

Tesis de grado en Ingeniería Civil

RIGIDEZ A BAJA DEFORMACIÓN
DE MEZCLAS DE SUELO
DE LA FORMACIÓN PAMPEANO
Y CEMENTO PORTLAND

Autor:

Pedro Antonio Serigos

Tutor de Tesis:

Ing. Alejo O. Sfriso

Co-Tutor de Tesis:

Ing. Humberto Balzamo



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

Laboratorio de Mecánica de Suelos
Laboratorio de Materiales y Estructuras
Departamento de Estabilidad y Construcciones
Facultad de Ingeniería - UBA

Tesis de grado en Ingeniería Civil

**RIGIDEZ A BAJA DEFORMACIÓN
DE MEZCLAS DE SUELO
DE LA FORMACIÓN PAMPEANO
Y CEMENTO PORTLAND**

Autor:

Pedro Antonio Serigos

Tutor de Tesis:

Ing. Alejo O. Sfriso

Co-Tutor de Tesis:

Ing. Humberto Balzamo

Firma del autor:

Firma del tutor:

Firma del co-tutor:

Aceptada por:

Fecha: Agosto 2009



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

Laboratorio de Mecánica de Suelos
Laboratorio de Materiales y Estructuras
Departamento de Estabilidad y Construcciones
Facultad de Ingeniería - UBA

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a todos aquellos que influyeron positivamente durante la realización de mi Tesis de Grado:

En primer lugar a mi tutor de Tesis, el ingeniero Alejo Sfriso, quién me guió y aconsejó durante todo el trabajo. Por su constante motivación y sobre todo por enseñarme un camino de constante búsqueda de superación.

A mi co-tutor de Tesis, Ing. Humberto Balzamo, cuyo apoyo fue fundamental en la realización e interpretación de resultados de la mayoría de los ensayos realizados.

Al profesor Ing. Juan Campana por su generoso aporte de conocimiento sobre suelo-cemento.

A los integrantes del Laboratorio de Mecánica de Suelos del LaME de la FIUBA. En especial a la Inga. Patricia Sagüés por transmitirme su experiencia y colaborar en la realización de ensayos, y al Ing. Mauro Codevilla.

A los integrantes del Laboratorios de Tecnología del Hormigón del LaME y el Laboratorio de Investigaciones Viales “Ing. E. Arenas” de la FIUBA. En especial a la Inga. Teresa Piqué y Matias Camueira.

A los integrantes del Laboratorio de Instrumental y Mediciones de la FIUBA, en particular al Ing. Kadener por su colaboración en la fabricación de la placa acondicionadora de señal del LVDT.

A los integrantes del Centro de Caucho del INTI, en particular a la Lic. Pilot por su desinteresada colaboración en la fabricación de membranas de Latex.

Finalmente deseo agradecer especialmente a mi familia y amigos por su apoyo incondicional. En especial a mis padres y hermanos, por su afecto y paciencia; y a Jacqueline por su amor y compañía.

Pedro A. Serigos

INDICE

| | |
|---|-----------|
| INDICE | 4 |
| SIMBOLOGIA | 6 |
| 1 INTRODUCCION | 7 |
| 2 ESTABILIZACION DE SUELOS | 8 |
| 3 SUELO-CEMENTO | 9 |
| 3.1 GENERALIDADES..... | 9 |
| 3.2 FENÓMENOS QUÍMICOS ENTRE EL SUELO Y EL CEMENTO PORTLAND | 9 |
| 3.3 MATERIALES..... | 9 |
| 3.3.1 <i>Suelo</i> | 9 |
| 3.3.2 <i>Cemento Portland</i> | 10 |
| 3.3.3 <i>Agua</i> | 10 |
| 3.3.4 <i>Aditivos y adiciones</i> | 10 |
| 3.4 PROPIEDADES | 10 |
| 3.4.1 <i>Densidad</i> | 10 |
| 3.4.2 <i>Resistencia a compresión simple</i> | 11 |
| 3.4.2.1 <i>Influencia de la granulometría</i> | 11 |
| 3.4.2.2 <i>Influencia del peso volumétrico</i> | 11 |
| 3.4.2.3 <i>Influencia del contenido de cemento Portland</i> | 12 |
| 3.4.2.4 <i>Influencia del tiempo de atraso en la compactación</i> | 12 |
| 3.4.2.5 <i>Influencia del tiempo y condiciones de curado</i> | 13 |
| 3.4.2.6 <i>Influencia del contenido de humedad</i> | 13 |
| 3.4.3 <i>Resistencia a Flexión</i> | 14 |
| 3.4.4 <i>Rigidez</i> | 14 |
| 3.4.5 <i>Retracción</i> | 14 |
| 3.4.6 <i>Permeabilidad</i> | 14 |
| 3.4.7 <i>Resistencia a la abrasión</i> | 15 |
| 3.5 APLICACIONES | 15 |
| 3.5.1 <i>Suelo-cemento en Pavimentos</i> | 15 |
| 3.5.1.1 <i>Generalidades</i> | 15 |
| 3.5.1.2 <i>Ventajas y Limitaciones</i> | 16 |
| 3.5.1.3 <i>Diseño de mezclas</i> | 16 |
| 3.5.1.4 <i>Proceso constructivo</i> | 17 |
| 3.5.2 <i>Protección de taludes</i> | 19 |
| 3.5.3 <i>Revestimientos</i> | 19 |
| 3.5.4 <i>Estabilización de fundaciones</i> | 20 |
| 3.5.5 <i>Otras aplicaciones</i> | 20 |
| 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL | 21 |
| 4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES | 21 |
| 4.1.1 <i>Suelo</i> | 21 |
| 4.1.2 <i>Cemento Portland</i> | 21 |
| 4.2 MOLDEO DE PROBETAS | 22 |
| 4.2.1 <i>Dosificación y mezclado</i> | 22 |
| 4.2.2 <i>Compactación</i> | 22 |
| 4.2.3 <i>Curado</i> | 23 |
| 4.3 ENSAYOS DE DURABILIDAD | 24 |
| 4.3.1 <i>Humedecimiento y secado</i> | 24 |
| 4.3.2 <i>Congelamiento y Deshielo</i> | 24 |
| 4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | 24 |
| 4.4.1 <i>Preparación del ensayo</i> | 24 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.4.2 | <i>Realización del ensayo</i> | 25 |
| 4.4.3 | <i>Procesamiento de los resultados</i> | 25 |
| 4.4.4 | <i>Dispersión de resultados</i> | 26 |
| 4.5 | ENSAYO DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA..... | 26 |
| 4.5.1 | <i>Preparación del ensayo</i> | 27 |
| 4.5.2 | <i>Realización del ensayo</i> | 27 |
| 4.5.3 | <i>Estimación del Módulo de Young para bajas deformaciones</i> | 27 |
| 5 | RESULTADOS | 28 |
| 5.1 | ENSAYOS DE DURABILIDAD..... | 28 |
| 5.1.1 | <i>Humedecimiento y secado</i> | 28 |
| 5.1.2 | <i>Congelamiento y deshielo</i> | 28 |
| 5.2 | RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE..... | 29 |
| 5.2.1 | <i>Curvas de tensión-deformación</i> | 29 |
| 5.2.2 | <i>Resistencia a compresión simple en función de la edad</i> | 30 |
| 5.2.3 | <i>Resistencia a compresión simple en función del contenido de cemento</i> | 30 |
| 5.3 | VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA..... | 30 |
| 5.3.1 | <i>Módulo de Young para bajas deformaciones en función de la edad</i> | 31 |
| 5.3.2 | <i>Módulo de Young para bajas deformaciones en función del contenido de cemento</i> | 31 |
| 5.4 | RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE YOUNG PARA BAJAS DEFORMACIONES Y LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN..... | 31 |
| 6 | CONCLUSIONES | 37 |
| | REFERENCIAS | 38 |

SIMBOLOGIA

| | |
|----------------|---|
| AASHTO | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> |
| ARI | Alta Resistencia Inicial |
| C | Porcentaje de cemento |
| CBR | <i>California Bearing Ratio</i> |
| CPN | Cemento Portland Normal |
| CUC | Contenido unitario de cemento |
| DNV | Dirección Nacional de Vialidad |
| E_0 | Modulo de Young para bajas deformaciones |
| EPA | <i>United States Environmental Protection Agency</i> |
| f_c | Resistencia a Compresión Simple |
| f_{max} | Tensión máxima alcanzada en ensayo de compresión |
| HRB | <i>Highway Research Board</i> |
| IP | Índice de plasticidad |
| k | Coefficiente de permeabilidad |
| k_R | Módulo de reacción de la subrasante |
| LP | Límite Plástico |
| LL | Límite Líquido |
| MRS | Moderada Resistencia a los Sulfatos |
| PC | Peso de cemento |
| pH | Potencial Hidrógeno |
| PS | Peso de suelo seco |
| SUCS | Sistema Unificado de Clasificación de Suelos |
| USBR | <i>United States Bureau of Reclamation</i> |
| v_p | Velocidad de propagación de onda compresiva |
| VSR | Valor Soporte Relativo |
| ω | Humedad |
| ω_{opt} | Humedad óptima |
| ϵ_r | Deformación longitudinal específica de rotura |
| γ | <i>Peso específico húmedo</i> |
| γ_d | <i>Peso específico seco</i> |
| μ | Coefficiente de Poisson |

1 INTRODUCCION

Este trabajo se encuadra dentro de un programa de investigación del comportamiento de suelos de la formación Pampeano que reúne distintas tesis de grado realizadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del LaME de la FIUBA.

El objetivo de esta tesis fue evaluar los efectos de la estabilización de un suelo de la formación Pampeano mediante la incorporación de cemento Portland. Para esto se midió la resistencia a compresión simple, la rigidez para bajas deformaciones y otras propiedades físicas; y su evolución a lo largo del tiempo para distintas dosificaciones de cemento.

Mediante la estabilización de suelos se busca mejorar ciertas propiedades del suelo para mejorar su reacción frente a acciones mecánicas y climáticas. Al estabilizar el suelo mediante cemento Portland se consigue un material dotado de cierta rigidez y resistencia, prácticamente insensible al agua y durable.

El suelo-cemento se utiliza principalmente como una de las capas de la estructura de pavimentos. Además se utiliza para protección de taludes, revestimiento impermeable en obras de contención de líquidos, estabilización de fundaciones y otras aplicaciones.

Al mezclar suelo, cemento y agua se producen reacciones químicas debido a la hidratación del cemento y a los productos de ésta con minerales presentes en la fracción arcillosa del suelo. Los productos de estas reacciones generan un material cementante cuyas propiedades dependerán del tipo y cantidad de cemento Portland utilizado y minerales de la fracción arcillosa presentes en el suelo. Por todo esto es que el suelo no es inerte y es necesario estudiar los efectos de la estabilización con cemento Portland para cada suelo en particular.

El suelo utilizado en este trabajo fue un suelo de la formación Pampeano, particularmente es un limo de baja plasticidad proveniente de la localidad de Ranelagh, Provincia de Buenos Aires. El cemento utilizado fue un CPN 40 de moderada resistencia a los sulfatos.

En el segundo capítulo se describen los fines perseguidos por la estabilización de suelos y las técnicas más comúnmente utilizadas.

El tercer capítulo desarrolla algunos aspectos principales de la estabilización mediante la incorporación de cemento Portland. En este capítulo se recoge información de la bibliografía citada acerca de ensayos de caracterización del material y de las aplicaciones y técnicas constructivas del material. En una primera parte se abarcan aspectos generales del suelo-cemento y una descripción de los fenómenos químicos que ocurren al mezclar suelo, cemento Portland y agua. Luego se desarrollan algunas propiedades del suelo-cemento haciendo foco en la re-

sistencia a compresión simple. Por último en este capítulo se describen las distintas aplicaciones del material donde se presentan experiencias recogidas de la bibliografía citada y algunas normas y especificaciones.

En el capítulo cuatro se describe el programa experimental llevado a cabo en este trabajo. Este consistió en la realización de una serie de ensayos de probetas moldeadas con la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo dosificadas con 4, 6, 8 y 10% de cemento a distintas edades. Durante este capítulo se describen los procedimientos llevados a cabo y se presentan los valores registrados durante la dosificación y mezclado, compactación y curado de las probetas. Además se describieron los equipos utilizados y los procedimientos llevados a cabo para los distintos ensayos. Los ensayos realizados fueron de caracterización de los materiales, de durabilidad de “congelamiento y deshielo” y “humedecimiento y secado”, de compresión simple y medición de velocidad de propagación de ondas.

En el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos en el programa experimental. En estos se incluyó las mediciones de pérdida de peso seco de los ciclos de los ensayos de durabilidad para las distintas dosificaciones de cemento. Se trazaron curvas de resistencia a compresión simple, velocidad de propagación de onda compresiva y Módulo de Young para bajas deformaciones en función del tiempo y contenido de cemento.

En el capítulo seis se presentan las conclusiones obtenidas y posibles líneas de investigación con el objetivo de ser encaradas en futuras tesis y así continuar y profundizar la investigación llevada a cabo en este trabajo.

2 ESTABILIZACION DE SUELOS

La estabilización de suelos se practica con el objetivo de modificar propiedades naturales del suelo para mejorar su respuesta frente a las acciones mecánicas y los factores climáticos en forma perdurable. Las propiedades que generalmente se modifican son: resistencia, estabilidad volumétrica, compresibilidad, durabilidad y permeabilidad. Los principales procesos de estabilización se clasifican en: mecánicos, físicos, químicos y físico-químicos. Los métodos prácticos de estabilización pueden involucrar uno o más procedimientos.

