiente forma:

$$CL = \left(\frac{Li - Lf}{Li} \right) \times 100$$

Donde:

CL: Contracción lineal, en %

Li: Lectura inicial de la barra, largo del molde, en mm

Lf: Lectura final de la barra de material, en mm

Todas estas pruebas que estuve realizando durante mi estancia en CEMEX, tienen como finalidad obtener la caracterización del suelo, ya que es muy importante conocer el tipo de suelo con el que se va a estar trabajando ya que esto nos da información muy útil sobre si dicho suelo va a presentar problemas con su uso o si va a resultar benéfico para ser utilizado como elemento del suelo-cemento.

En la tabla 6 se presentan algunos resultados de algunas muestras, los cuales con ayuda del límite líquido y el límite plástico se calculó el índice de plasticidad y con esto se obtuvo su clasificación SUCS. También es importante ver que la contracción lineal es alta, lo que conllevó a que el suelo presentará agrietamientos, los cuales se redujeron añadiendo cemento y algunos aditivos.

Prueba	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Límite Líquido	37.68%	76.57%	68.00%
Límite Plástico	18.09%	47.45%	23.92%
Contracción Lineal	8.24%	14.73%	1.80%
Índice de Plasticidad	19.59%	29.12%	44.08%
Clasificación SUCS	CL	CH	CH
Humedad Optima	10%	15.60%	15.50%

Tabla 6 Resultados obtenidos de distintos materiales, los cuales sirven para obtener la clasificación SUCS. Obtenido de Samantha Mendoza Acero, CTCC.

VI.III Determinación de la cantidad de cal óptima para estabilización²⁵

Esta prueba que realicé, fue con ayuda del laboratorio químico, ya que ellos poseen los equipos necesarios para hacer las lecturas de pH además de que todo lo que tenga que ver con sustancias químicas ellos lo manejan.

La finalidad de esta prueba es obtener el porcentaje de cal, con respecto al peso de suelo seco, que logran que un suelo con malas propiedades para ser utilizado en alguna obra de ingeniería se convierta en un suelo con mejores características, o por lo menos las mínimas necesarias, para ser utilizado eficientemente. Ese es el objetivo que tenía que alcanzar al realizar esta prueba, obtener un porcentaje de cal añadida tal que el suelo se mejore, además de que resulte ser la menor cantidad posible ya que si se sigue añadiendo cal se logra el mismo resultado, sin una mejoría notable y hasta puede resultar contraproducente, por lo que hay que tratar que esto sea económicamente factible y operativamente sencillo de manejar.

Muestra 1		Muestra 2	
% Cal	pH	% Cal	pH
0	9.56	0	8.27
2%	12.21	2%	12.26
3%	12.26	3%	12.33
4%	12.30	4%	12.37
5%	12.30	5%	12.40
6%	12.30	6%	12.40
pH Cal sola		12.43	

Tabla 7 Resultados de la prueba de contenido óptimo de cal para estabilización. Obtenido de laboratorio químico, CTCC.

²⁵ ASTM D6276. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization

El porcentaje encontrado será el que se utilice para la elaboración de los especímenes futuros, que serán ensayados a compresión, permeabilidad, abrasión, módulo elástico y absorción capilar, por lo que es importante que la prueba se realice correctamente.

En la tabla 7 se observan resultados obtenidos de una prueba que realicé para dos tipos de suelos diferentes, que corresponden a arcillas, se aprecia que para el suelo 1 el valor óptimo de estabilización corresponde al 4% y para el suelo 2 corresponde el valor de 5%. Dichos valores se seleccionan de acuerdo al procedimiento que establece la norma ASTM D6276: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, la cual se explica a continuación:

Los pasos resumidos de esta norma son los siguientes:

- Verificar que el material que pasa por la malla 40 esté completamente seco.
- Pesar 25 g del material seco y cribado que se quiere estabilizar y colocarlo en una botella de plástico de 150 ml con tapa.
- Pesar lo correspondiente a 2%, 3%, 4%, 5% y 6% de cal con respecto a los 25 g de suelo.
- Mezclar el suelo, el porcentaje de cal pesado y 100 ml de agua destilada.
- Se deben mezclar cada una de estas combinaciones por 30 segundos cada 10 minutos durante 1 h.
- Pasando la hora, se debe tomar la lectura de pH con un potenciómetro calibrado en un máximo de 15 minutos.

El menor porcentaje de cal en el suelo que de un pH de 12.4 es el porcentaje aproximado de cal para estabilizar el suelo.

Puede haber algunos suelos en los que el pH sea mayor que 12.4. Si esto ocurre, se selecciona el porcentaje más bajo de cal en el cual un valor de pH más alto no aumenta durante al menos dos pruebas sucesivas incrementando el porcentaje de cal. Si el pH medido más alto es 12.3 o menos, entonces muestras de prueba adicionales con porcentajes más altos de cal son preparados y probadas.



Fotografía 8 Mezcla de suelo, cal y agua destilada para la prueba de determinación de contenido óptimo de cal para estabilización. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

Puede haber algunos suelos donde el pH de la mezcla de suelo-cal no excederá de 12.3. Se cree que este fenómeno se produce con suelo (es decir, arcillas) que contiene iones univalentes como el sodio en posiciones cambiadas. Cuando estos iones se intercambian con iones de calcio de la cal, el electrodo de pH se vuelve sensible a los iones de sodio, así como a los iones de hidrógeno.

Si el pH medido más alto es 12.3 y al menos dos ejemplares sucesivos a porcentajes de cal crecientes se mantiene en 12.3, el porcentaje más bajo de cal para dar un pH de 12.3 es el porcentaje óptimo de cal ideal para estabilizar el suelo.

Si el pH medido más alto es menor que 12.3, el ensayo es inválido debido a un error de equipo o de material o una insuficiencia de cal añadida. En este caso se comprueba el pH del electrodo en el pH 12 con una solución patrón y la solución de cal-agua para el posible error del equipo o repetir la prueba utilizando porcentajes más altos de cal, o ambos.

VI.IV Contenido de humedad mediante Proctor modificado²⁶

Cada que un material de nueva procedencia llegaba para ser estudiado, yo me encargaba de obtener el contenido de agua óptimo para compactación ya que este valor es utilizado como agua de diseño para elaborar los distintos especímenes para ser ensayados posteriormente en las pruebas de ensayo descritas más adelante.

²⁶ ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).

Por cada tipo de suelo me encargaba de hacer por lo menos 5 muestras, cada una con contenido de humedad diferente para poder formar la curva de compactación. Esta etapa es fundamental y determinante para el proyecto de suelo-cemento, ya que determina el agua que será añadida al suelo para poder compactarlo y tener la densidad máxima, lo que proporciona un comportamiento mecánico muy eficiente y permite utilizar el suelo-cemento de manera más adecuada, haciendo uso de todas sus virtudes.

En la figura 5 se muestra el resultado de una prueba realizada por mí, de un suelo proveniente de León Guanajuato, esta gráfica la muestro debido a que se observa claramente las dos ramas de la curva, una rama húmeda y una rama seca, divididas por un punto de inflexión.

Para que yo pudiera realizar esta prueba, utilizaba el material que había secado en el horno y que estaba cribado con anterioridad, por lo que es importante que el material estuviera listo y en cantidad suficiente para poder hacer esta, y las demás pruebas. Sólo para recalcar el material debe estar completamente seco para que los valores obtenidos sean lo más fieles posibles a la realidad.

Para el desarrollo de esta prueba se hace uso de la norma ASTM D1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), conocida mejor solamente como Proctor Modificado. El procedimiento es el siguiente:

Se coloca una muestra de suelo con un contenido de agua seleccionado, en cinco capas, en un molde de dimensiones dadas, y cada capa se compacta con 25 o 56 golpes de un martillo de 44.5N (10lb) que se deja caer desde una distancia de 457 mm (18") dándole al suelo un esfuerzo de compactación total de alrededor de 2700 kNm/m³.

Se determina el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite para un número suficiente de contenidos de agua para establecer una relación entre el contenido de agua para el suelo y el peso unitario seco. Al graficar estos datos resulta una relación curvilínea conocida como la curva de compactación. Los valores del contenido óptimo de agua y el peso unitario seco máximo se determinan de la curva de compactación.

Para esta prueba existen tres variantes, las cuales se describen a continuación:

Procedimiento A

- Se utiliza molde de 101.6 mm (4”) de diámetro
- Material: pasa el tamiz 4.75 mm (#4)
- Número de capas: 5
- Número de golpes por capa: 25
- Uso: puede seguirse si el 20% o menos por peso del material es retenido sobre el tamiz 4.75 mm (#4)

Nota: Si este procedimiento no está especificado por el cliente, los materiales que cumplen estos requerimientos de gradación pueden ser ensayados utilizando los procedimientos B o C.

Procedimiento B

- Se utiliza molde de 101.6 mm (4”) de diámetro
- Material: pasa el tamiz 9.5 mm (3/8”)
- Número de capas: 5
- Número de golpes por capa: 25
- Uso: se sigue si más del 20% por peso del material queda retenido en el tamiz 4.75 mm (#4) y el 20% o menos por peso del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm (3/8”)

Nota: Si este procedimiento no está especificado por el cliente, los materiales que cumplen estos requerimientos de gradación pueden ser ensayados utilizando el procedimiento C.

Procedimiento C

- Se utiliza molde de 152.4 mm (6”) de diámetro
- Material: pasa el tamiz de 19 mm (3/4”)
- Número de capas: 5
- Número de golpes por capa: 56

- Uso: debe seguirse si más del 20% por peso del material queda retenido en el tamiz de 9.5mm (3/8") y menos del 30% por peso del material queda retenido sobre el tamiz de 19 mm (3/4")

Nota: El molde de 152.4 mm (6") de diámetro no debe ser usado con el procedimiento A o B

Se ha encontrado que los resultados varían ligeramente cuando un material se ensaya con el mismo esfuerzo de compactación en diferentes tamaños de molde.