La estabilización mecánica consiste en el manipuleo y compactación de los suelos para obtener su densificación. Al aplicar energía mecánica se reducen los vacíos que se encuentran con aire en la masa de suelo lo que aumenta su peso unitario. De esta forma se logra un aumento en la resistencia, en la rigidez, una mejora en la estabilidad volumétrica y una disminución de la permeabilidad del suelo [1].

La estabilización física más practicada es la granulométrica. Esta persigue la obtención de una adecuada granulometría, mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o ambos a la vez. Las partículas más gruesas suministran fricción y dureza, resistencia al impacto y al desgaste. Las intermedias acunamiento de la estructura y las más finas, con la humedad que las rodea, el medio ligante o cohesivo. Con granulometrías más cerradas se obtiene un mayor número de contactos entre partículas lo que aumenta la capacidad portante del suelo y se reduce la permeabilidad. Por el contrario, granulometrías peor graduadas se diseñan por ejemplo para obtener mezclas drenantes.

La estabilización química se logra mediante el intercambio iónico entre los granos del suelo y el producto estabilizante. Un ejemplo es el uso de sales neutras (cloruro de sodio, cloruro de calcio, etc.) que varían la tensión superficial y la presión de vapor de las soluciones de estos productos respecto del agua sin ellos, para mantener la humedad de compactación. Otros productos de estabilización química son ácidos inorgánicos, como el fosfórico o el fluorhídrico, ácidos y sales orgánicas, algunos polímeros, resinas combinadas y algunos desechos obtenidos de la fabricación del papel u otros productos industriales.

La estabilización físico-química produce cambios en las propiedades del suelo mediante la incorporación de cementos orgánicos e inorgánicos y materiales impermeabilizantes. Algunos de los productos que se utilizan son la cal, el cemento Portland y el asfalto y sus subproductos. La selección del agente estabilizante dependerá del fin perseguido. Los materiales arcillosos son los más adecuados para la es-

tabilización con cal, cuando esta se incorpora a un suelo fino se produce un intercambio de cationes, donde el calcio y el magnesio de la cal reemplazan al sodio y al potasio del suelo. Consecuentemente se reduce la tendencia a dilatarse por incrementos del contenido de humedad y se reduce el IP del suelo. Como efecto adicional, la cal causa la floculación de la arcilla y por lo tanto un aumento del tamaño efectivo de grano de suelo. Ciertas arcillas, al mezclarlas con cal, producen reacciones puzolánicas que aumentan la resistencia. Cuando en el suelo hay sílice y alúmina reactiva se observa un aumento de resistencia a largo plazo. Los sedimentos de la llanura pampeana incluyen depósitos eólicos y fluviales de granulometría predominantemente limosa, que poseen una fracción puzolánica capaz de reaccionar con cal en presencia de agua para formar compuestos cementicios. Esta fracción puzolánica se compone de cenizas volcánicas y minerales amorfos o débilmente cristalizados transportados por vientos con circulación suroeste-noreste durante los periodos geológicos de fines del Terciario y el Cuaternario. Estas cenizas y minerales amorfos corresponden a la intensa actividad volcánica explosiva cordillerana registrada en esa misma época. De la composición e importancia de esta fracción puzolánica presente en el Loess Pampeano dependerá el grado de cementación producido por la reacción puzolánica al estabilizarlo con cal. Esta cementación influye notoriamente en la resistencia a la compresión simple, triaxial y otras propiedades geotécnicas [2].

Al estabilizar el suelo con cemento Portland, la hidratación de este produce compuestos que a la vez reaccionan con los minerales arcillosos del suelo generando un material cementante que contribuye a la unión de las partículas de suelo y a estas con el cemento endurecido. Esto da como resultado un material dotado de cierta rigidez y resistencia mecánica, con una mayor estabilidad volumétrica y durabilidad que el suelo primitivo.

Por lo que puede observarse, el suelo no es un material inerte, los materiales arcillosos poseen minerales que reaccionan con los agentes estabilizantes formando nuevos compuestos que modifican sus propiedades. Suelos con igual granulometría y con los mismos límites de Atterberg reaccionarán de modo distinto ante el mismo cemento según los tipos y proporciones de minerales presentes en la fracción arcillosa. Por esto es que es importante estudiar los efectos que provoca el agente estabilizante sobre cada suelo en particular.

3 SUELO-CEMENTO

3.1 Generalidades

El suelo-cemento es un material elaborado a partir de la mezcla de suelo, cemento Portland y agua, la cual es dosificada, compactada y curada de modo de obtener un material endurecido que satisface ciertas propiedades.

Con el agregado de cemento Portland se busca aumentar la resistencia y disminuir la deformabilidad, la permeabilidad y la sensibilidad al agua. Estas mejoras estructurales y de durabilidad crecen con el tiempo y con el incremento del porcentaje de cemento.

El suelo-cemento se utiliza principalmente en la construcción de carreteras; también es utilizado como revestimiento impermeabilizante, en la estabilización de taludes, estabilización de suelo de fundaciones, construcción de ladrillos, y otras aplicaciones menos frecuentes.

El contenido de cemento en la mezcla dependerá de las propiedades buscadas en la estabilización del suelo y del tipo de suelo utilizado. Se define "suelo mejorado o modificado con cemento" cuando el porcentaje de cemento utilizado en la mezcla es bajo (menor al 2%). Estas dosificaciones se aplican generalmente cuando se busca mejorar la estabilidad volumétrica del suelo, no mejorar la resistencia. Para suelos finos plásticos, es recomendable usar cal en lugar de cemento ya que esta es más efectiva y económica para controlar su inestabilidad volumétrica.

Cuando se utilizan cantidades de cemento superiores, generalmente de 5 a 35%, esta metodología se define como "suelo estabilizado con cemento". Al utilizar estas cantidades de cemento se consigue un material dotado de cierta rigidez y resistencia, prácticamente insensible al agua.

3.2 Fenómenos químicos entre el suelo y el cemento Portland

Los fenómenos químicos que ocurren entre el suelo y el cemento Portland, con el apropiado contenido de agua, no están del todo comprendidos y dependen en gran medida del suelo en cuestión y del tipo y proporción de minerales de arcilla que posea. Básicamente y con un enfoque general, los fenómenos químicos en suelos gruesos consisten en reacciones del cemento con componentes silico-aluminosos del suelo que producen conglomerantes que ligan a las gravas, arenas y limos. Además, los hidróxidos de calcio provenientes de la hidratación del cemento liberan iones de calcio muy ávidos de agua que la toman de la que existe entre las laminillas de arcilla. Por lo tanto se consigue una disminución de la pro-

sididad y la plasticidad y un incremento en su resistencia y durabilidad.

En suelos finos, los fenómenos son más complejos. En primer lugar, se produce un efecto primario en el que la hidratación del cemento produce silicatos y aluminatos de calcio hidratados, hidróxidos de calcio e iones de calcio, que elevan la concentración de electrolitos del agua intersticial, aumentando su pH. Luego sucede un segundo proceso que se divide en dos fases. En la primera se produce un intercambio iónico entre los iones de calcio y otros absorbidos por los minerales de arcilla, lo que tiende a floccular las partículas de arcilla. En la segunda fase se producen reacciones puzolánicas, compuestos silícicos y aluminicos reactivos del suelo reaccionan con compuestos cálcicos de la hidratación del cemento formando elementos cementantes. Durante esta segunda etapa se consume hidróxido de calcio que a la vez se repone por el proceso primario de hidratación del cemento (se libera entre un 12% y 18% de hidróxido de calcio). En las superficies expuestas al aire se produce un efecto de cementación adicional entre las arcillas debido a la carbonatación del calcio [3].

3.3 Materiales

3.3.1 Suelo

Todos los suelos pueden estabilizarse con cemento Portland con excepción de los suelos muy plásticos, de alto contenido de materia orgánica o con un alto contenido de sales nocivas para el cemento.

Existen distintas normas que limitan ciertas características del suelo para su uso en suelo-cemento, estas en general coinciden en limitar su granulometría y plasticidad. La finalidad de los límites indicados por las diferentes normas es la de obtener mezclas económicas y durables. Al utilizar suelos granulares, el pulverizado y mezclado es más efectivo, lo que implica un porcentaje de cemento menor y por lo tanto una mezcla más económica. Se considera que los suelos con entre un 5% y un 35% de partículas que pasan el tamiz #200 (75mm) producen las mezclas de suelo-cemento más económicas. Aún así es posible obtener mezclas económicas con suelos con un alto contenido de finos y baja plasticidad.

Los suelos finos generalmente requieren mayores porcentajes de cemento para satisfacer las exigencias buscadas. Suelos muy plásticos (con índice de plasticidad mayor a 8) tienen tendencia a producir terrones que no son desmenuzados durante el mezclado y que luego, en servicio, se "lavan" debilitando la estructura del material.

En arenas o gravas uniformemente graduadas, la utilización de suelos con contenido de finos alto (material que pasa el tamiz #200) y de baja plasticidad pueden llegar a ser beneficiosos, llenando vacíos

de la estructura granular y ayudando a reducir el porcentaje de cemento en la mezcla.

Los suelos con un porcentaje de materia orgánica mayor al 2% se consideran no aptos para su uso en mezclas de suelo-cemento. Existen ciertos tipos de materia orgánica que pueden llegar a inhibir el desarrollo normal de endurecimiento.

Las partículas de suelo presentes en el suelo-cemento no pueden considerarse como partículas inertes. La mezcla entre agua, cemento y las soluciones presentes en minerales de arcilla del suelo se combinan formando nuevos compuestos dependiendo del tipo de cemento y suelo. Estas reacciones químicas producen cambios en las propiedades del suelo-cemento a corto, mediano y largo plazo.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de evaluar la aptitud de un suelo para su uso en mezclas de suelo-cemento es el contenido de sulfatos. Es conocido el efecto negativo de los sulfatos en la calidad del cemento Portland endurecido. La resistencia de suelo-cemento al ataque de sulfatos depende de si el suelo en cuestión es de granulometría predominantemente gruesa o fina y depende del contenido de arcilla y la concentración de sulfatos. Estudios de Cordon y Sherwood (ver referencias [4] y [5]) muestran como las reacciones entre los minerales de arcilla y los sulfatos son más nocivas que las reacciones entre los sulfatos y el cemento. Esto hace que el deterioro en suelos finos sea más rápido que en suelos gruesos. Además, de esos estudios se desprende que ante presencia de sulfatos es más efectivo aumentar el contenido de cemento antes que cambiar a un cemento del tipo resistente a los sulfatos.

3.3.2 Cemento Portland

El tipo de cemento a utilizar dependerá de las propiedades deseadas en la mezcla y del tipo de suelo, mientras que la cantidad será función de si se busca modificar o estabilizar el suelo. En principio cualquier tipo de cemento Portland se puede utilizar. Generalmente se utiliza CPN (Cemento Portland Normal). En ciertos casos se busca disminuir el efecto dañino de las reacciones entre los sulfatos y el cemento usando MRS (moderada resistencia a sulfatos). Cuando la mezcla se produce y se coloca en climas fríos es conveniente el uso de cementos del tipo ARI (alta resistencia inicial) o bien los que contienen como aditivo el cloruro de calcio (ver [6]). Los cementos ARI, al tener mayor finura, tienen mayor reactividad lo que permite obtener mayor resistencia para algunos suelos.

3.3.3 Agua

El agua se incorpora a la mezcla a fin de alcanzar la humedad y el peso unitario seco especificados en la compactación y de hidratar el cemento. El agua correspondiente a la humedad óptima normalmente es bastante superior a la necesaria para la completa hidratación del cemento.

Se especifica agua potable o relativamente limpia, sin cantidades nocivas de ácidos, álcalis o materia orgánica. También se ha utilizado agua de mar en forma satisfactoria; la presencia de cloruros incrementa la resistencia a edad temprana.

3.3.4 Aditivos y adiciones

El aditivo más comúnmente utilizado es el retardador de fraguado, este se utiliza cuando el suelo-cemento es elaborado en planta y las condiciones climáticas son desfavorables o las distancias a transportar son considerables.

Las adiciones más utilizadas son puzolanas y cenizas volantes, estas incrementan la resistencia a largo plazo y optimizan la dotación de cemento. La desventaja de utilizar estas adiciones es la menor resistencia inicial, lo que resulta en una mayor fisuración.

3.4 Propiedades

Las propiedades del suelo-cemento dependen de varios factores: proporción y tipo de suelo, cemento y agua, compactación, uniformidad del mezclado, curado y edad. Debido al alto número de factores que intervienen, los valores representativos de las propiedades del suelo-cemento se encuentran dentro de un rango amplio.

3.4.1 Densidad

Generalmente se mide la densidad seca, y se usa como parámetro de diseño y de control de calidad en obra. Al incorporarle cemento al suelo original varía la curva densidad-humedad (Figura 1) para una misma energía de compactación, y por lo tanto su humedad óptima y densidad seca máxima.

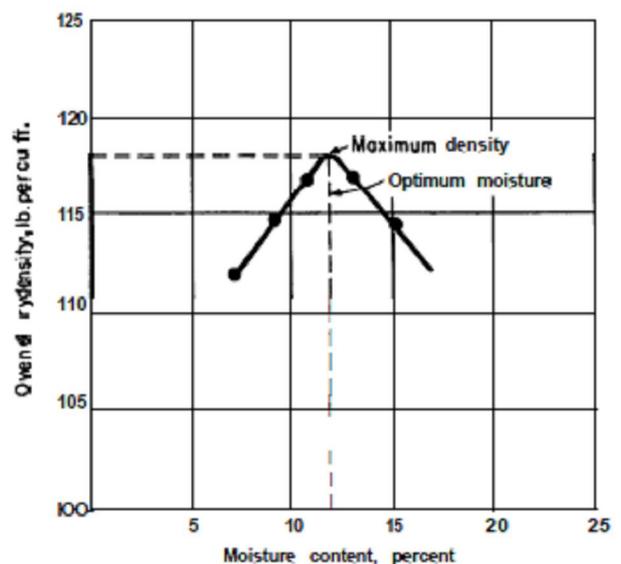


Figura 1: Curva de densidad-humedad típica [7].