El molde de 4" es un molde que tiene 101.6 ± 0.4 mm (4" ± 0.016) de promedio de diámetro interior, una altura de 116.4 ± 0.5 mm (4.584 ± 0.018 ") y un volumen de 944 ± 14 cm³. En la figura 3 se muestra un molde con las características mínimas requeridas.

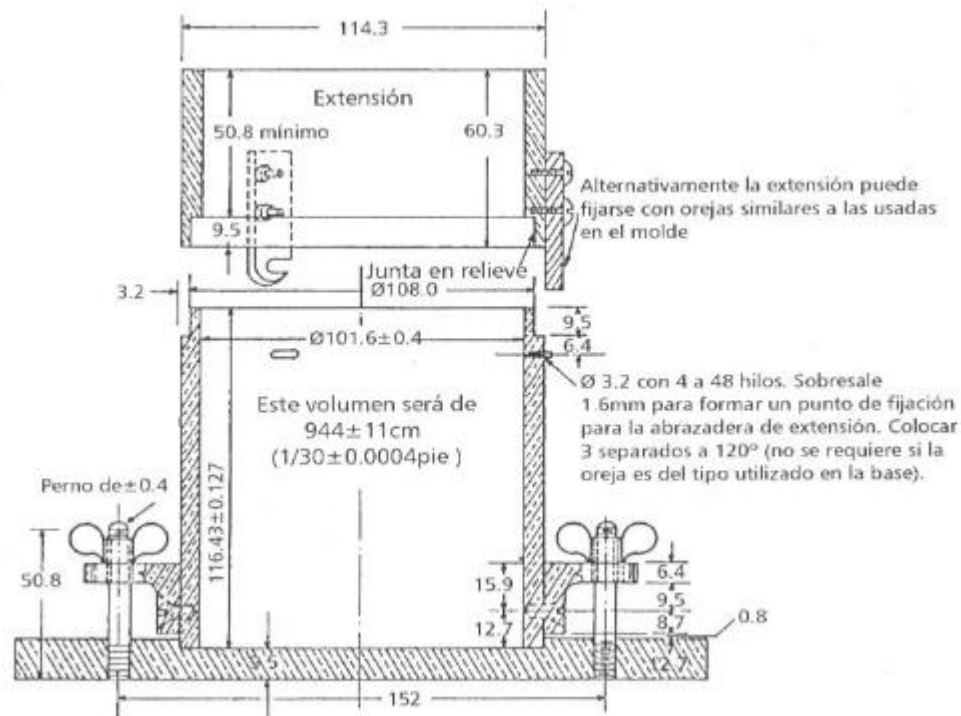


Figura 3 Características mínimas requeridas para el molde de 4". Obtenido de ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).

El molde de 6" es un molde con un diámetro interior promedio de $152.4 \pm 0.7\text{mm}$ ($6 \pm 0.026''$), una altura de $116.4 \pm 0.5\text{mm}$ ($4.584 \pm 0.018''$) y un volumen de $2124 \pm 25\text{cm}^3$. En la figura 4 se muestra un molde con las características mínimas requeridas.

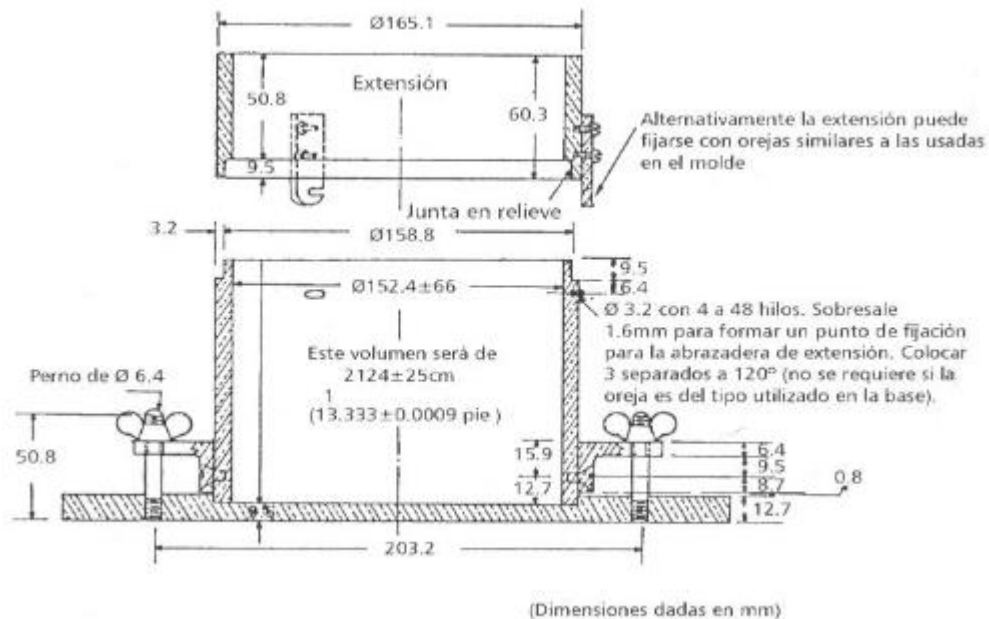


Figura 4 Características mínimas requeridas para el molde de 6". Obtenido de ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort ($56,000 \text{ ft-lbf/ft}^3$ ($2,700 \text{ kN-m/m}^3$)).

El martillo de compactación puede ser de tres tipos:

- a) Martillo manual: El martillo será equipado con una guía tubular que tenga un espacio anular suficiente para que no quede restringida la caída libre del martillo y el eje. La guía tubular tendrá por lo menos 4 agujeros de venteo en cada extremo (8 agujeros en total) localizados con centros a $19 \pm 1.6 \text{ mm}$ ($3/4 \pm 1/16''$) de cada extremo y espaciados a 90° . El diámetro mínimo de los agujeros de venteo será de 9.5 mm ($3/8''$). Puede incorporarse agujeros o ranuras adicionales en la guía tubular.
- b) Martillo mecánico con base circular: Este martillo debe ser operado de tal manera que suministre una cobertura completa y uniforme de la superficie de la muestra. Tendrá un juego de $2.5 \pm 0.8 \text{ mm}$ ($0.10 \pm 0.03''$) entre el martillo y la superficie interior del molde en su diámetro interior. El martillo mecánico debe cumplir las especificaciones

de calibración de la norma ASTM D2168, y estar equipado con un dispositivo para mantener fija la masa cuando no se encuentre en operación.

- c) Martillo mecánico con base de sector circular: Cuando se utilice el molde de 152.4 mm (6") puede utilizarse un martillo de base de sector circular en lugar del martillo de base circular. La base en contacto con la muestra tendrá la forma de un sector circular de radio igual a 73.7 ± 0.5 mm (2.9 ± 0.02 "). El martillo debe ser operado de tal manera el vértice del sector quede colocado en el centro de la muestra.



Fotografía 9 Martillo Proctor manual (fotografía tomada por el autor, 2016).

La masa de muestra requerida para los procedimientos A y B es aproximadamente 16 kg (35 lb) y para el procedimiento C es aproximadamente 29 kg (65 lb) de suelo seco, en consecuencia, la muestra de campo debe tener una masa húmeda de por lo menos 23 kg (50 lb) y 45 kg (100 lb) respectivamente.

Se determina el porcentaje de material retenido en los tamices 4.75 mm (#4), 9.5 mm (3/8") o 19 mm (3/4"), para seleccionar uno de los procedimientos A, B o C.



Fotografía 10 Martillo Proctor Automático. (Fotografía tomada por el autor, 2015).

Cuando se esté trabajando con suelos que contienen halloysita hidratada o cuando lo indique la experiencia con un tipo particular de suelo que los resultados pueden ser alterados por secado al aire, como es el caso de las cenizas volcánicas, se usa el método de preparación en húmedo.

El procedimiento del método de preparación en húmedo es el siguiente:

Sin secar previamente la muestra, se pasa través de un tamiz #4 (4.75 mm), 3/8" (9.5 mm) o 3/4" (19 mm), dependiendo del procedimiento (A, B o C) que vaya a ser utilizado.

Se determina el contenido de agua del suelo tamizado.

Se preparan cuatro, o preferiblemente cinco, muestras cuyo contenido de agua comprenda el contenido de agua óptimo estimado. Debe prepararse una muestra con un contenido de agua cercano al óptimo por adiciones de agua al tanteo y mezclado. Se seleccionan los contenidos de agua para el resto de las muestras de manera que varíen alrededor del 2% y se tengan por lo menos dos muestras más húmedas, y dos muestras más secas que el óptimo.

Son por lo menos necesarios dos contenidos de agua en la rama seca y en la rama húmeda del óptimo para definir correctamente la curva de compactación de peso unitario seco. Algunos suelos con un contenido de agua óptimo muy alto o con una curva de compactación muy plana, pueden requerir incrementos de agua mayores para obtener un peso unitario seco máximo bien definido. Las adiciones de contenido de agua no deben exceder el 4%.

En la práctica es posible definir visualmente un punto cerca del contenido de agua óptimo que normalmente es ligeramente menor que el límite plástico. Típicamente un suelo en el contenido de agua óptimo forma un terrón cuando se aprieta en la mano, y mantiene su forma cuando se disminuye la presión de la mano, pero se rompe nítidamente en dos secciones cuando se trata de doblar.

A contenidos de agua menores o más secos que el óptimo, los suelos tienden a desmoronarse; y cuando los suelos están más húmedos que el óptimo tiende a mantener su forma en una masa cohesiva.

El procedimiento del método de preparación en seco es el siguiente:

Si la mezcla está muy húmeda, al punto que no puede desintegrarse fácilmente con las manos, se reduce el contenido de agua por secado al aire hasta que el material sea friable. El secado puede hacerse en el aire o con el uso de un aparato secador tal que la temperatura de la muestra no exceda los 60 °C. Se rompen completamente los agregados sin romper las partículas individuales.

Se pasa el material a través de la malla adecuada: 4.75 mm (#4), 9.5 mm (3/8") o 19 mm (3/4"). Cuando se prepare el material pasándolo por el tamiz de 9.5 mm y para la compactación en el molde de 6", desintegre los agregados suficientemente, de modo que pasen la malla de 9.5 mm (3/8") para facilitar la distribución del agua a través del suelo en el mezclado posterior.

Se preparan por lo menos cuatro muestras, preferiblemente cinco. Se agrega el agua necesaria para llevar los contenidos de agua de las muestras hasta los valores seleccionados (dos contenidos de agua en la rama seca y dos en la rama húmeda).

Compactación

Se compacta el espécimen en cinco capas, después de la compactación todas las capas deben quedar aproximadamente iguales en espesor. Antes de la compactación se coloca el suelo suelto en el molde y es esparcido en una capa de espesor uniforme. Se aprieta ligeramente el suelo antes de la compactación, utilizando el martillo de compactación manual o un cilindro de 50 mm de diámetro, hasta que no esté en un estado suelto o esponjado.

Al terminar la compactación de cada una de las primeras cuatro capas, debe retirarse cualquier cantidad de suelo adyacente a las paredes del molde que no ha sido compactado o que se extienda por encima de la superficie compactada. El suelo que se retira puede ser incluido en la capa siguiente; para ello puede utilizarse un cuchillo u otro instrumento adecuado.

La cantidad total de suelo utilizado debe ser tal que la quinta capa compactada llegue hasta el collar, pero no exceda 6 mm (1/4") por encima del borde superior del molde. Si la quinta capa compactada se extiende más de 6 mm (1/4") por encima del borde superior del molde, la muestra debe ser descartada.

La muestra debe ser descartada cuando el último golpe del martillo en la compactación de la quinta capa da lugar a que la base del martillo quede por debajo del borde superior del molde de compactación.

Se compacta cada capa con 25 golpes para el molde de 104.6 mm (4") o con 56 golpes para el molde de 152.4 mm (6").

Se remueve el material del molde y se determina el contenido de agua utilizando la muestra completa (método preferido) o una porción representativa de ella. Cuando se usa toda la muestra, se desintegra para facilitar el secado. Si se trata de obtener una porción representativa, corte la muestra compactada axialmente a través del centro y remueva aproximadamente 500 gr de material de las caras cortadas.

Se calcula el peso unitario seco y el contenido de agua de cada muestra compactada, para poder graficar los valores y dibujar la curva de compactación como una curva suave a través de los puntos (figura 5).

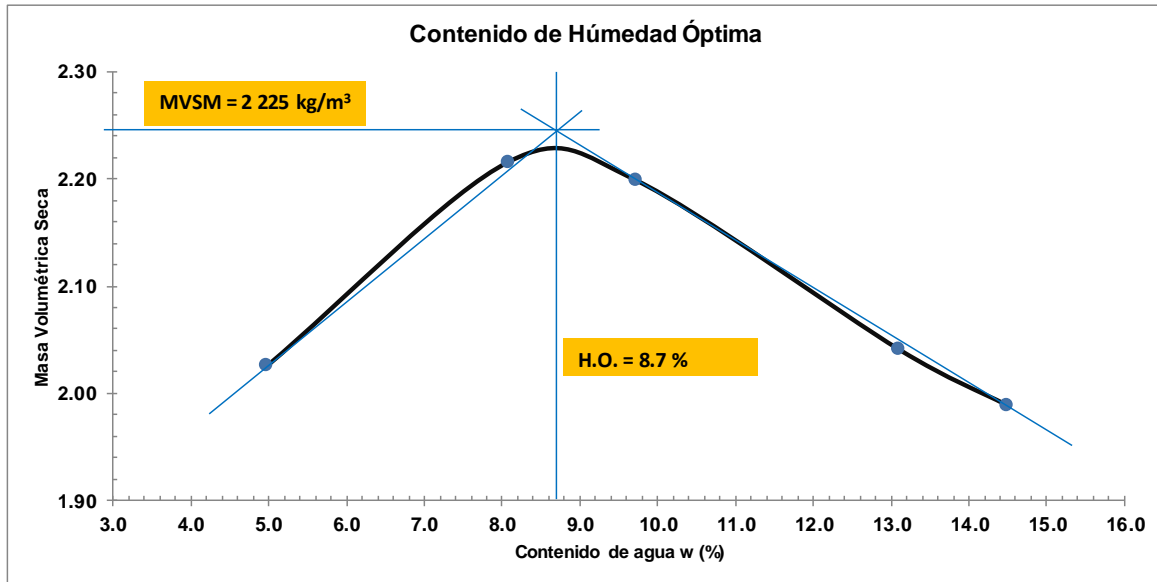


Figura 5 Ejemplo de la curva de compactación, obtenida de un suelo proveniente de Guanajuato. Obtenido de laboratorio de agregados, CTCC.

La densidad húmeda se calcula como sigue:

$$\rho_m = \frac{1000(M_1 - M_2)}{V}$$

Donde,

ρ_m : densidad húmeda de la muestra compactada, kg/m³

M_1 : masa del espécimen húmedo y el molde, kg

M_2 : Masa del molde de compactación, kg

V : volumen del molde de compactación, cm³

La densidad seca se obtiene con la siguiente expresión:

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)}$$

Donde,

ρ_d : densidad seca de la muestra compactada, kg/m^3

w: contenido de agua, %

El peso unitario seco se obtiene como sigue:

$$\gamma_d = 9.8066\rho_d$$

Donde,

γ_d : peso unitario seco de la muestra compactada, kN/m^3 .

Los errores más comunes que pueden afectar los resultados de estas pruebas son los siguientes:²⁷

- El mezclado incompleto del suelo con el agua o la incompleta destrucción de grumos en el suelo.
- El no repartir uniformemente los golpes del pisón sobre la superficie de la muestra.
- El que las muestras tomadas para determinación del contenido de humedad no sean representativas del material compactado.
- El no determinar el número suficiente de puntos para definir correctamente la curva de compactación.
- El uso continuado de la misma muestra.

VII Elaboración de especímenes

Para la realización de las pruebas de compresión, permeabilidad, abrasión, módulo elástico y absorción capilar se requiere de especímenes cilíndricos con ciertas características. Los especímenes son de tres tipos, el primero de ellos corresponde a los especímenes utilizados para las pruebas de compresión, permeabilidad y módulo elástico, teniendo dimensiones aproximadas de 10 cm de diámetro por 11 cm de altura (fotografía 11).

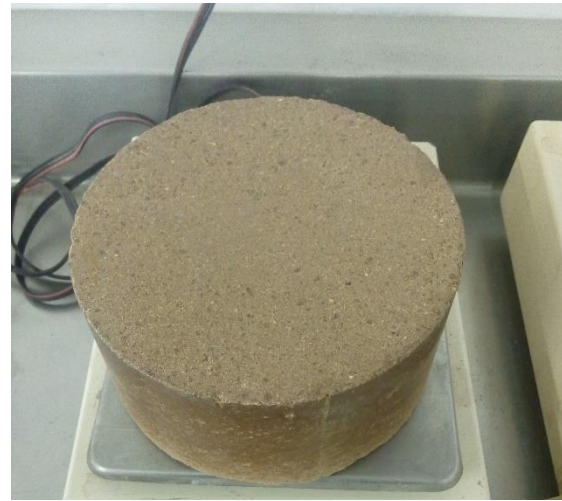
El segundo tipo de especímenes corresponde a los utilizados para la prueba de abrasión, con dimensiones aproximadas de 15 cm de diámetro por 6 cm de alto (fotografía 12). El tercer y último tipo de espécimen, que corresponde a la prueba de absorción capilar, tiene por

²⁷ Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez (1973). Mecánica de suelos, Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos. Limusa. México, pp. 499.

dimensiones 10 cm de diámetro por 5 cm de alto, aproximadamente, siendo exactamente igual que la mitad de un espécimen del primer tipo.



Fotografía 11 *Especimen de 10X11 cm. (fotografía tomada por el autor, 2016).*



Fotografía 12 *Especimen para abrasión. (Fotografía tomada por el autor, 2016).*

Una vez terminada las pruebas básicas, y determinado el agua de diseño con el contenido de agua óptimo de compactación como la prueba Proctor Modificada, así como el porcentaje de cal óptimo para estabilización, yo me encargaba de realizar los especímenes para probar las distintas tecnologías en aditivos y cementos por lo que cada día, de lunes a viernes, realizaba una serie de cilindros de ensaye.

Lo primero que hacía era realizar la mezcla del día, que incluía un cierto peso de suelo con su correspondiente agua de diseño, más un cierto porcentaje de cemento, o de mortero porque también se utilizó, y un cierto porcentaje de aditivo más la cal para estabilización.

Cada día de la semana yo elaboraba una combinación diferente, para ejemplificar un lunes se mezclaba el suelo 1 y se le añadía 5% de cemento, su agua correspondiente y un aditivo particular, el martes se mezclaba el suelo 1 y se le añadía ahora un 10% de cemento más aparte su agua correspondiente y el mismo aditivo del día lunes, ahora para el miércoles se aumentaba el cemento a un 15%, para el jueves no se utilizaba aditivo, el viernes en lugar de cemento se usaba la cal sin aditivo, el siguiente lunes se le añadía aditivo y el siguiente martes

se cambiaba el aditivo y se volvía a repetir hasta alcanzar todas las combinaciones posibles, para tener un amplio repertorio de posibilidades para encontrar la mejor de ellas.

Lo anterior descrito no necesariamente tiene que ver con lo que se hacía, pero sirve claramente para ejemplificar las distintas opciones que yo hacía día a día. Ahora bien, por cada una de estas combinaciones yo elaboraba una serie especímenes para cada tipo de ensayo, hacía dos especímenes para ser ensayados a compresión a 28 días y uno a 7 días, dos especímenes para ser ensayados a abrasión, dos más para la prueba de permeabilidad, otros dos más para absorción capilar y finalmente tres más para obtener el módulo elástico.