Este cambio, sin embargo, no es fácilmente predecible. El efecto floculante del cemento tiende a producir un aumento de la humedad óptima y una disminución de la densidad seca máxima, mientras que el

alto peso específico del cemento relativo al suelo produce un incremento de la densidad [7].

A mayor tiempo transcurrido entre el mezclado y la compactación menor será la densidad obtenida. Este efecto puede disminuirse mediante mezclados intermedios y con contenidos de humedad algo mayores que el óptimo. Cuanto mayor sea la densidad, mayor será la resistencia, por lo que el tiempo transcurrido entre el mezclado y la compactación interviene en el valor de resistencia.

Para un mismo contenido de cemento, si se incrementa la energía de compactación se obtienen densidades mayores. Por lo tanto, para alcanzar una determinada resistencia, será necesario un menor contenido de cemento de incrementarse la energía de compactación.

3.4.2 Resistencia a compresión simple

Esta propiedad es la más utilizada por las normas y especificaciones que refieren al suelo-cemento para diseño de mezclas y control de calidad. Su valor es un indicador del grado de reacción de la mezcla entre suelo, cemento y el agua y del nivel de endurecimiento. La resistencia a compresión no confinada se obtiene mediante un ensayo simple en relación al ensayo necesario para la determinación de otros parámetros como por ejemplo la rigidez o la resistencia a flexión. Es por eso que resulta muy útil conocer la relación entre este parámetro y el resto, de modo de usarla para medir indirectamente otras propiedades.

En términos generales, la resistencia a compresión simple aumenta progresivamente con el tiempo y con el contenido de cemento.

En la Tabla 1 (obtenida de la referencia [7]) figuran rangos típicos de resistencia a 7 y 28 días de edad para probetas saturadas previamente al ensayo.

Tabla 1: Valores Típicos de Resistencia a compresión simple a 7 y 28 días [7].

| Tipo de Suelo (SUCS) | $f_c^{7\text{días}}$ | $f_c^{28\text{días}}$ |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|
| | MPa | MPa |
| GW GC GP GM SW SC SP SM | 2.1 – 4.2 | 2.8 – 7.0 |
| ML CL | 1.8 – 3.5 | 2.1 – 6.3 |
| MH CH | 1.4 – 2.8 | 1.8 – 4.2 |

Al utilizar suelo-cemento en estructuras de pavimento se suele exigir para sub-rasantes mejoradas una resistencia a compresión mínima a los 7 días de 1.5MPa y entre 2.0 y 2.5 MPa para bases y sub-bases de suelo-cemento.

La resistencia mecánica suele evaluarse también con mayor representatividad mediante un ensayo triaxial. No suele medirse la resistencia mecánica del suelo-cemento con ensayo CBR (o VSR) debido a que los valores obtenidos son tan altos que su interpretación se hace poco clara.

Son varios los factores que influyen en la resistencia a compresión simple: el tipo y contenido de

suelo, cemento y agua, densidad, humedad, eficiencia en el mezclado, compactación y curado, forma y tamaño de la probeta, entre otros.

A continuación se desarrollan algunos factores que influyen sobre la resistencia a compresión.

3.4.2.1 Influencia de la granulometría

De la Figura 2 [8] se ven tres tipos de mezcla, con distintas granulometría, la mezcla B está bien graduada mientras que la A y la C son más uniformes. La mezcla A es predominantemente gruesa y en la C predomina la fracción fina. Todas las mezclas fueron dosificadas con 3% en peso de cemento Portland. De la curva de la Figura 3 [8] se observa como granulometrías mejor graduadas son más resistentes. Por lo tanto mezclas bien graduadas necesitan menor contenido de cemento que aquellas más uniformes.

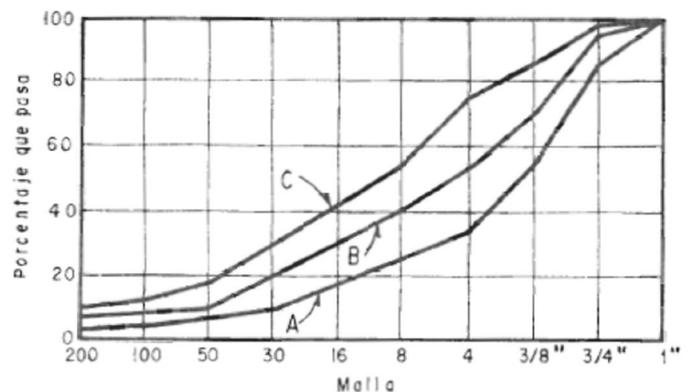


Figura 2: Distintos tipos de granulometría usadas en ensayos de resistencia a compresión simple [8].

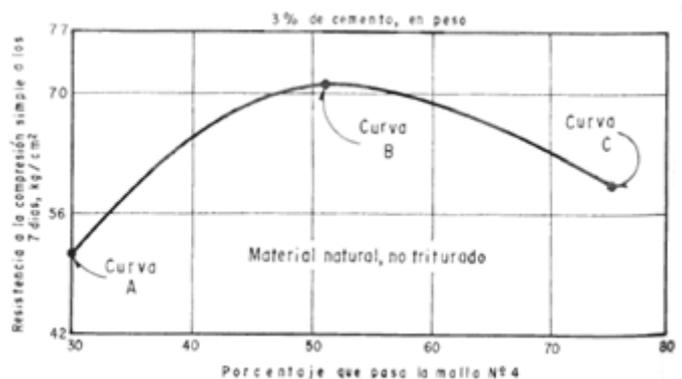


Figura 3: Efecto de la distribución granulométrica en la resistencia a compresión simple [8].

3.4.2.2 Influencia del peso volumétrico

En la Figura 4 [8] se observa para distintos suelos arenosos (1-4,6) y mezclas de grava y arena (5) la influencia del peso volumétrico alcanzado por la compactación en la resistencia a compresión simple. A mayor peso volumétrico se observan valores mayores de resistencia. Los valores bajos de resistencia que figuran en el gráfico, son debidos al bajo contenido de cemento (3%).

De la Figura 5 [9] se observa información análoga pero para el caso de una arcilla estabilizada con 10% de cemento.

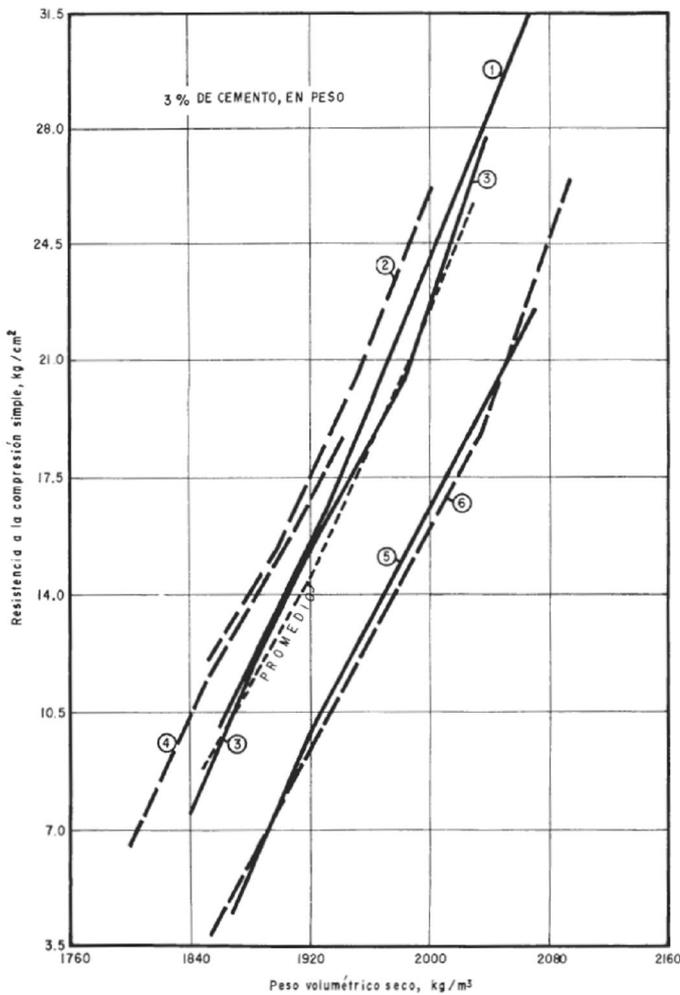


Figura 4: Efecto del peso volumétrico en la resistencia a compresión simple en arenas y gravas [8].

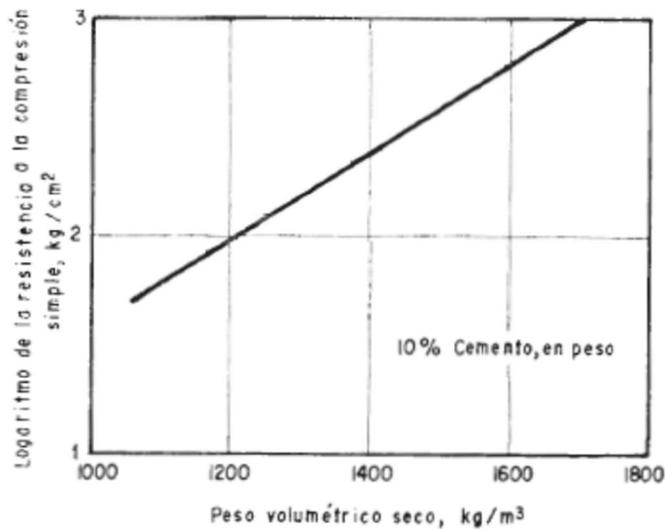


Figura 5: Efecto del peso volumétrico en la resistencia a compresión simple para arcillas [9].

3.4.2.3 Influencia del contenido de cemento Portland

La Figura 6 [9] muestra la variación de la resistencia a compresión simple con distintos contenidos de cemento. La resistencia aumenta casi linealmente aunque la pendiente varía mucho según el tipo de suelo.

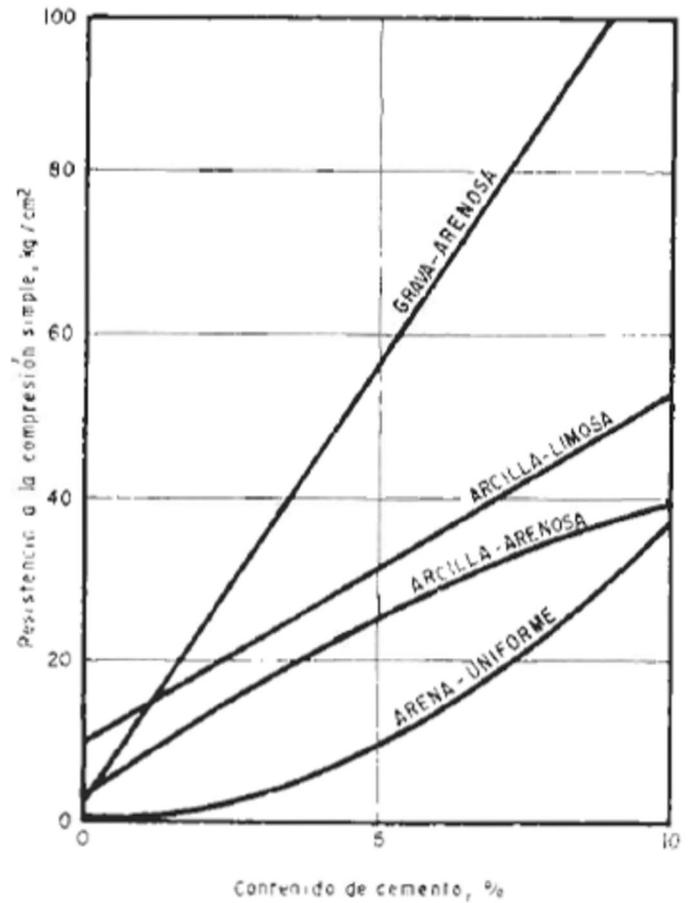


Figura 6: Resistencia a compresión simple según el porcentaje de cemento de distintos suelos [9].

3.4.2.4 Influencia del tiempo de atraso en la compactación

Cuanto mayor sea el tiempo transcurrido entre la mezcla de suelo y la compactación, menor será la resistencia de ese suelo-cemento. Este fenómeno mostrado en la Figura 7 (referencia [8]) se explica por la pérdida de humedad debido al intercambio de agua con la atmósfera y por las reacciones del suelo y del cemento al hidratarse que modifica la densidad seca del suelo al momento de la compactación.

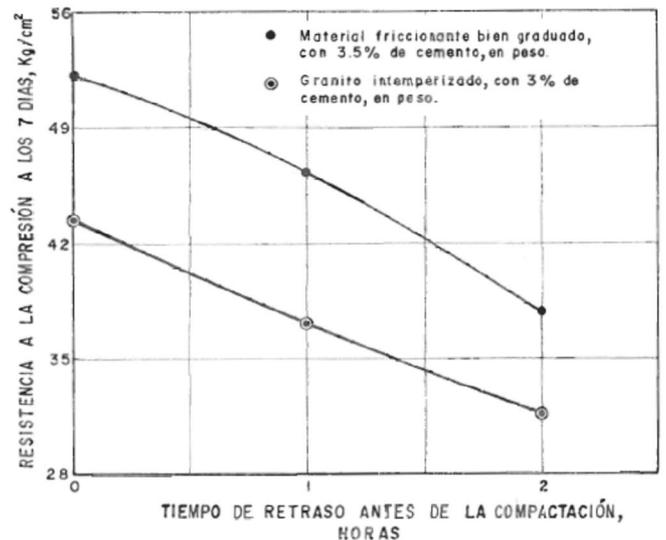


Figura 7: Resistencia a compresión simple en función del tiempo de atraso de la compactación [8].