Si sumamos lo anterior obtenemos que por combinación yo realizaba 12 especímenes diarios, lo que nos da 84 a la semana y 336 al mes. Aunque no tengo un número exacto de cuantos especímenes elaboré estimo que fueron alrededor de 1200, en números cerrados, considerando todas las combinaciones posibles y todos los suelos que se estuvieron analizando.

Dichos especímenes se realizan en un molde metálico compuesto de una base desarmable con dos guías verticales en donde descansa el cuerpo principal del molde (figura 6 y 7), un anillo con asas y que se abre mediante una bisagra, y finalmente el cuerpo principal del molde que también se abre mediante una bisagra.

Las dimensiones de los moldes están pensadas de tal manera que el cuerpo principal del molde dé como resultado las dimensiones aproximadas de los especímenes mencionados anteriormente. El molde para los especímenes de abrasión presenta características similares al molde presentado en la figura 6 y 7, teniendo como únicas diferencias una dimensión de 15 cm en el diámetro interno del molde y un mayor espesor en las paredes del mismo.

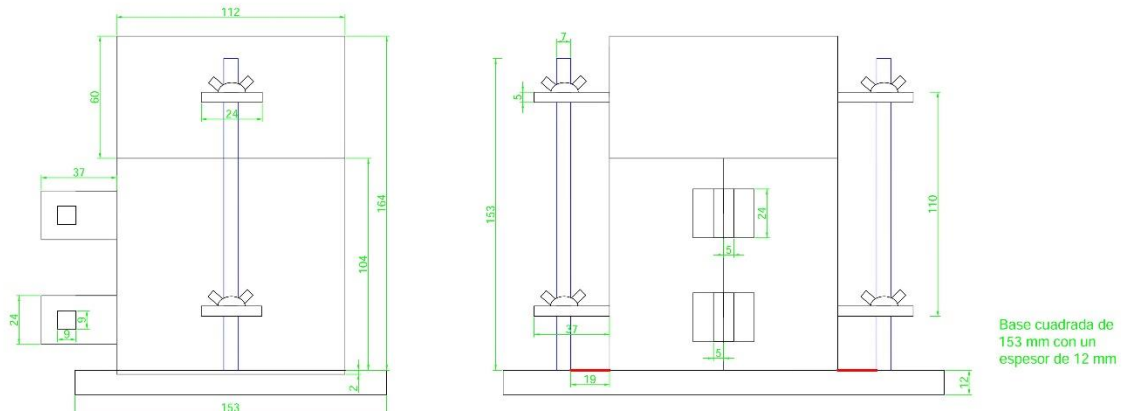


Figura 6 Esquema del molde metálico utilizado para elaboración de especímenes de compresión, módulo elástico, permeabilidad y absorción capilar. (Diseño propio del autor, 2016).

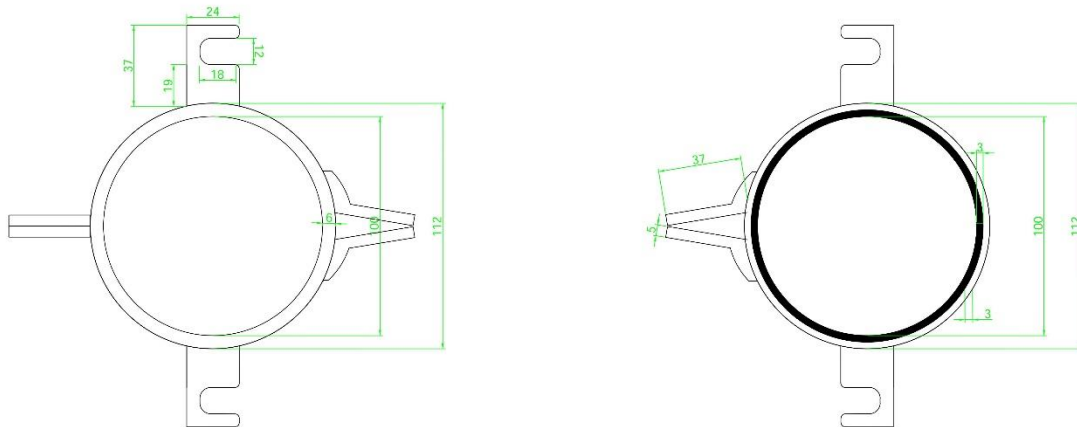


Figura 7 Esquema visto en corte transversal del molde utilizado para elaboración de especímenes de compresión, permeabilidad, módulo elástico y absorción capilar. (Diseño propio del autor, 2016).



Fotografía 13 Molde metálico para elaboración de especímenes de suelo cemento. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

VII.I Realización de la mezcla y llenado de los moldes²⁸

El procedimiento que a continuación explico, corresponde a las actividades que yo realizaba para poder elaborar los especímenes que serían ensayados posteriormente, lo hago de esta manera para que quede más claro y mejor explicado la serie de actividades que hacía día con día correspondientes a la elaboración de la mezcla y creación de los cilindros. El procedimiento es el siguiente:

Una vez conocida la humedad óptima del suelo que se va a emplear, y con un determinado porcentaje de cemento, o mortero, cal y aditivo en su caso se procede a realizar la mezcla del suelo cemento, utilizando una mezcladora con paleta.

El orden de mezclado es primero colocar el suelo y seguido el cemento, para dar un premezclado de ambos elementos y después se añade el agua de diseño. En el caso de contener aditivos líquidos estos se incorporarán junto con el agua al momento de ser mezclado el suelo cemento, en cambio si el aditivo es sólido se añadirá junto con el suelo.

²⁸ Manual para la elaboración de especímenes de suelo-cemento mediante compactación Porter. Gerencia de Investigación y Desarrollo, CEMEX.

El tiempo y velocidad de mezclado están determinados por un procedimiento interno de la empresa.

Una vez llevado a cabo la mezcla está se coloca en un bote y se tapa con una franela un poco húmeda, para evitar que la humedad contenida en el suelo mezclado se pierda durante el proceso de la elaboración de los especímenes cilíndricos.

Antes de llenar el molde con el material, se deberá asegurar que se encuentre bien cerrado y atornillado, posteriormente se deberá engrasar el molde aplicando desmoldante en toda la superficie interior del molde. Esto deberá ser de manera superficial, evitando que queden charcos o grasa de manera excesiva.

El material a compactar deberá ser colocado dentro del molde en tres capas, cada una de estas capas será un tercio del volumen total de material a compactar. Por cada capa se aplican 25 o 56 penetraciones, según si es el molde de 10 cm de diámetro o el molde de 15 cm de diámetro respectivamente, con una varilla de punta redondeada de 3/8" en forma uniforme en toda el área de la capa, siendo lo más recomendable es hacerlo en manera de espiral, partiendo de las orillas hacia el centro. Entre cada capa se golpea el molde suavemente con un mazo de hule hasta nivelar el material.

Aquí es importante señalar que en un inicio los especímenes los realizaba manualmente, es decir, los compactaba utilizando un martillo Proctor manual, pero durante el transcurso del estudio se determinó que lo mejor y más óptimo era cambiar el procedimiento de elaboración, por lo cual se optó por compactarlos mecánicamente utilizando una máquina Porter, lo cual eficiente bastante el proceso y permitía elaborar más especímenes en un menor tiempo y aseguraba que todos y cada uno de los cilindros era uniforme y tenía la misma compactación lo que significaba que los resultados son más representativos al eliminar imperfecciones en la mano de obra.

Una vez aclaro lo anterior, la explicación continúa especificando que el procedimiento descrito corresponde a una compactación mecánica utilizando la máquina Porter.

Una vez lleno el molde, se coloca una placa de compactación sobre el material dentro del molde y es llevado a la prensa. Ahí deberá centrarse el molde lo más preciso posible al

embolo que aplicará la carga, esto con el fin de evitar excentricidades de carga en el espécimen y ocasionar problemas de compactación.

Una vez centrado el molde se aplica una determinada carga, establecida según el tipo de cilindro que se va a elaborar, en un determinado tiempo para lograr compactar el suelo cemento y crear los especímenes cilíndricos deseados.

Estos especímenes compactados son desmoldados con cuidado y colocados dentro de bolsas de plástico, para evitar que pierdan su humedad interna, seguido se etiquetan y son llevados a ser almacenados en un cuarto seco.



Fotografía 14 Especimen terminado de compactar, se ha retirado el anillo superior. (Fotografía tomada por el autor, 2016).



Fotografía 15 Espécimen desmolado y listo para ser guardado y almacenado. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

VIII Ensaye de los especímenes

VIII.I Compresión²⁹

Esta prueba es muy sencilla realizar, por lo que el procedimiento es bastante rápido y sin complicaciones. Básicamente sólo se coloca el cilindro que se va a ensayar y se nivela, se enciende la máquina y se deja correr hasta que el cilindro llegue a la falla, el único detalle importante es que hay que revisar que las especificaciones que establece la normatividad vigente se cumplan y que antes de echar a andar la máquina está este calibrada y cumpla con todos los requisitos.

Una máquina como las que tiene el CTCC ya cumple con las características exigidas en la normatividad, y se hace una programación inicial para que no se tenga que modificar por cada ensayo lo cual automatiza aún más la prueba.

²⁹ NMX-C-083-ONNCE-2014 "Industria de la construcción - concreto - determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto - método de prueba"

Es por ello que yo realicé algunos ensayos a compresión, aunque la mayoría lo realizaba el personal encargado de ensayar otros cilindros, para evitar que la máquina estuviera operada por diverso personal y evitar en lo posible el uso indebido del equipo.

El procedimiento que establece la norma de ensaye se describe a continuación y es importante mencionarla para ejemplificar los detalles que implica el cumplir la normativa vigente en temas de pruebas de laboratorio.

Para la realización de esta prueba se utiliza la norma NMX-C-083-0NNCCE-2014 "Industria de la construcción - concreto - determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto - método de prueba", la establece los métodos de prueba para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en especímenes cilíndricos moldeados y corazones de concreto con masa volumétrica mayor a 900 kg/m^3 .

La máquina de prueba puede ser de tipo a compresión o universal, con capacidad suficiente y que pueda funcionar a la velocidad de aplicación de la carga establecida sin producir Impactos ni pérdida de carga.