Cuantificar esta pérdida de resistencia es útil en obra, porque el tiempo transcurrido entre el mezclado y la compactación depende de la logística de maquinaria.

Evidentemente la pérdida de resistencia será mayor en climas más secos, y dependerá de la mezcla de suelo-cemento. La referencia [9] hace ver que la pérdida de resistencia por tiempo de retraso en la compactación crece cuanto mayor es el contenido de cemento en la mezcla.

3.4.2.5 Influencia del tiempo y condiciones de curado

La Figura 8 muestra la ganancia de resistencia en función del tiempo de curado.

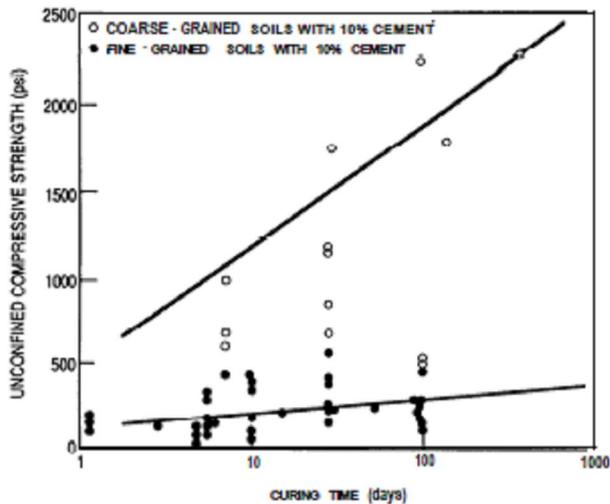


Figura 8: Resistencia a compresión simple en función del tiempo de curado [10].

La ganancia de resistencia es mayor para suelos gruesos que para suelos finos. La resistencia crece considerablemente los primeros 90 días, de una a tres veces el valor a los 7 días, dependiendo del tipo de suelo y del contenido de cemento, y luego continúa su crecimiento en forma más lenta. El crecimiento lineal de resistencia observado en la Figura 8 se debe a la escala logarítmica del tiempo de curado utilizada.

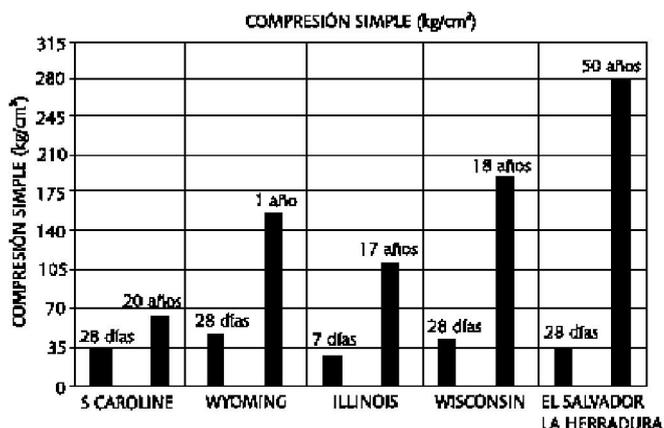


Figura 9: Ganancia de resistencia a compresión a largo plazo [11].

La Figura 9 [11] presenta valores de resistencia a compresión en proyectos evaluados a muy largo plazo donde puede observarse ganancias de resistencia de hasta 8 veces entre los 28 días y 50 años de edad.

En la Figura 10 [8] se observa para un suelo fino y otro granular, ambos con 4% de cemento, el efecto de la temperatura combinado con el tiempo de curado. Este gráfico muestra la mayor facilidad en conseguir resistencias mayores cuando el curado se realiza en épocas más calurosas.

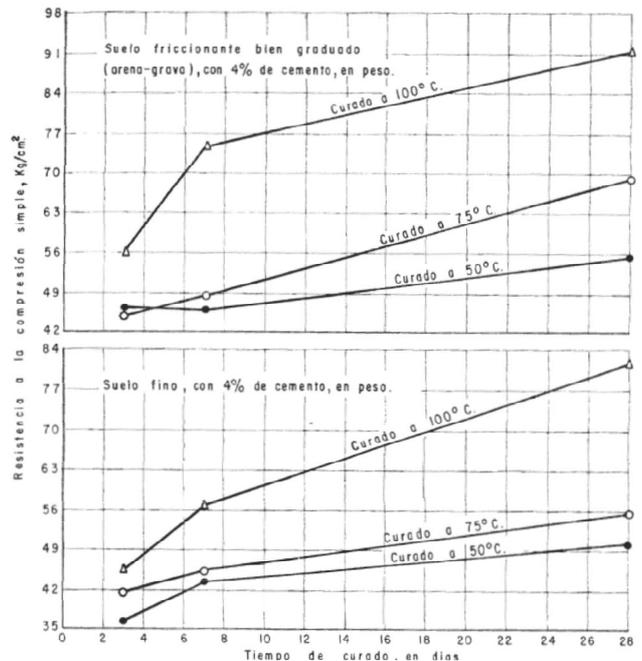


Figura 10: Influencia de la temperatura de curado en la resistencia a compresión [8].

3.4.2.6 Influencia del contenido de humedad

Un mayor contenido de humedad en la mezcla al momento del ensayo de compresión simple significa menor resistencia.

La Figura 11 muestra, para distintos contenidos de cemento, la diferencia de resistencia a compresión simple de una arcilla poco plástica en un caso compactada y ensayada con la humedad óptima y en el otro sumergida en el agua antes de ensayar. Esta disminución de resistencia probablemente se explique por el desarrollo de presiones internas de poro a medida que se incrementa la carga y al mayor volumen de gel que disminuye la unión de partículas sólidas.

En las distintas normas se especifica sumergir la probeta de suelo-cemento antes del ensayo de compresión debido a que representa la peor condición y probablemente el material se encuentre gran parte de su vida útil saturado.

En la Figura 11, además, puede verse como para contenidos mayores de cemento la diferencia de resistencia es menor tendiendo a ser muy similares y por lo tanto prácticamente insensible al agua.

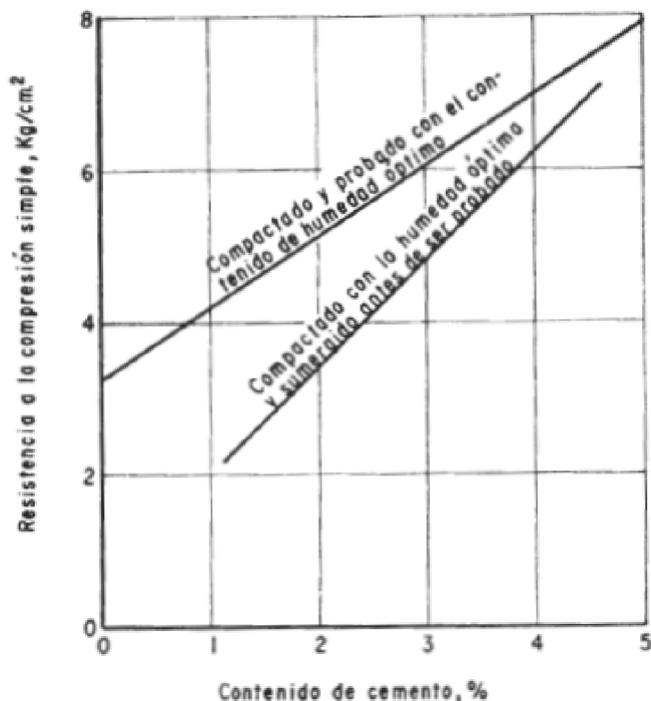


Figura 11: Influencia del contenido de humedad en la resistencia a compresión simple [9].

3.4.3 Resistencia a Flexión

La resistencia a (tracción por) flexión se mide mediante ensayos de viga (ASTM D1635), tracción directa y tracción por compresión diametral, dando resultados distintos según el tipo de ensayo debido al efecto de concentración de tensiones. Distintos autores coinciden que la resistencia a la flexión es del orden de entre 1/3 y 1/5 de la resistencia a la compresión.

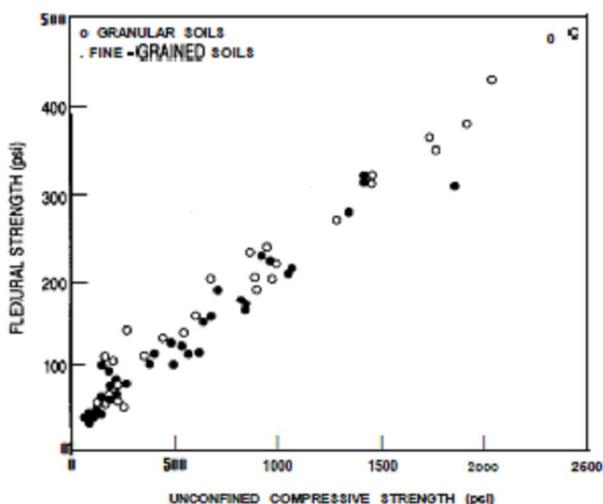


Figura 12: Relación entre resistencia a flexión y resistencia a compresión simple [10].

En la Figura 12 se observa que la relación es mayor para mezclas de baja resistencia (mayor a 1/3 de f_c) o menor para mezclas de alta resistencia (menor a 1/5 de f_c).

3.4.4 Rigidez

La rigidez del suelo-cemento depende de los mismos factores que la resistencia a compresión, y al

igual que esta última, su valor crece para mayores contenidos de cemento Portland y mayores edades. Al igual que el coeficiente de Poisson, su magnitud varía mucho dependiendo principalmente del tipo y cantidad de suelo y cemento. Valores típicos del Módulo de Young para mezclas de suelo-cemento con una cierta proporción de elementos granulares varía de 4 a 7GPa [11].

3.4.5 Retracción

El suelo-cemento se retrae durante el secado debido a intercambio de humedad con la atmósfera y el consumo de agua para la hidratación del cemento. Al retraerse el material se generan tensiones debido a la fricción entre la capa de suelo cemento y la capa subyacente. Estas tensiones alcanzan la resistencia a tracción del suelo-cemento a edad temprana y producen fisuras.

La retracción y su posterior fisuración es función del tipo y contenido de cemento, tipo de suelo, clima, cantidad de agua utilizada, curado y rozamiento entre la capa de suelo-cemento y la subyacente. Cuanto mayor sea el contenido de cemento, mayor será la tendencia a la fisuración.

Según un estudio realizado en Australia [12], el tipo de suelo es condicionante del patrón de fisuración. Se observó que al estabilizar suelos arcillosos se desarrollaron más fisuras aunque de menor ancho y separación que al estabilizar suelos gruesos.

Al utilizar suelo-cemento en estructuras de pavimentos flexibles, la fisuración por retracción se puede reflejar en las capas superiores, por lo que se limita el contenido de cemento (se especifica una resistencia a compresión simple máxima a los 7 días de aproximadamente 3.5MPa) o se construye con técnicas que minimicen la reflexión de fisuras, como por ejemplo la prefisuración. Limitar el CUC mediante la resistencia a compresión no es suficiente para prevenir fisuraciones excesivas ya que no considera el resto de los parámetros que intervienen.

Las fisuras por retracción del material incrementan la permeabilidad, por lo que cuando se usa suelo-cemento como revestimiento es importante minimizar la formación de estas o controlar su ancho.

3.4.6 Permeabilidad

La permeabilidad del suelo-cemento disminuye al aumentar el contenido de cemento. Los factores más influyentes son el tipo y contenido de suelo y cemento y la compactación lograda. Esta propiedad es parámetro de diseño cuando el material se utiliza con fines de impermeabilización como en cimentaciones de rellenos sanitarios, estanque u otras obras de almacenamiento de líquidos. Las mezclas con suelos finos suelen ser las más impermeables. Valores típicos de k , para suelo-cemento con suelos arenolimosos suelen estar entre $0.4 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ y $3.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$. Para estos valores el porcentaje de cemento utilizado es menor al 5% [11].

3.4.7 Resistencia a la abrasión

El suelo-cemento es un material con buena capacidad para resistir esfuerzos perpendiculares a la superficie pero muy deficiente para resistir fuerzas abrasivas. En muchas de sus aplicaciones el suelo-cemento es sometido a esfuerzos de abrasión, como por ejemplo el del tráfico vehicular en caso de actuar como carpeta de rodamiento en pavimentos o el del agua al ser utilizado como revestimiento de canales o diques. Cuando esta propiedad interviene en el diseño de las mezclas, como en el caso de las aplicaciones antes mencionadas, se la evalúa mediante ensayos de durabilidad como el de “humedecimiento y secado” y “congelamiento y deshielo”. En ellos se somete al material a ciclos de desgaste abrasivo bajo condiciones de exposición extremas.

La resistencia a la abrasión del suelo-cemento es mayor al utilizar suelos granulares no plásticos y al aumentar el contenido de cemento.

3.5 Aplicaciones

La aplicación principal del suelo-cemento es su uso en estructuras de pavimentos. Además se utiliza para la estabilización de taludes en la construcción de presas o terraplenes, revestimiento de canales y obras de almacenamiento de líquidos, estabilización de fundaciones y otras aplicaciones.

El diseño de la mezcla en cada caso será función de las propiedades a prestar en servicio.