Si la carga de una máquina para ensaye a compresión, se registra en una carátula, esta debe estar provista de una escala graduada que se pueda leer por lo menos con una aproximación de 2.5 % de la carga aplicada. Es recomendable mantener la uniformidad de la graduación en la escala de toda la carátula

Debe estar provista de una línea de referencia en cero y una graduación que inicie en forma progresiva, cuando menos en el 10 % de su capacidad.

Debe contar con una aguja indicadora, la cual debe tener la longitud suficiente para coincidir con las marcas de graduación y el ancho de su extremo no debe ser mayor que el claro libre entre dos divisiones mínimas.

Cada carátula debe estar equipada con una aguja de arrastre de la misma longitud que la aguja indicadora y un mecanismo para ajustar a la referencia en cero en caso de desviación. La separación mínima entre dos graduaciones no debe ser menor a 1 mm para realizar una lectura adecuada.

Las máquinas con sistema digital deben estar equipadas con un dispositivo que registre la carga máxima aplicada.

Se debe aplicar la carga con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de carga debe estar dentro del intervalo de 137 kPa/s a 343 kPa/s (84 kgf/cm²/min a 210 kgf/cm²/min) equivalente para un diámetro estándar de 15 cm a un rango de 2.4 kN/s a 6.0 kN/s (14.8 tonf/min a 37.1 tonf/min).

Se permite una velocidad mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada siempre y cuando durante la segunda mitad se mantenga la velocidad especificada.

Para el ensayo a compresión se limpian las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de prueba, se coloca este último sobre la placa inferior alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga, mientras la placa superior se baja hacia el espécimen asegurándose que se tenga un contacto suave y uniforme.

Después se aplica la carga hasta que aparezca la falla de ruptura, este valor se registra.



Fotografía 16 Ensayo a compresión de un cilindro de suelo-cemento a edad de 14 días. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

Se calcula la resistencia a la compresión del espécimen, dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba entre el área promedio de la sección transversal determinada con el diámetro medido. El resultado de la prueba se expresa con una aproximación de 100 kPa (1 kgf/cm²).

En la fotografía 16 se muestra un espécimen de suelo-cemento listo para ser ensayado, dicho espécimen tiene una edad de 14 días y proviene de Guanajuato.

Como nota adicional, específicamente para suelo-cemento existe la norma ASTM D1633 “Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders”, que establece la forma de ensaye cuando se utilizan cilindros moldeados de suelo-cemento.



Fotografía 17 Resultado de un ensaye a compresión de un cilindro de suelo cemento con un sistema digital. Obtenido de laboratorio de cementos, CTCC.(Fotografía tomada por el autor, 2016).

La importancia de esta prueba radica en que es un fuerte indicador del mejoramiento de un suelo de mala calidad con el uso de cemento y aditivos, ya que hubo suelos en los que su resistencia a la compresión simple no llegaba ni a los 20 kg/cm^2 y al convertirlo en suelo-cemento su resistencia paso de los 100 kg/cm^2 al añadir sólo un poco de cemento. El objetivo del proyecto era alcanzar una resistencia a la compresión simple de 120 kg/cm^2 para una capa de rodamiento, lo cual es una buena resistencia para caminos rurales que son de terracerías o están revestidos.

En la fotografía 17 se aprecia el resultado de un ensaye de un cilindro con edad de 7 días, la resistencia obtenida fue de 54.08 kg/cm^2 lo cual es bastante bueno para la edad que tiene; lo que deja en claro que se puede hacer un mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo con malas características.

VIII.II Permeabilidad

Esta prueba que yo realizaba todos los días consiste en colocar un cilindro de suelo-cemento de dimensiones aproximadas de 10 cm de diámetro por 11 cm de alto dentro de un dispositivo de PVC diseñado especialmente para recibir al cilindro, el cilindro de suelo-cemento se coloca en la base y se sella perfectamente con silicón en frío ya que este se adhiere perfectamente a la superficie del suelo y el tubo de PVC y sella cualquier abertura que pueda haber quedado tras la colocación.

En la parte superior del dispositivo se tiene un tubo de acrílico en donde se va a colocar agua hasta una marca fija, una vez colocada el agua con la mayor precisión posible se coloca un plástico al final del tubo y se sujeta con la finalidad de evitar la evaporación del agua al paso del tiempo. En la fotografía 18 se muestra el ensamble del dispositivo con el cilindro de suelo cemento, así mismo el agua ya se encuentra colocado.

Una vez que se ha llenado con agua hasta la marca fija, y se ha protegido con el plástico, se deja durante 24 h y una vez pasado ese tiempo se registra el nuevo nivel del agua, es decir, cuánta agua fue la que logro penetrar al espécimen que se refleja en una nueva columna de agua. Con esta lectura se procede a calcular el coeficiente k de permeabilidad, con la expresión siguiente:

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

Donde:

k = coeficiente de permeabilidad, en cm/seg

a = área de la sección transversal del tubo, en cm²

L = altura de la muestra de suelo, en cm

A = área de la sección de muestra ensayada, en cm²

h₁ = altura de agua al comienzo del ensayo, en cm

h₂ = altura de agua al final del ensayo, en cm

t = tiempo de ensayo, en seg

ln= logaritmo natural

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Bueno						Pobre			Prácticamente impermeable		
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada				Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
					Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. ^d							
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.											
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.											
Determinación indirecta de k		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.				
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.									Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia		

Tabla 8 Valores típicos de K en cm/seg. Extraído de Geología y Geotecnia, Permeabilidad de Suelos, por Silvia Angelone, María Teresa Garibay Y Marina Cauhapé Casaux. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Esta prueba es importante ya que nos muestra la resistencia que tiene el suelo-cemento a las inclemencias producidas por la lluvia y el agua que se pudiera acumular en su superficie.

En la tabla 8 se presentan algunos valores característicos que presentan algunos tipos de suelo, esta información es útil para conocer el tipo de drenaje que presenta alguna muestra según su coeficiente de permeabilidad.

En la tabla 9 se muestran algunos resultados obtenidos al finalizar la prueba de permeabilidad, se observa que en todos ellos el drenaje que predomina es pobre, por lo que no dejan que el

agua se filtre tan fácilmente, lo que da como resultado que sean mezclas con un buen desempeño al agua.



Fotografía 18 Colocación del cilindro de suelo-cemento en el dispositivo para prueba de permeabilidad. Se observa que en el espécimen de la izquierda el agua empieza a fluir a través del suelo, mientras que en el espécimen derecho el agua traspasa totalmente al suelo. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

Espécimen	K (mm/s)
Muestra 1	9.8094E-06
Muestra 2	3.97836E-05
Muestra 3	1.74028E-05
Muestra 4	1.75245E-05
Muestra 5	1.48637E-05
Muestra 6	1.74953E-05
Muestra 7	2.1192E-05

Tabla 9 Resultados de permeabilidad obtenidos de distintas mezclas de un suelo proveniente de Guadalajara. Obtenido de Ernesto Bribiesca Contreras, CTCC.

VIII.III Abrasión³⁰

Esta prueba está enfocada en determinar la resistencia del suelo-cemento a la abrasión y la importancia de esta prueba radica en que es un indicador primordial del comportamiento que tendrá una vez colocado, en el caso de que sea usado para caminos, al desgaste producido por el paso de vehículos sobre la superficie rodante.

Un suelo-cemento con un porcentaje de pérdida bajo tendrá un mayor tiempo de vida útil que uno con un gran porcentaje de pérdida ya que indica que para una misma sollicitación uno de ellos se desgasta y desintegra con más facilidad que el otro.

Para esta prueba se utiliza la Norma ASTM C944 “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method”.

Este ensayo da una indicación de la resistencia al desgaste relativo de mortero y concreto basado en pruebas a núcleos o especímenes fabricados, aunque también es aplicable al ensayo de especímenes de suelo-cemento.

Este ensayo ha sido utilizado con éxito en el control de la calidad de carreteras y puentes sujetos al tráfico.

³⁰ ASTM C944 “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method”

Este método se enfoca en medir la resistencia a la abrasión en los extremos de núcleos de concreto de 150 mm de diámetro, muestras de mortero u otras muestras con área suficiente para permitir la realización del ensayo, en este caso del suelo-cemento.

Para esta prueba se utiliza un dispositivo de abrasión, el cual es una prensa taladradora o dispositivo similar con una tirada capaz de sostener y de rotar el cortador que desgasta a una velocidad de 200 rev/min y ejerciendo una fuerza o carga normal de $98 \pm 1\text{N}$ ($22 \pm 0.2\text{ lbf}$) o una carga doble de $197 \pm 2\text{ N}$ ($44 \pm 0.4\text{ lbf}$) en la superficie del espécimen de ensayo. La fotografía 19 muestra en ejemplo de este dispositivo.

En la prensa va colocado una cortadora rotativa, en la cual son montadas 22 ruedas vestidas (estrellas) de 37.5 mm (1.5") de diámetro y 24 arandelas de 25.4 a 31.75 mm (1 a 1.25") de diámetro. Las arandelas colocadas son apiladas y trabadas en un perno con el propósito de reducir su diámetro al rango especificado para evitar abrasión restringida del concreto por las arandelas. En la fotografía 20 se aprecia la cortadora rotativa con las estrellas colocadas y el espécimen listo para ser ensayado.

El diámetro total de la cortadora, o bien el diámetro del área circular de la sección desgastada es de 82.5 mm ($3\frac{1}{4}$ ").

El procedimiento de la prueba es el siguiente:

Se toma la masa inicial del espécimen antes de ser ensayado, después se coloca en la máquina de abrasión, se nivela y se centra lo más exacto posible. Entonces el cortador rotativo se sostiene en una posición levantada por medio de una varilla roscada incluida, el espécimen es sujetado firmemente en su posición y el motor encendido. La cortadora rotativa se baja lentamente, haciendo contacto con la superficie de ensayo del espécimen por un ciclo de dos minutos, después del cual la cortadora es levantada y el espécimen es retirado del aparato y pesado nuevamente para obtener la pérdida por abrasión.