3.5.1 Suelo-cemento en Pavimentos

3.5.1.1 Generalidades

El inicio del uso suelo-cemento en estructuras de pavimentos se remonta a 1915 y aún hoy es uno de los métodos más utilizados para la estabilización de suelos en obras viales. La gran experiencia que se tiene en la construcción y diseño de estas mezclas permite obtener un material durable y con buenas propiedades mecánicas respecto a otros materiales usados en pavimentos para las mismas funciones.

El suelo-cemento se utiliza tanto en pavimentos flexibles como en pavimentos rígidos. En los primeros se coloca en una de las capas que se ubican por debajo de la carpeta superior de rodamiento de concreto asfáltico y cumple la función de distribuir la carga a la capa subyacente. Cuando el suelo-cemento se utiliza en pavimentos rígidos, éste se coloca por debajo de la losa de hormigón y su función es la de proveer una superficie uniforme, estable y no bombeable. El bombeo de suelo en pavimentos sucede en presencia de tránsito pesado y frecuente, cuando el suelo es susceptible a entrar en suspensión y hay presencia de agua. La colocación de suelo-cemento soluciona este problema ya que cumple la condición de ser no bombeable. Además, debido a su rigidez, la capa de suelo-cemento hace que sean menores las deflexiones de la losa, lo que disminuye

las tensiones producidas en ésta, lo que equivale a un menor consumo de fatiga y por lo tanto alarga la vida útil del pavimento. Este último efecto de la rigidez del suelo-cemento se tiene en cuenta en los métodos de diseño de espesores de losa al considerar un k_R (Módulo de reacción de la subrasante) mayor. El coeficiente k_R no se refiere solamente a la capa de suelo-cemento, sino al conjunto de capas que subyacen a la capa de hormigón. Este incremento del k_R compuesto puede observarse en la Figura 13 [13].

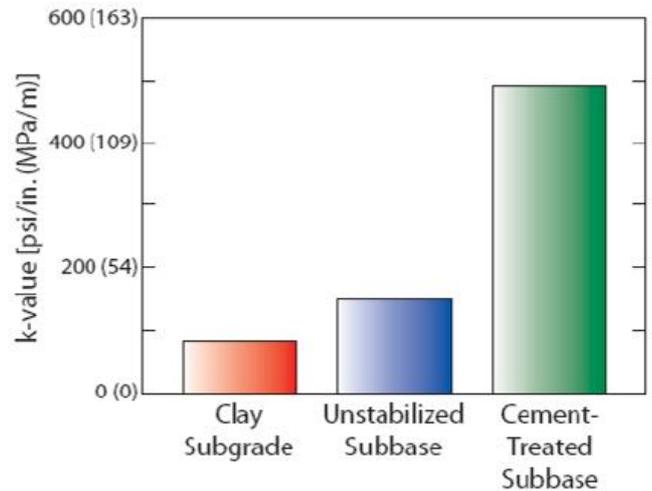


Figura 13: Incremento del módulo de reacción de la subrasante k en suelos estabilizados con cemento Portland [13].

Además, como se muestra en la Figura 14, al colocar una capa de suelo-cemento se evitan deformaciones permanentes por cargas pesadas y se logra mejor eficiencia en la transferencia de cargas en juntas, lo que reduce las intervenciones por mantenimientos y por lo tanto reduce costos.

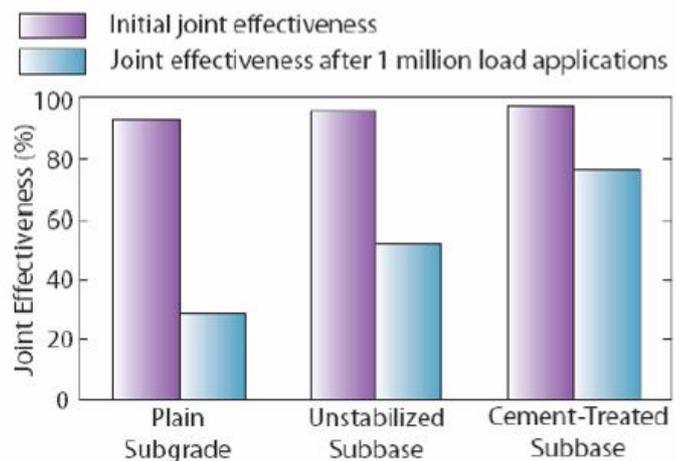


Figura 14: Mayor eficiencia en la transferencia de cargas en juntas lograda mediante la estabilización con cemento Portland [13].

Otro motivo por el que se utiliza una capa de suelo-cemento debajo de la losa de hormigón en pavimentos rígidos es a fin de proveer una plataforma estable y firme donde trabajen los equipos y maquinaria durante la colocación de la losa. Así se logra disminuir

las demoras por malas condiciones climáticas lo que aumenta el rendimiento de los equipos.

En caminos rurales o pre-urbanos, con tránsito liviano y de baja frecuencia, no es necesario la colocación de pavimentos del tipo superior (hormigón o concreto asfáltico); para estos casos, la estabilización del suelo local con cemento Portland resulta una muy buena solución técnica y de bajo costo inicial y de mantenimiento (Figura 15, [14]). Los caminos de tierra o enripiados, al no poseer ligante, son menos durables, más deformables y más sensibles al agua que el suelo-cemento. Además, al estabilizar el suelo local se logra mayor economía al evitar los altos costos de transporte de suelo seleccionado, y menor impacto ambiental por explotación de canteras.

El porcentaje de cemento en las mezclas de suelo-cemento para carpetas de rodamiento se diseña para soportar las cargas y el desgaste producido por el tránsito y ronda por lo general entre el 11 y 20%.

En Argentina existen varios casos de mejorados de suelo-cemento dentro de la red vial no pavimentada, logrando transitabilidad en los días de lluvia y por lo tanto solucionando el problema del transporte rural. Este aspecto es importante en especial cuando se trata de productos perecederos como el caso de cuencas lecheras [14].



Figura 15: Fotografía de camino rural con carpeta de rodamiento de suelo-cemento [14].

3.5.1.2 Ventajas y Limitaciones

Las propiedades medidas en testigos de suelo-cemento a muy largo plazo (Figura 9, referencia [11]) demuestran la buena durabilidad y evolución a lo largo del tiempo del material. Esta ventaja significa menores intervenciones de mantenimiento y por lo tanto menor costo total de la estructura del pavimento.

La gran mayoría de los suelos son aptos para ser estabilizados con cemento Portland. El hecho de estabilizar el suelo local implica ventajas económicas debido al ahorro del alto costo de transporte de los materiales de préstamo y al mayor rendimiento obtenido. Además, la estabilización del suelo local reduce el impacto ambiental al evitar la explotación intensiva y progresivo agotamiento de yacimientos.

Otra ventaja de suelo-cemento frente a los estabilizados granulares es su mayor resistencia y mejor distribución de cargas (Figura 16, [11]), lo que permite menores espesores de diseño que significan mayores rendimientos y menor costo inicial.

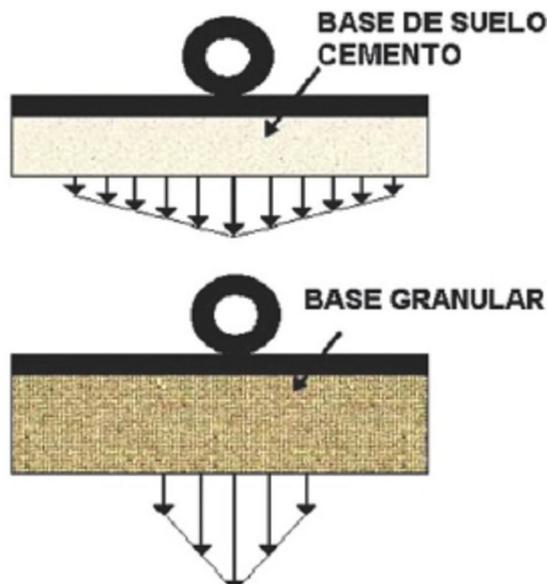


Figura 16: Distribución de esfuerzos para capas de suelo-cemento y estabilizado granular según PCA [11].

La gran tendencia a fisuración por retracción de las capas de suelo-cemento representa una desventaja cuando es utilizada en pavimentos flexibles ya que estas pueden reflejarse a las capas superiores. Sin embargo es posible controlar la reflexión de fisuras mediante una correcta dosificación, técnicas de pre-fisuración o aumentando el espesor de la carpeta asfáltica.

El tiempo inicial de fraguado del cemento limita el tiempo de ejecución de las capas de suelo-cemento siendo este un factor restrictivo en la logística de equipos y maquinaria. De ser necesario, se suelen utilizar aditivos retardadores de fraguado para alargar el tiempo disponible para la construcción.

Otra limitación del suelo-cemento es su incapacidad de resistir los esfuerzos abrasivos para demandas altas de tránsito, lo que hace necesario la construcción de capas de rodamiento superiores.

3.5.1.3 Diseño de mezclas

Los requisitos principales de mezclas de suelo-cemento endurecido son de resistencia y durabilidad.

Para proyectos donde el suelo-cemento cumpla la función de impermeabilizar, el requisito más importante es el de la permeabilidad.

Mediante ensayos de laboratorio se determina para el suelo en cuestión el contenido de cemento y de agua y la densidad necesarias para cumplimentar las exigencias de proyecto.

En general, las especificaciones de cada país exigen valores mínimos de resistencia mediante un ensayo de compresión a 7 días y valores de pérdida en

peso máxima para ensayos de durabilidad de humedecimiento y secado, y congelamiento y deshielo.

En la Tabla 2 (obtenida de [7]) figuran los contenidos de cemento típicos según el tipo de suelo a estabilizar.

Tabla 2: Valores típicos de contenido de cemento según tipo de suelo [7].

| Tipo de Suelo (HRB) | Tipo de Suelo (SUCS) | Rango de %CP en peso típico |
|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| A1a | GW GP GM SW SC SP SM | 3-5 |
| A1b | GM GP SM SP | 5-8 |
| A2 | GM GC SM SC | 5-9 |
| A3 | SP | 7-11 |
| A4 | CL ML | 7-12 |
| A5 | ML MH CH | 8-13 |
| A6 | CL CH | 9-15 |
| A7 | MH CH | 10-16 |

El pliego de especificaciones técnicas generales de la DNV para subbases o bases de suelo-cemento, exige un contenido de cemento en la mezcla tal que la pérdida en peso para los ensayos de durabilidad no supere ciertos límites transcritos en la Tabla 3 [19].

Tabla 3: Porcentajes de pérdida de peso máximo en ensayos de durabilidad según tipo de suelo [19].

| Tipo de Suelo (HRB) | % pérdida de peso máximo en ensayos de durabilidad |
|---------------------|--|
| A1 A2-4 A2-5 A3 | 14 |
| A2-6 A2-7 A4 A5 | 10 |
| A6 A7 | 7 |

Una vez determinado el contenido de cemento mínimo mediante ensayos de durabilidad debe ensayarse la mezcla a compresión simple a fin de verificar que la resistencia a los 7 días sea superior a la especificada en los pliegos de especificaciones técnicas particulares. La resistencia a compresión simple mínima especificada a los 7 días es por lo general de 2.0 a 2.5 MPa para bases o subbases. Por lo general también se limita la resistencia a compresión máxima en aproximadamente 3.5 MPa a fin de limitar el CUC de la mezcla y así controlar la fisuración de la capa de suelo-cemento.

La norma VN-E20 “Determinación del dosaje para ensayar mezclas de suelo-cemento” detalla el procedimiento a seguir para determinar el contenido de cemento Portland con que deben ensayarse las mezclas de suelo-cemento. Los pasos que sigue este procedimiento son: 1) se determina la humedad óptima de moldeo mediante un ensayo de compactación según la norma VN-E19 para un contenido de cemento inicial dado por la norma según el tipo de suelo. 2) se fijan los porcentajes de cemento con los cuales se ejecutarán los ensayos de durabilidad y compresión

simple en función del peso específico seco máximo obtenido en el paso anterior y la granulometría del suelo.

3.5.1.4 *Proceso constructivo*

El objetivo principal del procedimiento constructivo es el de obtener un material adecuadamente mezclado, compactado y curado que cumpla con los requerimientos exigidos. Los métodos constructivos de la capa de suelo-cemento son varios y varían desde los de menor rendimiento, con procedimientos manuales, hasta los de mayor rendimiento mezclados en planta y colocados con terminadora. A continuación se describirán las etapas de ambos métodos.

La primera etapa del método constructivo de mezclado en el lugar es la de escarificación de la superficie (Figura 17, [11]).



Figura 17: Equipo escarificador-reciclador [11].

Durante esta etapa se busca disgregar la superficie hasta la profundidad especificada a fin de facilitar el mezclado con el cemento y el agua y su posterior compactación.

La segunda etapa consiste en la distribución del cemento. Esta se realiza de forma manual (Figura 18, [11]) o mediante un camión distribuidor (Figura 19, [11]).



Figura 18: Distribución manual del cemento [11].

El primer método consiste en la distribución de bolsas de cemento Portland a lo largo del camino separadas según la dosificación buscada y luego abiertas por operarios para esparcir el cemento. La distribución por camión dosifica el cemento según la abertura del esparcidor y la velocidad del vehículo.



Figura 19: Camión distribuidor de cemento [11].

La tercera etapa es la distribución del agua. El agua necesaria para alcanzar la humedad óptima es distribuida mediante un camión regador (Figura 20, [11]) que cumple la función de transportar el agua hasta el lugar y la libera uniformemente a través de orificios calibrados en función de la velocidad del camión.



Figura 20: Camión regador [11].

La cuarta etapa es la de mezclado. Uno de los métodos, de bajo rendimiento, es el mezclado con motoniveladora (Figura 21, [11]). Se necesitan varias pasadas de ésta, debiendo inspeccionarse permanentemente zonas de variación de color que indican falta de homogeneidad. El mezclado con motoniveladora debe utilizarse en obras chicas ya que se necesita un operador con gran experiencia para conseguir una adecuada homogeneidad de la mezcla.



Figura 21: Mezclado del suelo, cemento y agua mediante motoniveladora [11].

La quinta etapa es la compactación. Esta consiste en la densificación de la mezcla hasta conseguir la den-

sidad especificada mediante pasadas de equipos compactadores. El número de pasadas necesarias se determina previamente en un tramo de prueba.

La compactación se realiza mediante rodillo liso (Figura 22, [11]) o “pata de cabra” (Figura 23, [11]) según el tipo de suelo.



Figura 22: Compactación mediante rodillo liso [11].



Figura 23: Compactación mediante rodillo “pata de cabra” [11].



Figura 24: Riego de membrana asfáltica de curado [11].

La sexta y última etapa consiste en el curado. Esta se logra mediante el riego continuo de agua luego de la compactación y terminación realizado por un camión regador al menos dos veces por hora o la colocación de una membrana asfáltica (Figura 24, [11]). Esta última consiste en el riego de una emulsión asfáltica sobre la capa de suelo-cemento de modo de lograr una membrana que impida la rápida evaporación del agua en la mezcla [11].

Todas las etapas constructivas antes descritas deben realizarse antes del tiempo inicial de fraguado, este lapso ronda por lo general las 2 horas a partir del contacto entre el cemento y el agua.

Posteriormente a los 7 días de curado puede realizarse la apertura al tráfico general o público.

La eficiencia lograda en las etapas constructivas descritas anteriormente define la calidad del material final. Suelen utilizarse equipos que realizan varias etapas a la vez, obteniendo así un mejor control de calidad, un ejemplo es el uso del “pulvi-mixer”.



Figura 25: Planta de fabricación de suelo-cemento [11].



Figura 26: Colocación del suelo-cemento mediante terminadora [11].

Para lograr altos rendimientos, mejor control de calidad y mayor seguridad ambiental se elabora la mezcla de suelo-cemento en planta (Figura 25, [11]) y luego se transporta mediante camiones hasta el lugar de trabajo. En general se busca que el tiempo de transporte no supere los 30 minutos, salvo que se use retardador de fraguado. Luego el material es colocado mediante terminadoras o distribuidores dándole el espesor de proyecto más un cierto incremento debido a la posterior compactación (Figura 26, [11]).

Por último, la compactación y curado se realizan del mismo modo que en el método de mezclado en el lugar.

3.5.2 Protección de taludes

El suelo-cemento para protección de taludes empezó a utilizarse en Estados Unidos luego de la segunda guerra mundial. Este material reemplazó a los revestimientos de fragmentos de rocas sueltas, principalmente porque al estabilizar el suelo local se logra el ahorro de los altos costos de transporte de material.

En 1951, el USBR construyó una sección de prueba a escala natural. Esta sección fue ubicada en la playa sureste del lago de la presa Bonny en el este de Colorado, por las severas condiciones de servicio creadas por las olas y la nieve, con más de cien ciclos de congelación y deshielo a lo largo del año. A partir de los resultados exitosos registrados durante varios años en esa experiencia es común el uso de suelo-cemento para protección de taludes en obras hidráulicas de todo tipo [7].

Para oleajes moderados a severos suele utilizarse el diseño de protección escalonada. Este consiste en la colocación del suelo-cemento en capas horizontales sucesivas superpuestas con un ancho de 1.80m a 2.70m y espesores de 15cm a 22.5cm (Figura 27, referencia [7]).

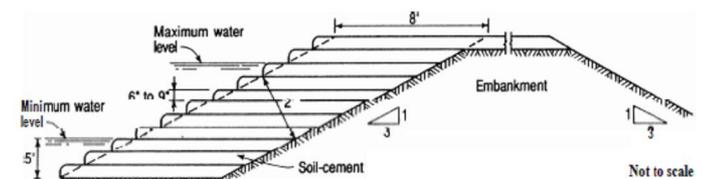


Figura 27: Diseño de protección escalonada de suelo-cemento para protección de taludes [7].

El proyecto más grande de protección de taludes con suelo-cemento fue realizado en un estanque de 2835Ha utilizado para el enfriamiento del agua en la planta de energía nuclear cerca de Houston, EEUU. El proyecto demandó 918,000m³ de suelo cemento, lo que alcanzaría para construir una base para caminos de 0.20m de espesor y 7.20m de ancho, de algo más de 600km de longitud.

Para oleajes moderados suele utilizarse el diseño de revestimiento superficial, que consiste en una capa de suelo-cemento con un espesor de 15cm a 22.5cm [7].

Más información acerca de la aplicación del suelo-cemento para protección de taludes se encuentra en las referencias [16], [17] y [18].

3.5.3 Revestimientos

Las bajas permeabilidades del suelo-cemento permiten su aplicación como revestimiento de reservorio de líquidos. El diseño de mezclas de suelo-cemento para este tipo de aplicación tiene como parámetro fundamental la permeabilidad; a mayor contenido de cemento menor será la permeabilidad del material.

Además de utilizarse suelo-cemento para revestir estanques, lagunas y otros reservorios de líquidos es frecuente su uso para revestimiento de superficies para el almacenamiento de carbón. Con esto se evita

el desperdicio del colchón de carbón en contacto con el suelo y por ende un beneficio económico importante. Además se consigue reducir el peligro de incendios y acceso en cualquier época del año del equipo de operación.

Otra aplicación interesante del uso de revestimientos de suelo-cemento es en rellenos sanitarios. La EPA, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, demostró su aptitud para tal fin mediante la realización de ensayos en los que se expuso suelo-cemento frente a distintos desechos peligrosos durante 2 años y medio [7].

3.5.4 Estabilización de fundaciones

El suelo-cemento ha sido utilizado en varios proyectos como relleno masivo a fin de obtener una fundación uniforme, estable y resistente en estructuras que abarcan grandes superficies.

En la referencia [7] figuran varios proyectos en los que se optó por utilizar suelo-cemento como relleno masivo en condiciones geotécnicas desfavorables logrando reducir costos. Por ejemplo, en la construcción de la presa de Chochiti, en el estado de New Mexico, EEUU, se reemplazó una hondada de 10.7m de profundidad por 44100m³ de suelo-cemento. Se diseñó la mezcla buscando obtener un material con propiedades físicas similares a la de los esquistos arenosos circundantes y así minimizar el riesgo de asentamientos diferenciales a lo largo de los conductos de descarga. La resistencia a compresión simple a 28 días de diseño del suelo-cemento fue de 7.0MPa.

3.5.5 Otras aplicaciones

El suelo-cemento también se utiliza para la construcción de muros de viviendas o para la fabricación de bloques de mampostería. El aprovechamiento del suelo local permite economizar costos frente a otros materiales más comúnmente utilizados.

Existen diversos sistemas constructivos diseñados para la construcción de viviendas sociales que utilizan el suelo-cemento como por ejemplo el SU-MA, ideado por el Instituto Provincial de Desarrollo Urbano y la Vivienda del Chaco conjuntamente con el Instituto del Cemento Portland Argentino [20]. El suelo-cemento se coloca dentro de encofrados y luego se lo compacta en capas horizontales de 10 a 15cm de espesor. El suelo-cemento compactado es muy buen aislante térmico. Una vez removido el encofrado la superficie puede ser pintada.

En la Figura 28 se observa un muro portante realizado con ladrillos de suelo-cemento. Estos ladrillos se fabrican con una prensa manual o automática y se dejan curar 7 días. Una máquina del tipo CINVA - RAM produce unos 70 ladrillos/hora, y con una bolsa de cemento se pueden ejecutar unos 150 ladrillos [21]. Es común el uso de ladrillos de suelo-cemento para la construcción de viviendas en zonas rurales. Más información sobre viviendas construidas con

ladrillos de suelo-cemento puede encontrarse en las referencias [21] a la [25].



Figura 28: Viviendas construidas con ladrillos de suelo-cemento [25]

En Lomas del Valle, México, se aplicó suelo-cemento para la construcción de muros de sostenimiento de más de 17m de altura. El uso de suelo-cemento permitió obtener un ahorro de costos del 40% frente a un muro convencional de hormigón con contrafuertes [20].

Otra aplicación del suelo-cemento es como revestimiento de taludes en silos subterráneos para el almacenamiento de cereales [26].

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Primeramente se realizaron ensayos de caracterización del suelo y del cemento recibidos. En base a los resultados de la caracterización, se diseñaron las mezclas de suelo-cemento para los ensayos de compresión simple, velocidad de propagación de ondas de ultrasonido, humedecimiento y secado, y congelamiento y deshielo. Las probetas moldeadas para estos ensayos se diseñaron con distintos contenidos de cemento y se almacenaron en cámara húmeda hasta la edad de ensayo.

Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos, Laboratorio de Materiales y Estructuras, y Laboratorio de Investigaciones Viales "Ing. Arenas" de la UBA.

4.1 Caracterización de Materiales

A continuación se presentan los ensayos de caracterización del suelo y del cemento Portland realizados. El agua utilizada fue agua potable de red y por lo tanto apta para su uso en mezclas de suelo-cemento.

4.1.1 Suelo

El suelo utilizado provino de la localidad de Ranelagh en la provincia de Buenos Aires. Este es un suelo limo-arcilloso, comúnmente denominado tosca. Se determinaron sus límites de Atterberg y se calcularon su IP según la norma ASTM D4318. Además se ensayó la fracción de partículas con tamaño menor a la abertura de tamiz #200 (75 μ m). Obtenidos estos parámetros se clasificó el suelo según ASTM D3282 y ASTM D2487.

En la Tabla 4 figuran las características más relevantes del suelo ensayado.

Tabla 4. Resumen de las propiedades del suelo.

| <i>Procedencia</i> | |
|---|-------------------------------------|
| Ubicación | Ranelagh, Provincia de Buenos Aires |
| Cota | -5 a -9 mts. |
| <i>Propiedades físicas ensayadas</i> | |
| % que pasa #200 | 98.5 % |
| LP | 37 |
| LL | 30 |
| IP | 7 |
| IG | 9 |
| <i>Clasificación</i> | |
| HRB | A4 |
| SUCS | ML |
| <i>Humedad óptima y peso específico seco máximo</i> | |
| ω_{opt} | 25 % |
| γ_{dmax} | 1.48 g/cm ³ |

Los valores de humedad óptima y peso específico seco máximo se obtuvieron a partir del ensayo de compactación realizado según la norma ASTM

D698. Los resultados del ensayo y la curva de peso específico seco – humedad se presentan en la Tabla 5 y en la Figura 29 respectivamente.

Tabla 5. Ensayo de compactación del suelo.

| Punto Número | Humedad % | γ g/cm ³ | γ_d g/cm ³ |
|--------------|-----------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 22.14 | 1.72 | 1.41 |
| 2 | 23.94 | 1.80 | 1.45 |
| 3 | 25.05 | 1.85 | 1.48 |
| 4 | 26.52 | 1.85 | 1.46 |
| 5 | 28.32 | 1.85 | 1.44 |

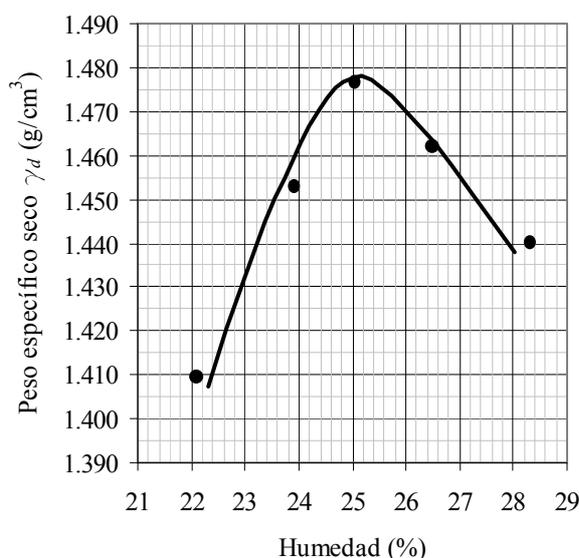


Figura 29: Curva de peso específico seco en función de la humedad del suelo.

4.1.2 Cemento Portland

El cemento utilizado en la mezcla fue un CPN 40 (MRS). Este cemento presenta una rápida ganancia de resistencia. Además, por su bajo contenido de aluminato tricálcico (AC3<8%) es de moderada resistencia a los sulfatos (MRS). En la Tabla 6 figuran algunas propiedades otorgadas por el fabricante.

Tabla 6. Especificaciones del cemento Portland otorgadas por el fabricante.

| <i>Descripción</i> | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Fabricante | Cementos Avellaneda S.A. |
| Categoría | CP 40 |
| IRAM50001 | CPN40 (MRS) |
| <i>Tiempo de fraguado</i> | |
| Inicial | 158 minutos |
| Final | 3.58 horas |
| <i>Resistencia a compresión</i> | |
| 1 día | 17.4 MPa |
| 2 días | 26.0 MPa |
| 7 días | 42.8 MPa |
| 28 días | 54.0 MPa |

Para conocer el tiempo real disponible para la elaboración de probetas se llevó a cabo el ensayo de determinación del tiempo de fraguado según la norma IRAM 1619.

Previamente se realizó el ensayo de pasta de consistencia normal según la norma IRAM 1612. En base a los resultados obtenidos se utilizó una relación agua/cemento para el ensayo de tiempo de fraguado de 0.33.