En la fotografía 21 se observan dos especímenes gemelos de una mezcla de suelo-cemento proveniente de Guanajuato, que fueron ensayados a un ciclo de dos minutos, se observa perfectamente el paso de las estrellas de la cortadora, haciendo un círculo perfecto.



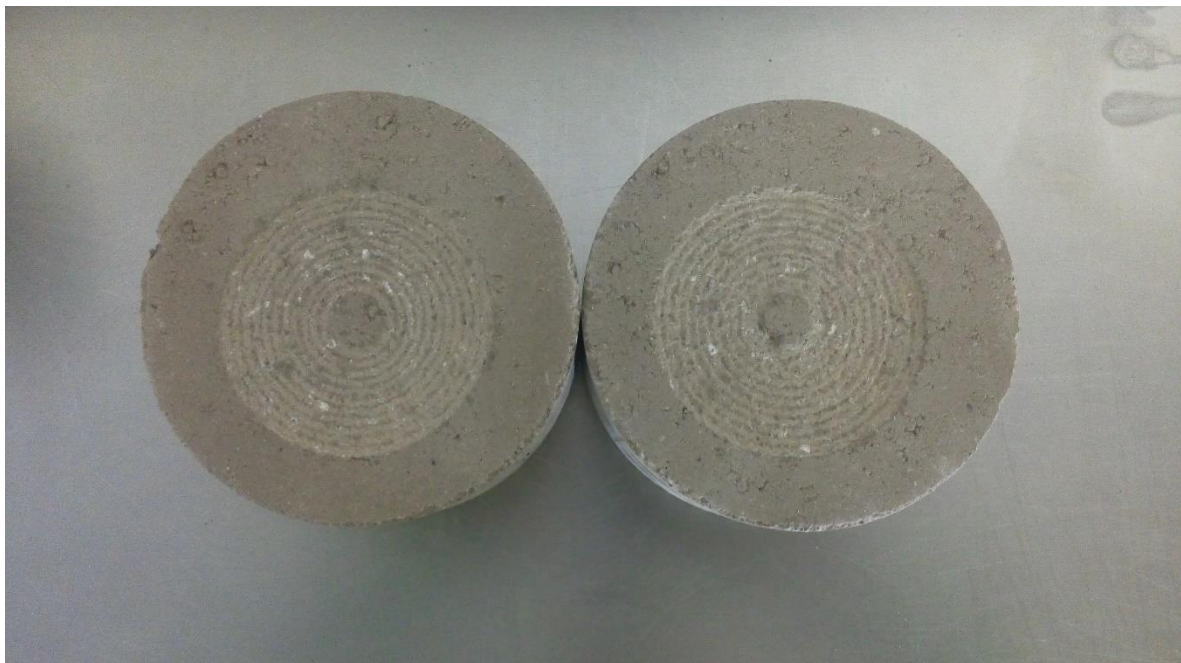
Fotografía 19 Máquina para prueba de abrasión. Obtenida de ASTM C944 “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method”.

Para el caso de especímenes de concreto y mortero se realizan tres ciclos de abrasión, en los cuales se registra el peso tras cada ensayo, para el caso de especímenes de suelo-cemento se toma como válido un solo ciclo, esto debido a que la exposición al cortador puede resultar bastante agresivo para el suelo-cemento y puede llegar a romperlo dentro de la máquina, entonces se hace una comparación entre distintas mezclas llevadas a un solo ciclo de dos minutos.

Al igual que en la prueba de compresión simple, mi participación en esta prueba no fue tan extensa como otras actividades, ya que la prueba por ser muy simple y por tener personal encargado de su realización no necesitó que yo me involucrara tanto.



Fotografía 20 Espécimen de suelo-cemento colocado en la máquina de abrasión. Se aprecia la cortadora rotativa. Fotografía propia del autor.



Fotografía 21 Especímenes gemelos ensayados a abrasión. Suelo proveniente de Guanajuato. Se aprecia el paso de la cortadora perfectamente. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

Esta prueba nos arroja resultados importantes del comportamiento de suelo cemento, ya que poniendo un ejemplo se ensayó un espécimen de suelo solo, sin adicionarle nada más que agua, y después de un ciclo de dos minutos el porcentaje de pérdida fue de 12.7% y al hacer una mezcla de suelo-cemento se logró bajar ese porcentaje a 1.2%. Esta reducción es bastante considerable, ya permite que un camino necesite de un menor mantenimiento al mejorarlo con cemento y algún aditivo.

VIII.IV Módulo Elástico

Esta prueba no me encargué de realizarla, debida a que el área de estructuras se encargaba de llevarla a acabo debido a que cuenta con el equipo necesario para su realización. Aunque no me atañe esta parte es importante mencionarla, ya que es una de las pruebas fundamentales que se estuvo haciendo en el proyecto de suelo cemento y arrojó datos significativos del comportamiento del material a distintas dosificaciones de cemento y aditivos.

Para comenzar, el módulo de elasticidad estático secante es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido un material a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica. En este caso también se puede obtener el módulo elástico a un espécimen de suelo cemento.

Para la realización de la prueba se utiliza la norma NMX-C-128-2013-ONNCCE "Industria de la construcción - concreto sometido a compresión - determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson" y el procedimiento para llevarla a cabo es el siguiente:

Se utilizará para medir las deformaciones longitudinales en los especímenes deformímetros que puedan o no adherirse al espécimen cilíndrico y que permita realizar lecturas con exactitud de 0.0025 mm (una diezmilésima de pulgada) como mínimo en dos líneas de medición diametralmente opuestas, paralelas al eje longitudinal del cilindro y centradas con respecto a la altura media del espécimen. Dichos deformímetros pueden ser dos anillos y dos micrómetros o también pueden ser deformímetros adheribles (straing gage).

Así mismo se utilizará una máquina que cuente con dispositivos para aplicar cargas a velocidad constante, con un error menor o igual al 1%. Para poder calcular el esfuerzo

correspondiente a 50 millonésima de deformación unitaria, la división mínima en su dispositivo indicador de carga no debe ser mayor de 0.5 t y permitir la apreciación de fracciones de 0.25 t.



Fotografía 22 Anillos colocados en un espécimen de suelo-cemento para obtener el módulo elástico. (Fotografía tomada por el autor, 2016).

Tomar lecturas de deformación y carga en tal cantidad que pueda definirse mediante interpolación, calculado o gráficamente, el esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria de 50 millonésimas, así como la deformación unitaria correspondiente al 40% del esfuerzo máximo. Si se desea obtener la curva esfuerzo-deformación, será conveniente tomar un mayor número de lecturas.

No deberá interrumpirse la carga en la toma de cada lectura, para lo cual, normalmente es necesario contar cuando menos con 3 personas para la realización de la prueba.

Se deberá colocar el espécimen en una superficie horizontal plana y firme donde se le monte el dispositivo de medición, debe tenerse la precaución de que al colocar el dispositivo en el espécimen éste quede exactamente al centro de los anillos, fijándolos firmemente mediante los anillos de punta, para evitar que existan deslizamientos.

Es importante verificar que los micrómetros del deformímetro queden perfectamente verticales, paralelos al eje longitudinal del espécimen, asegurándose que el vástago del micrómetro tenga la carrera suficiente para la deformación que deba registrarse.

Una vez ajustados los micrómetros, retirar cuidadosamente las barras que separan los anillos, observando que los indicadores de los micrómetros no registren movimientos importantes, si esto sucede es indicativo de que los anillos no se fijaron adecuadamente, por lo que será necesario desarmar y volver a montar el deformímetro o dispositivo de medición.

Colocar el espécimen con el deformímetro sobre la platina de la prensa, centrándolo adecuadamente antes de proceder a la aplicación de la carga y colocar la caratula de los micrómetros en 0.0 (Cero). Después se debe aplicar la primera precarga de 10 % al 15 % del promedio de la resistencia de ruptura obtenida en los especímenes compañeros ensayados a compresión.

Aplicar una segunda precarga hasta el mismo nivel que la anterior que la anterior, registrando cargas y deformaciones cada tonelada hasta 5 t, después se incrementa a cada 5 t. Al retirar la carga se observa si las agujas de los micrómetros regresaron a 0.0 (cero) y si la deformación leída en ellos es similar, si no es así, verificar el centrado y ajustar los micrómetros.

Posteriormente se aplica la carga de ensaye, registrando deformaciones cada tonelada hasta una carga de 5 t. Si la carátula de la prensa lo permite en las primeras 2 t, se registran las deformaciones cada 0.5 t, de no ser así, las lecturas deben registrarse cada tonelada hasta llegar a 5 t.

De 5 t en adelante, las deformaciones deben registrarse cada 5 toneladas hasta llegar al 60% del esfuerzo máximo obtenido en los especímenes ensayados. La velocidad de la carga en las primeras 5 t debe ser de 1 min, de ahí en adelante 20 s por cada 5 t.

Una vez alcanzada la carga que representa el 60 % de la máxima obtenida en el ensaye a compresión, es importante reducir la velocidad de aplicación de la carga para permitir que se aflojen los tomillos que fijan los anillos y de ser posible, para evitar deterioro se retiran los micrómetros, después de lo cual se proseguirá con la aplicación de la carga hasta llegar a la carga máxima o falla del espécimen.

Para calcular el módulo de elasticidad se procede de la forma siguiente:

Con el área del espécimen, las cargas, las lecturas de deformación y la longitud de medición, deben calcularse los esfuerzos y las deformaciones unitarias correspondientes a cada carga, así como el esfuerzo máximo.

Trazar la curva de esfuerzo - deformación unitaria.

Determinar el esfuerzo S_1 en kg/cm^2 correspondiente a la deformación unitaria (e_1) de 0.000050.

Determinar el esfuerzo S_2 correspondiente al 40 % del esfuerzo máximo.

Determinar la deformación unitaria e_2 correspondiente al esfuerzo S_2 .