Las mediciones del ensayo de Tiempo de Fraguado se presentan en la Tabla 7, junto con su gráfica de penetración en función del tiempo en la Figura 30.

Tabla 7. Ensayo de compactación del suelo.

| | Tiempo hs:min | Penetración mm |
|----------------------------|------------------|-------------------|
| Tiempo Inicial de Fraguado | 0:00 | 40 |
| | 0:30 | 40 |
| | 1:00 | 40 |
| | 2:00 | 34 |
| | 2:15 | 25 |
| | 2:30 | 19 |
| | 2:45 | 10 |
| | 3:00 | 3 |
| | 3:15 | 1 |
| | 3:30 | 1 |
| | 3:45 | 1 |
| | 4:00 | 1 |
| | 4:30 | 1 |
| | 4:50 | 1 |
| | 5:10 | 1 |
| 5:30 | 1 | |
| 5:45 | 1 | |
| Tiempo Final de Fraguado | 6:00 | 0 |

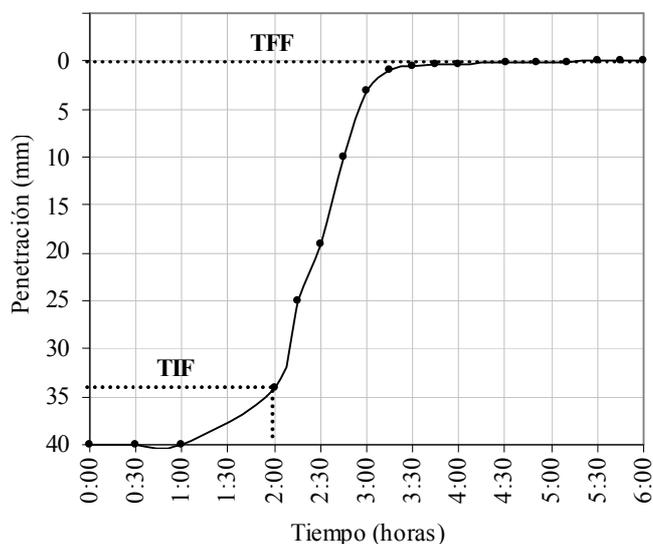


Figura 30: Ensayo de Tiempo inicial de fraguado.

Del ensayo se observó que el tiempo inicial de fraguado fue de 2 horas, siendo este el tiempo máximo disponible para elaborar las probetas de suelo-cemento.

4.2 Moldeo de Probetas

Una vez caracterizados los materiales a utilizar se moldearon las probetas para los distintos ensayos. Estas se dosificaron con distintos contenidos de cemento Portland y el contenido de agua correspondiente en cada caso. La compactación se llevó a ca-

bo mediante un equipo compactador automático. Por último se almacenaron las probetas en una cámara húmeda hasta el momento del ensayo.

4.2.1 Dosificación y mezclado

El molde utilizado para la elaboración de los ensayos de compresión simple, durabilidad y de velocidad de propagación de ondas por ultrasonido fue el molde Proctor chico. El suelo utilizado en la mezcla se tamizó previamente por el tamiz #4 (4.76mm). Las probetas se dosificaron para los contenidos de cemento Portland de 4, 6, 8 y 10%. El porcentaje de cemento se definió, según la norma VN-E19, (1).

$$C = \frac{PC}{PC + PS} \quad (1)$$

Siendo C el porcentaje de cemento, PC el peso de cemento y PS el peso de suelo seco.

Al suelo tamizado se le midió la humedad y se calculó el agua necesaria para alcanzar la ω_{opt} , según la fórmula (2) que tiene en cuenta el contenido de cemento Portland.

$$\omega = \frac{PA}{PC + PS} \quad (2)$$

A esta humedad se le agregó un 1% más de agua por el secado que se produce durante el moldeo. El agua utilizada en la mezcla estuvo a 21°C, la misma temperatura de la cámara de curado donde posteriormente se almacenaron las probetas.

Una vez tamizado el suelo para las probetas por duplicado y dosificado la cantidad de cemento y agua a utilizar se dio inicio al mezclado mediante el uso de espátula rígida. Primero se homogeneizó la mezcla de cemento y suelo. Una vez obtenido un color uniforme de la mezcla se incorporó el agua utilizando un rociador, al mismo tiempo que se continuó el mezclado del suelo-cemento, lo que permitió evitar la formación de grumos que dificulte la homogeneización efectiva de la mezcla.

Una vez que se consiguió un color uniforme de la mezcla entre suelo, cemento y agua, se pasó inmediatamente a la compactación.

4.2.2 Compactación

Se compactaron las mezclas de suelo-cemento mediante un compactador automático (Figura 31) según la norma VN-E19, ensayo Proctor estándar de molde chico (944cm³). Este procedimiento consistió en la densificación del material mediante la aplicación de 25 golpes por capa uniformemente distribuidos, en tres capas, aplicadas por un pisón de 2.5kg en caída libre, con una altura de caída de 30cm. Para cada probeta, entre la compactación de la segunda y tercera capa, se tomó una muestra de material para realizar un control de humedad.



Figura 31: Equipo compactador automático Proctor.

Por último, una vez realizada la compactación, se extrajo la probeta mediante un dispositivo extractor de muestras y se registró su peso antes del ingreso a la cámara de curado.

Los pesos registrados de las probetas por duplicado luego de compactadas difieren entre ellas por la pérdida de agua en la mezcla por secado e hidratación del cemento. Para minimizar esta diferencia en peso se protegió el material en espera de ser compactado con una arpillera húmeda, lo que evita el intercambio de agua entre la mezcla y el ambiente. El efecto del tiempo transcurrido entre el mezclado y la compactación se desarrolló en la sección 3.4.2.4.

4.2.3 Curado

Las probetas se almacenaron en cámara húmeda (Figura 32) a fin de controlar la temperatura y la humedad durante el tiempo transcurrido hasta el ensayo. Se colocaron las probetas de suelo-cemento compactadas dentro de bolsas de Nylon cerradas a fin de evitar el intercambio de agua con el ambiente. Se reguló la temperatura de la cámara a 21°C, temperatura especificada por la norma de ensayo de compactación VN-E33.



Figura 32: Curado de las probetas en cámara húmeda.

En la Tabla 8 se exhiben los pesos registrados antes y después del curado en cámara húmeda de las probetas sometidas a los ensayos de compresión y de durabilidad.

Tabla 8. Valores registrados durante la elaboración de probetas.

| Identif. Probeta | Peso húmedo (g) | | Humedad % | γ_d g/cm ³ | |
|---|-----------------|--------|-----------|------------------------------|------------|
| | inicial | final | | | $\Delta\%$ |
| <i>Resistencia a compresión</i> | | | | | |
| 1-4%-03d | 1796.4 | 1796.2 | 0.01% | 25.13% | 1.521 |
| 2-4%-03d | 1780.3 | 1780.0 | 0.02% | 24.90% | 1.510 |
| 1-4%-07d | 1802.1 | 1802.0 | 0.01% | 25.50% | 1.521 |
| 2-4%-07d | 1776.1 | 1776.0 | 0.01% | 24.55% | 1.511 |
| 1-4%-14d | 1781.1 | 1777.4 | 0.21% | 25.11% | 1.508 |
| 2-4%-14d | 1744.9 | 1740.0 | 0.28% | 24.78% | 1.481 |
| 1-4%-28d | 1799.6 | 1793.3 | 0.35% | 25.33% | 1.521 |
| 2-4%-28d | 1771.5 | 1766.8 | 0.27% | 24.31% | 1.510 |
| 1-4%-56d | 1772.9 | 1764.2 | 0.49% | 25.50% | 1.496 |
| 2-4%-56d | 1739.1 | 1731.0 | 0.47% | 24.43% | 1.481 |
| 1-6%-03d | 1804.6 | 1803.4 | 0.07% | 25.41% | 1.524 |
| 2-6%-03d | 1762.6 | 1762.9 | -0.02% | 24.29% | 1.502 |
| 1-6%-07d | 1836.3 | 1834.8 | 0.08% | 25.43% | 1.551 |
| 2-6%-07d | 1776.5 | 1776.0 | 0.03% | 23.94% | 1.518 |
| 1-6%-14d | 1813.8 | 1809.5 | 0.24% | 24.88% | 1.539 |
| 2-6%-14d | 1763.3 | 1761.2 | 0.12% | 24.12% | 1.505 |
| 1-6%-28d | 1837.1 | 1830.4 | 0.36% | 25.89% | 1.546 |
| 2-6%-28d | 1776.0 | 1768.0 | 0.45% | 25.12% | 1.504 |
| 1-6%-56d | 1780.9 | 1772.5 | 0.47% | 26.03% | 1.497 |
| 2-6%-56d | 1734.4 | 1726.4 | 0.46% | 25.40% | 1.465 |
| 1-8%-03d | 1798.0 | 1797.5 | 0.03% | 25.76% | 1.515 |
| 2-8%-03d | 1734.3 | 1733.6 | 0.04% | 24.03% | 1.481 |
| 1-8%-07d | 1791.7 | 1791.3 | 0.02% | 25.61% | 1.511 |
| 2-8%-07d | 1730.4 | 1729.9 | 0.03% | 24.28% | 1.475 |
| 1-8%-14d | 1842.4 | 1838.7 | 0.20% | 25.56% | 1.554 |
| 2-8%-14d | 1778.2 | 1775.4 | 0.16% | 24.67% | 1.511 |
| 1-8%-28d | 1842.4 | 1839.9 | 0.14% | 25.11% | 1.560 |
| 2-8%-28d | 1794.6 | 1790.0 | 0.26% | 24.57% | 1.526 |
| 1-8%-56d | 1777.5 | 1770.8 | 0.38% | 25.73% | 1.498 |
| 1-8%-56d | 1789.1 | 1779.8 | 0.52% | 25.87% | 1.506 |
| 3-8%-56d | 1731.8 | 1723.1 | 0.50% | 24.40% | 1.475 |
| 1-10%-03d | 1782.3 | 1781.7 | 0.03% | 26.03% | 1.498 |
| 2-10%-03d | 1722.7 | 1722.7 | 0.00% | 25.03% | 1.460 |
| 1-10%-07d | 1811.6 | 1810.4 | 0.07% | 26.30% | 1.519 |
| 2-10%-07d | 1721.5 | 1720.3 | 0.07% | 23.87% | 1.472 |
| 3-10%-07d | 1744.8 | 1744.6 | 0.01% | 24.76% | 1.481 |
| 1-10%-14d | 1873.3 | 1876.9 | -0.19% | 26.29% | 1.571 |
| 2-10%-14d | 1790.4 | 1788.7 | 0.09% | 24.35% | 1.525 |
| 3-10%-14d | 1817.3 | 1814.5 | 0.15% | 24.47% | 1.547 |
| 1-10%-28d | 1859.0 | 1854.5 | 0.24% | 25.68% | 1.567 |
| 2-10%-28d | 1783.3 | 1778.8 | 0.25% | 24.04% | 1.523 |
| 1-10%-56d | 1792.4 | 1785.7 | 0.37% | 25.98% | 1.507 |
| 1-10%-56d | 1727.9 | 1721.0 | 0.40% | 25.04% | 1.464 |
| <i>Humedecimiento y Secado</i> | | | | | |
| HS-6%-7d | 1831.0 | 1829.2 | 0.10% | 25.92% | 1.540 |
| HS-7%-7d | 1819.8 | 1818.6 | 0.07% | 25.90% | 1.531 |
| HS-8%-7d | 1818.1 | 1817.1 | 0.06% | 25.15% | 1.539 |
| HS-9%-7d | 1837.6 | 1836.1 | 0.08% | 25.26% | 1.554 |
| <i>Congelamiento y Deshielo</i> | | | | | |
| CD-6%-7d | 1782.1 | 1780.2 | 0.11% | 26.21% | 1.496 |
| CD-7%-7d | 1765.0 | 1763.0 | 0.11% | 26.14% | 1.482 |
| CD-8%-7d | 1738.8 | 1738.5 | 0.02% | 24.72% | 1.477 |
| CD-9%-7d | 1758.5 | 1757.8 | 0.04% | 25.03% | 1.490 |
| <i>Velocidad de propagación de onda</i> | | | | | |
| VP 1-4% | 1841.3 | 1837.2 | 0.22% | 24.99% | 1.561 |
| VP 2-4% | 1812.3 | 1809.3 | 0.17% | 25.05% | 1.535 |
| VP 1-6% | 1835.4 | 1832.0 | 0.19% | 24.53% | 1.561 |
| VP 2-6% | 1795.3 | 1791.9 | 0.19% | 24.59% | 1.526 |
| VP 1-8% | 1848.8 | 1846.6 | 0.12% | 25.73% | 1.558 |
| VP 2-8% | 1829.3 | 1826.6 | 0.15% | 26.25% | 1.535 |
| VP 1-10% | 1856.8 | 1855.7 | 0.06% | 26.17% | 1.559 |
| VP 2-10% | 1850.0 | 1846.7 | 0.18% | 25.87% | 1.557 |

Las probetas se denominaron de la siguiente manera: el primer número indica si se trata del original o el duplicado, el segundo del porcentaje de cemento y la tercera cifra el tiempo de curado en cámara húmeda.

En la Tabla 8 se observa como para todas las edades de curado la pérdida de peso fue siempre menor al 0,50%, lo que indica un buen curado. Además se observa que las humedades están dentro del rango de $\pm 1.50\%$ de la humedad óptima.

Durante el moldeo se descartaron aquellas probetas que presentaron fisuras al ser extraídas del molde, o quedaron fuera del rango de $\pm 1.50\%$ de la humedad óptima. Para ciertas dosificaciones hay una tercera probeta, esto se debe a que se descartó su duplicado pero no esa.