Calcular el módulo de elasticidad empleando la formula siguiente:

$$E = \frac{S_1 - S_2}{e_2 - 0.000050}$$

Donde E es el módulo de Elasticidad, en kg/cm^2 .

VIII.V Absorción capilar³¹

Esta prueba al ser pertinente del laboratorio de durabilidad no me tocó realizarla, pero de igual manera es importante el mencionarla debido a su importancia que tiene en el proyecto de suelo-cementos ya que nos indica su comportamiento con la presencia de agua subterránea, ya sea producto del nivel freático o de agua acumulada por las lluvias o aguas de carácter superficial.

Esta prueba nos da una idea del “ablandamiento” que podría tener un camino elaborado con suelo-cemento, y por consiguiente es un indicador del mantenimiento que se le tendría que dar al camino, traducido como tener que quitar la capa dañada y volver a colocar más y compactarlo de nuevo. Sin un suelo-cemento presenta una baja absorción capilar significa que al agua le cuesta más trabajo el penetrar entre la mezcla de suelo compactada.

³¹ ASTM C1585 “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes”

El desempeño del suelo-cemento sujeto a muchos ambientes agresivos, es en gran medida una función de la penetrabilidad del sistema de poros. En un concreto, o suelo-cemento, no saturado, la velocidad de ingreso del agua y otros líquidos es controlada en gran medida por la absorción debida al ascenso capilar.

Para elaborar esta prueba se utiliza la Norma ASTM C1585 “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes”. El procedimiento es el siguiente:

Se pesa la muestra que se quiere probar, el espécimen estándar es un disco de un diámetro de 100 ± 6 mm y una longitud de 50 ± 3 mm.

En estricto sentido cuando se trata de concretos las muestras a ensayar se deben de pre saturar, pero debido a que el suelo-cemento no tiene un buen comportamiento cuando está totalmente sumergido en agua se omite esta parte y se pasa directo a ser ensayado. También se deben de colocar los especímenes en una cámara ambiental a una temperatura de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $80 \pm 3\%$ por un período de 3 días. Alternativamente, se colocan los especímenes en un desecador, dentro de un horno de secado a la temperatura de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por tres días.

Se coloca el dispositivo de soporte sobre el fondo de la bandeja y se llena la misma con agua potable hasta que el nivel de agua quede de 1 a 3 mm arriba del tope del dispositivo de soporte. Se debe mantener el nivel de agua de 1 a 3 mm sobre el tope del dispositivo de soporte, durante la duración de los ensayos. En la figura 8 se muestra como se debe colocar el espécimen de ensayo.

Se arranca el cronómetro o dispositivo tomador de tiempo e inmediatamente se coloca el espécimen con su superficie de ensayo sobre el dispositivo de soporte se registra la fecha y hora del contacto inicial con el agua.

Para el caso de especímenes de concreto se toman mediciones cada determinado tiempo. La primera medición debe ser a $60 \text{ seg} \pm 25$ y la segunda a $5 \text{ min} \pm 10\text{s}$. Las mediciones subsecuentes deben ser a $10 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$, 20 min , 30 min y 60 min . El tiempo actual debe ser registrado con una aproximación de $\pm 10\text{s}$. Luego se continúan las mediciones cada hora ± 5

min, hasta las 6h del primer contacto del espécimen con el agua, registrando el tiempo con una aproximación de ± 1 min.

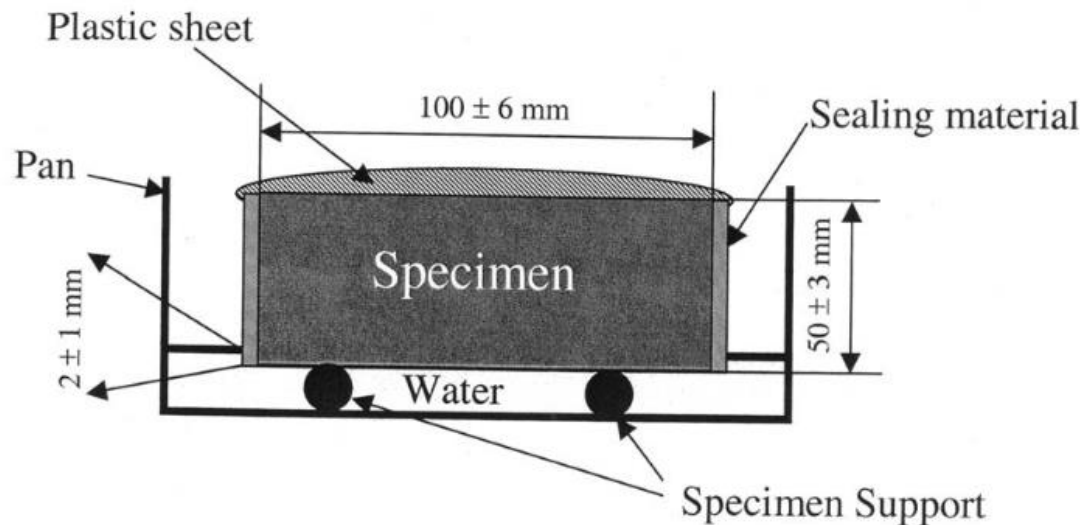


Figura 8 Esquema del procedimiento de colocación del espécimen. Extraído de ASTM C1585 “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes”.

Después de las 6 h iniciales, se toman mediciones cada día hasta 3 días, seguidos de 3 mediciones, separadas por 24 horas, durante los días 4 a 7; se toma luego una medición final que esté por lo menos 24h después de la medición a 7 días.

En el caso de especímenes de suelo-cemento se deja solamente durante 24 horas, por lo mencionado con anterioridad sobre los efectos del agua sobre los mismos, y se toma el peso a las 24 horas de haber sido colocado.

Lo importante es cuidar que el cilindro no se desintegre en la caja con el agua. El tiempo de lectura inicial es de 15 minutos, seguido de una hora, cuatro horas y finalmente 24 horas.

La absorción es el cambio de masa dividido por el producto del área transversal del espécimen por la densidad del agua. Para el propósito de esta prueba, se hace caso omiso de la dependencia de la densidad del agua de la temperatura y se usa una densidad del agua de 0.001g/mm^3 .

La absorción se calcula con la expresión siguiente:

$$I = \frac{m_t}{a * d}$$

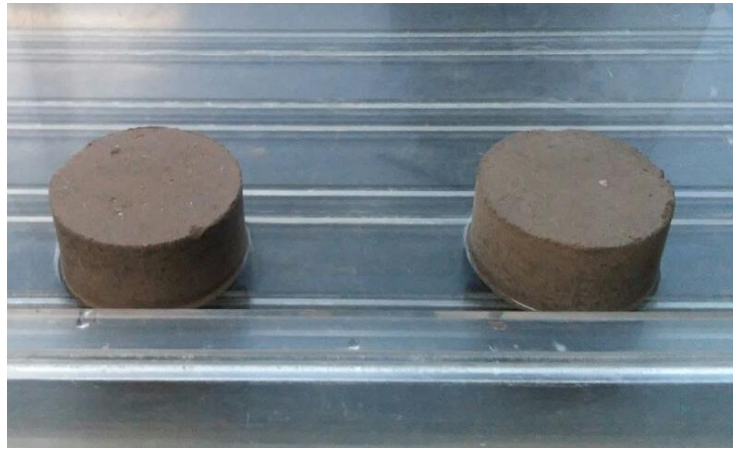
Donde:

I = absorción, en mm

m_t = El cambio de masa en gramos, del espécimen en un tiempo t

a = el área del espécimen expuesta al agua, en mm^2

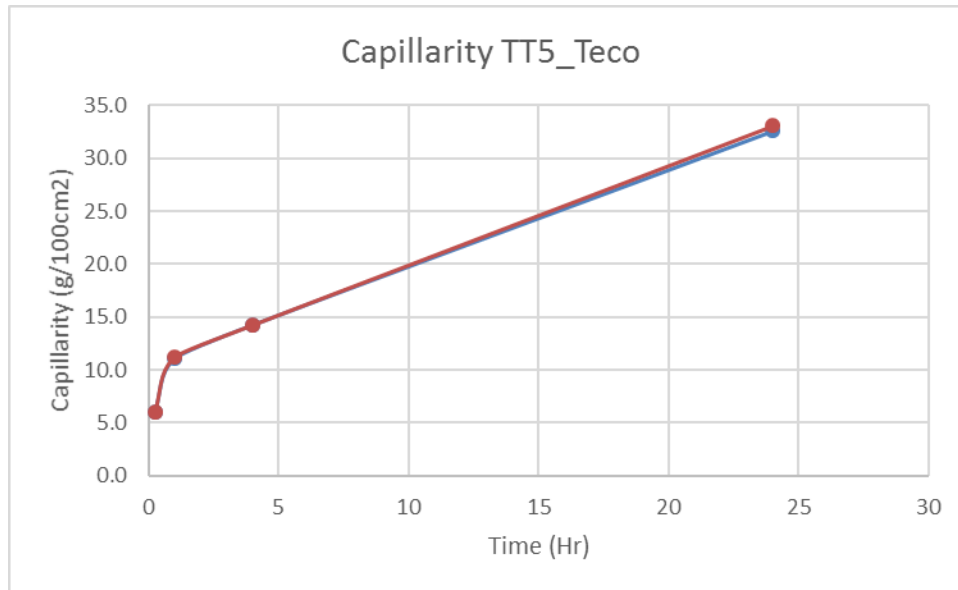
d = La densidad del agua en g/mm^3



Fotografía 23 *Especímenes gemelos colocados en el dispositivo de soporte, el tiempo de ensayo fue de 24 horas. (Fotografía tomada por el autor, 2016).*

En la fotografía 23 se muestra como debe ser el ensayo de los especímenes, se observa que pasadas las 24 horas las muestras se encuentran enteras, por lo que resistieron correctamente la acción del agua.

En la gráfica 2 se observan las curvas obtenidas al graficar la capilaridad contra el tiempo de ensayo de dos especímenes gemelos, se aprecia a la perfección que ambos resultados medidos son muy concordantes entre ellos, por lo que se concluye que los especímenes se elaboraron correctamente y con las mismas características.



Gráfica 2 Resultados de dos especímenes gemelos en una prueba de absorción capilar. Los resultados obtenidos con casi iguales entre las dos muestras. Obtenido de Ernesto Bribiesca Contreras, CTCC.

IX Conclusiones

IX.I Conclusiones del proyecto suelo-cemento

El suelo-cemento es un producto con bastantes aplicaciones y con muchas bondades, lamentablemente en el país no ha sido tan extensa su aplicación y su difusión, tal vez porque no ha habido el suficiente desarrollo en investigación o simplemente por desconocimiento de su existencia, yo incluso nunca había escuchado del nombre hasta que entré a Cemex y me presentaron el proyecto por primera vez.

Sin embargo, una vez entrando más a fondo al estudio del suelo-cemento se obtiene que es una tecnología con bastantes aplicaciones y con muchas virtudes, siendo una de las más importantes que es un producto económico y de muy fácil aplicación.

El proyecto de suelo-cemento en el que estuve trabajando durante toda mi estancia en Cemex tuvo como finalidad el reducir los costos en temas de materiales, maquinaria y mano de obra especializada en índoles de creación y mantenimiento de caminos ya que en primer lugar muchas veces los materiales que se encuentran in situ no son aptos para ser utilizados y aprovechados para el proyecto, por lo que son descartados y se tiene que mandar a traer

material de bancos de materiales que normalmente se encuentran a una distancia considerable del proyecto por lo que esto conlleva un alto costo por concepto de acarreo.

Esta es la razón fundamental del proyecto, el poder aprovechar lo que se tiene en la obra sin importar si este material no tiene las características necesarias para ser utilizado ya que esta es la finalidad del suelo-cemento, el poder convertir un suelo de malas características en un suelo con propiedades óptimas. En un segundo término tenemos la aplicación, ya que no requiere de maquinaria ni equipo especial para poder hacer una mezcla de suelo-cemento y para poder colocarlo, en temas de mano de obra no se necesita de gente especializada, una cuadrilla de trabajadores formada por un cabo y unos peones pueden hacerse cargo de la colocación sin mayor problema.

Sin lugar a dudas es un proyecto con mucho potencial, sólo necesita más desarrollo para que pueda ser utilizado más ampliamente en distintos sectores de la industria de la construcción. Como ya lo mencionaba, no existe mucha investigación en el país sobre el tema siendo que muchas otras naciones como Alemania, Francia, Japón y Suiza, por mencionar unos pocos, cuentan con toda una metodología y toda una normativa para hacer uso del suelo-cemento.

Estos países cuentan con pruebas especiales y con estándares de las características mínimas que se deben cumplir si se desea hacer uso del suelo-cemento en algún proyecto, manejan por ejemplo resistencias mínimas a la compresión simple, porcentajes máximos permitidos en pérdida por abrasión e incluso manejan resistencia a la flexión.

En Centro de Tecnología Cemento y Concreto ha apostado por ampliar su catálogo de productos, por lo que ha invertido en investigación vanguardista lo que asegura beneficios para la empresa, y no solamente para ella sino también traerá beneficios para el país y para la ingeniería en general, ya que ha dado el primer paso para obtener tecnologías poco utilizadas, pero con un alto beneficio.

IX.II Conclusiones personales

Los conocimientos adquiridos durante mi formación académica en la Facultad de ingeniería fueron sólidos, pero sin duda, durante mi estancia en Cemex reforcé muchos de ellos y aprendí un sinnúmero de cosas nuevas de distintos ámbitos, principalmente relacionadas con suelo-

cemento ya que el Centro de Tecnología Cemento y Concreto está a la vanguardia en este tema.

Al ingresar me puse como meta personal el aprender todo lo que pudiera acerca del concreto, y así fue, me llevé mucho conocimiento y también muchas habilidades de manejar y operar equipo y de realizar pruebas. A lo largo de la carrera dentro de la facultad, hubo algunas materias en donde se hacían pruebas de laboratorio y se veía teoría relacionada con la misma, pero no se compara con lo que viví en Cemex al profundizar más en los procedimientos normados y en conocer el por qué y para qué.

Las cosas aprendidas en la Facultad de Ingeniería sin duda me sirvieron para desarrollar mis actividades dentro de Cemex, por todo que implica el conocer los procesos constructivos relacionados al concreto y también de suelos, básicamente todas las materias del área de construcción, así como las de geotecnia me fueron de gran ayuda debido a que me brindaron las bases necesarias para entender los procedimientos afines de todas las actividades que estuve realizando en el CTCC.

Al desempeñar mis labores logré conocer e involucrarme más en el manejo de normas oficiales mexicanas y en normas internacionales, como son las normas ASTM, así como en los sistemas de gestión integral de calidad. Todas y cada una de las pruebas de laboratorio que llevé a cabo tienen una estricta metodología, debido a que están certificadas por organismos avalados y reconocidos mundialmente ya que cumplen con todo un proceso que asegura la calidad de los resultados obtenidos.

Al pasar por distintas áreas tuve la oportunidad de conocer distintas pruebas que se llevan a cabo a los concretos y a los productos especiales. Logré ver desde pruebas en agregados, pruebas en concreto y morteros frescos, pruebas en concreto endurecido, aditivos y materia prima, producción del concreto en grandes volúmenes, algunas pruebas en campo, conocí una amplia gama de productos que ofrece Cemex para necesidades especiales en la construcción, entre muchas tantas cosas.

Aprendí también a tratar con mucha gente, desde el personal administrativo hasta gente que se encontraba en los talleres de mantenimiento, traté con mecánicos, mineros, geólogos,

químicos, arquitectos, ingenieros civiles, en fin, toda una diversidad de áreas y carreras bastante diferentes entre sí, pero con un fin en común.

Entendí que cada cabeza es un mundo, no todos tienen la misma visión ni los mismos conocimientos, hay cosas que uno desconoce o ignora porque nunca ha tenido la necesidad de utilizarlas, es muy difícil tratar a todos con el mismo nivel que tenemos y a la inversa, los demás a veces olvidan que no tenemos la misma experiencia que ellos, lo que se puede traducir algunas veces en malentendidos. Me llevé como recompensa el eliminar esta brecha al desarrollar habilidades de interacción social para poder trabajar de manera más armoniosa y más eficiente con personas cuya preparación es diferente a la mía, porque al final todos estamos trabajando con un fin específico y hay que actuar cooperativamente para poder lograrlo.

Referencias bibliográficas

1. Cemex México. Perfil de la Compañía. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/PerfilCompania.aspx>
2. Cemex México. Acerca de Cemex: Nuestra Historia [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/Historia.aspx>
3. Javier Lara Bayón, Alejandra Betancourt, Ernesto Soto Páez. (2006). CEMEX, El libro del Centenario. Monterrey, México: Editorial Clío.
4. Cemex México. Perfil de la compañía. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/PerfilCompania.aspx>
5. Cemex México. Perfil de la compañía. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/PerfilCompania.aspx>
6. Cemex México. Nuestras Áreas. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemex.com/ES/TrabajaConNosotros/NuestrasAreas.aspx>
7. Cemex México. Centro de Tecnología Cemento y Concreto. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: <http://www.cemexmexico.com/Concretos/CTCC.aspx>
8. Infraestructura Carretera. Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Subsecretaría de Infraestructura. 2004.
9. M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle. (2013). Suelo-Cemento. Sus Usos, Propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, A.C. México, pp. 86.
10. Portland Cement Association. Properties and Uses of Cement-Modified Soil. CR 034 S. 1977.
11. Portland Cement Association. Properties and Uses of Cement-Modified Soil. CR 034 S. 1977.
12. Portland Cement Association. Properties and Uses of Cement-Modified Soil. CR 034 S. 1977.

13. M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle. (2013). Suelo-Cemento. Sus Usos, Propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, A.C. México, pp. 86.
14. M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle. (2013). Suelo-Cemento. Sus Usos, Propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, A.C. México, pp. 86.
15. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Especial, el primer artículo. Revista IMCYC. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: http://www.imcyc.com/revistacyt/enero2013/pdfs/especial_uno.pdf
16. Steven Quesada. Clasificación de un suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Instituto Tecnológico de Costa Rica. [Citado 20 de noviembre 2016]. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/17252459/Clasificacion_de_los_suelos_segun_la_SUCS
17. ASTM D2487. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
18. Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez (1973). Mecánica de suelos, Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos. Limusa. México, pp. 499.
19. Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez (1973). Mecánica de suelos, Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos. Limusa. México, pp. 499.
20. Manual de carreteras, Vol. 2, Capítulo 15 Suelos. Clasificación de suelos. Luis Banón Blázquez.
21. Norma Mexicana NMX-C-088-1997-ONNCCE Agregados, Determinación de impurezas orgánicas.
22. Libro NMP. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales, parte 1 Suelos y Materiales para Terracerías. Título 7 Límites de consistencia. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
23. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003). Métodos de muestreo y prueba de materiales, parte 1. Suelos y materiales para terracerías. Límites de consistencia.

24. NMX-C-416-ONNCCE-2003. Industria de la Construcción, Muestreo de Estructuras Térreas y Métodos de Prueba. (Capítulos 6 y 7).
25. ASTM D6276. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.
26. ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).
27. Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez (1973). Mecánica de suelos, Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos. Limusa. México, pp. 499.
28. Manual para la elaboración de especímenes de suelo-cemento mediante compactación Porter. Gerencia de Investigación y Desarrollo, CEMEX.
29. NMX-C-083-0NNCCE-2014 "Industria de la construcción - concreto - determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto - método de prueba".
30. ASTM C944 "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method".
31. ASTM C1585 "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes".

Nota: Todas las fotografías que incluyen la siguiente leyenda "fotografía tomada por el autor, y el año" corresponden a material fotográfico que personalmente recibí de las distintas actividades que realicé durante mi estancia en Cemex en el período comprendido de octubre de 2015 a octubre de 2016.