4.3 Ensayos de durabilidad

Al aplicar suelo-cemento en estructuras de pavimentos o en obras hidráulicas, se somete el material a ensayos de durabilidad por “humedecimiento y secado” y “congelamiento y deshielo”. Estos ensayos consisten en medir la pérdida en peso de probetas sometidas a 12 ciclos de desgaste abrasivo con cepillo de cerdas metálicas bajo condiciones climáticas desfavorables.

Se realizaron estos ensayos a fin de evaluar la durabilidad de las probetas en función de la dosificación de cemento.

4.3.1 Humedecimiento y secado

Se realizó este ensayo bajo la norma VN-E21 para probetas de 6, 7, 8 y 9% de cemento Portland. Luego de 7 días de curado en cámara húmeda se somete a las probetas a 12 ciclos de desgaste. Estos ciclos consisten primero en sumergir la probeta en agua durante 5 horas, para luego introducirlas en una estufa a 71°C (Figura 33) durante 42 horas y finalmente cepillarlas con cepillo de cerdas metálicas recubriendo toda su superficie (Figura 35). Al final de cada procedimiento se registró el peso de las probetas y al finalizar el ensayo se calculó las pérdidas en peso de las probetas en cada ciclo.



Figura 33: Ensayo de humedecimiento y secado.

4.3.2 Congelamiento y Deshielo

Este ensayo se realizó según la norma VN-E22 para probetas de 6, 7, 8 y 9% de cemento Portland. Se sometió las probetas a ciclos de desgaste (Figura 34) que consistieron en congelarlas en un refrigerador regulado a -23°C durante 24 horas para luego colocarlas en cámara húmeda a 21°C y 100% de humedad relativa durante 23 horas, permitiendo que la probeta absorba agua por capilaridad, y finalmente cepillarlas con cepillo de cerdas metálicas recubriendo toda su superficie (Figura 35). Al final de cada procedimiento se registro el peso de las probetas. Este ciclo se repitió 12 veces. Al final del ensayo se calculó la pérdida en peso de las probetas en cada ciclo.



Figura 34: Ensayo de congelamiento y deshielo.



Figura 35: Cepillado de probetas en ensayos de durabilidad.

4.4 Ensayo de Compresión Simple

Se ensayaron a compresión simple probetas por duplicado dosificadas con 4, 6, 8 y 10% de cemento Portland para las edades de 3, 7, 14, 28 y 56 días. Los datos del moldeo de las probetas se presentan en la Tabla 8.

4.4.1 Preparación del ensayo

Una vez finalizado el periodo de curado, a la edad de ensayo, se pesaron las probetas y se sumergieron en agua a 21°C durante 4 horas. Luego se encabezaron las probetas y se dejó fraguar el material de encabezado (mezcla de grafito, cuarzo y azufre) durante 2 horas dentro de la cámara húmeda. Se protegió las probetas hasta el momento del ensayo manteniéndolas envueltas en una arpillera húmeda.

Antes de realizar el ensayo se tomaron medidas del diámetro cerca de la mitad de la probeta y la altura de la probeta (la altura medida incluye los encabezados). El diámetro promedio se utilizó para el cálculo de la sección transversal y con la altura se calculó la esbeltez de la probeta.

Se ubicó la probeta en la máquina cuidando que su eje vertical pase por el centro de empuje de la rótula. Se ubicó el cabezal superior hasta la altura de la probeta y se inclinó su parte móvil hasta obtener un apoyo uniforme (Figura 36).



Figura 36: Ubicación de la probeta en la máquina.



Figura 37: Máquina del tipo universal "Baldwin-Lima Hamilton".

4.4.2 Realización del ensayo

Se ensayo a compresión simple mediante la máquina del tipo universal con accionamiento hidráulico "Baldwin-Lima Hamilton" con comando Instron SRV016 de SATEC Systems (Figura 37), del laboratorio de Materiales y Estructuras de la UBA.

La máquina posee una celda de carga interna y sensores de desplazamiento que envían la información a una placa de adquisición de datos conectada a una pc. Los valores de carga y desplazamiento del cabezal del ensayo se almacenan en un archivo .cvs, formato que es compatible con Microsoft Excel.

Se configuró la velocidad de carga 140KPa/seg, este valor es el especificado por la norma VN-E33 y ASTM-D1633.

4.4.3 Procesamiento de los resultados

Con las mediciones de carga y desplazamiento del cabezal del ensayo de compresión, se obtiene la curva de tensión-deformación del material.

En la Figura 38, a modo de ejemplo, se muestra la curva de tensión-deformación sin procesar en color gris y trazo fino. Se observa un cambio de curvatura de la curva. Esto se debe al error de medición debido al acomodamiento de los cabezales durante los primeros escalones de carga. Para mayores deformaciones este error deja de ser considerable. Este momento se refleja en la curva de tensión-deformación a partir del cambio de curvatura y a partir de ese punto se considera que la curva representa la respuesta del material.

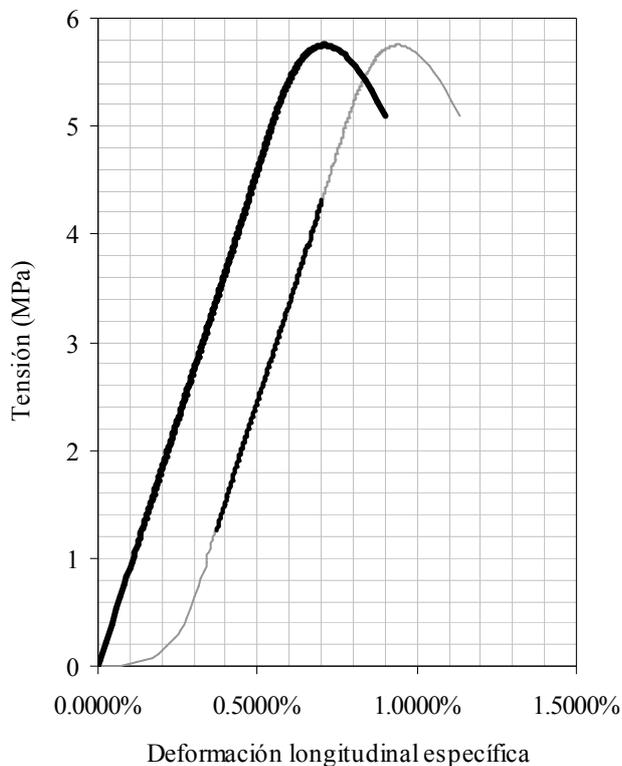


Figura 38: Procesamiento de curva tensión-deformación obtenida en ensayo de compresión simple.

Para eliminar este error de medición se aproximó un tramo de la curva de tensión-deformación mediante un polinomio de orden 2. El procedimiento consistió primero en seleccionar un tramo de la curva original (representado en color negro y trazo fino), con inicio en el punto correspondiente al cambio de curvatura y fin en el punto correspondiente al 75% de la tensión máxima. Luego se aproximó este tramo de curva con un polinomio de orden 2 mediante cuadrados mínimos. Una vez obtenidos los coeficientes del polinomio de aproximación, se lo graficó (en color negro y trazo grueso) con origen en el punto (0,0) desde el valor de tensión nula hasta el 75% de la tensión de rotura. Por último se trasladaron los puntos de la curva original del ensayo correspondientes a tensiones mayores al 75% de la tensión de rotura, haciéndolos coincidir con el polinomio de aproximación.

Los valores de resistencia a compresión simple obtenidos en el ensayo se corrigieron por la esbeltez de la probeta, definida según la ecuación (3).

$$Esbeltez = \frac{Altura}{Diámetro} \quad (3)$$

Esta corrección convierte la resistencia obtenida con la esbeltez de la probeta a la resistencia que se habría obtenido con una esbeltez igual a 2. La esbeltez del molde Proctor utilizado para la elaboración de probetas es de 1.15, la de las probetas encabezadas es aproximadamente 1.28. La resistencia a compresión corregida se calcula según:

$$f_c = FCE \cdot f_{max} \quad (4)$$

siendo f_c la resistencia a compresión simple, FCE el factor de corrección por esbeltez y f_{max} la tensión máxima obtenida en el ensayo.

El valor de FCE se obtuvo de la norma de ensayo VN-E33.

4.4.4 Dispersión de resultados

El gran número de factores que intervienen en la resistencia del suelo-cemento hace que sea común obtener dispersiones altas en los resultados. En la norma de ensayo ASTM-D1633 figura un análisis de dispersión de los valores de resistencia a compresión simple.

La norma recoge 122 series de probetas por duplicado de suelo-cemento moldeadas con 21 tipos de suelo distintos. Estos ensayos cubren un amplio rango de contenido de cementos y resistencias a compresión pero no aclara la edad de ensayo.

En la Figura 39, se grafican las frecuencias de las diferencias entre resistencia obtenidas. La diferencia entre las resistencias de las probetas por duplicado se expresó en relación al promedio entre ellas (5).

$$\%diferencia = \frac{(f_{cmax} - f_{cmin})}{0.5(f_{cmax} + f_{cmin})} \quad (5)$$

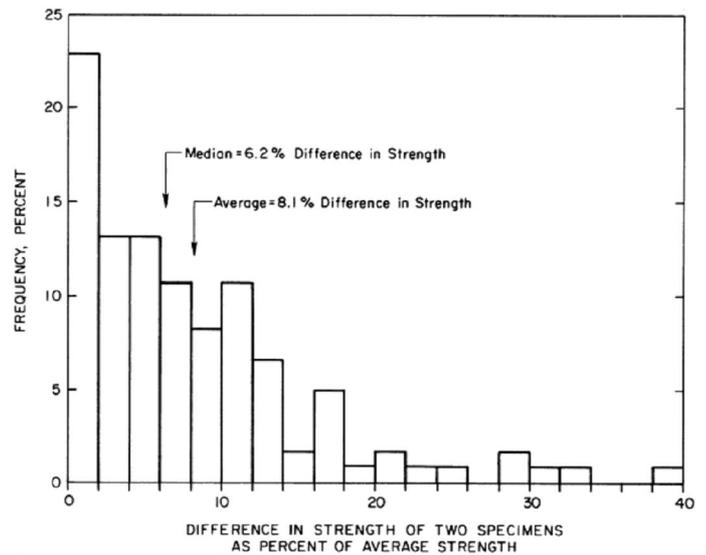


Figura 39: Dispersión de valores de resistencia a compresión simple entre probetas por duplicado según ASTM-D1633.

La diferencia promedio de resistencia entre las 122 probetas por duplicado fue 8.1% y la moda 6.2%.

4.5 Ensayo de velocidad de propagación de onda.

Se midió la velocidad de propagación de onda compresiva de ultrasonido para probetas dosificadas con 4, 6, 8, y 10% de cemento Portland. Para esto se utilizó el equipo TICO *Ultrasonic Instrument* (Figura 40), del laboratorio de Materiales y Estructuras de la UBA.



Figura 40: Medición de velocidad de propagación de onda.

Este equipo está diseñado para la medición de velocidad de pulso ultrasónico y se aplica normalmente para obtener información sobre uniformidad, cavidades, grietas y defectos, el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de hormigones.

Su funcionamiento consiste básicamente en la medición del tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de una onda "p" (compresiva) de ultrasonido que se propaga a través del material.

Los intervalos de tiempo registrados en los ensayos con las probetas de suelo-cemento están dentro del rango de medición del instrumento.

Aunque haya sido diseñada para hormigones, el funcionamiento e intervalo de medición del instrumento hacen posible su aplicación para ensayar suelo-cemento.

En la Tabla 9 figuran datos técnicos del equipo brindados por el fabricante.

Tabla 9. Datos Técnicos del equipo utilizado para medir velocidad de propagación de onda de ultrasonido.

| <i>Información de instrumento</i> | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Fabricante | PROCEQ |
| Denominación | TICO <i>Ultrasonic Instrument</i> |
| Tipo de onda | Compresiva |
| Intervalo de medición | Aprox. de 15 a 6550 μ s |
| Resolución | 0.1 μ s |
| Memoria | No volátil, hasta 250 valores |
| Software | HyperTerminal |
| Impulso de tensión | 1 kV |
| Tasa de impulso | 3/s |
| Impedancia en entrada | 1 M Ω |
| Transductores | 54 kHz con cables BNC |
| Temp. de funcionamiento | -10 °C a +60 °C |

Las velocidades de propagación de onda se registraron a distintas edades, registrando la evolución de esta en el tiempo. Al ser un ensayo no destructivo, fue posible seguir esa evolución mediante el ensayo de una misma probeta.

Durante el tiempo entre ensayos se almacenaron las probetas en cámara húmeda a temperatura controlada de 21°C, dentro de bolsas de Nylon a fin de evitar el intercambio de humedad con el ambiente.

4.5.1 Preparación del ensayo

Al ser extraídas de la cámara húmeda se tomaron mediciones de la altura y diámetro y se registró el peso de la probeta, para calcular luego su peso específico y controlar las variaciones de humedad.

Antes de realizar cada ensayo se calibró el equipo mediante el módulo de calibración que posee el equipo. Para esto se utiliza un cilindro de material calibrado.

Una vez calibrado el equipo, se ingresa la distancia entre transductores (igual a la altura medida de la probeta a ensayar) y se ubican los transductores sobre las caras extremas ejerciendo una ligera presión. Previamente se cubre la superficie de los transductores con vaselina sólida para lograr mayor adherencia y se ubican estos haciendo coincidir su centro con el del eje longitudinal de la probeta.

4.5.2 Realización del ensayo

El equipo posee una pantalla gráfica que informa en cada instante la medición de tiempo transcurrido entre la emisión de la onda de ultrasonido y su recepción, la distancia entre transductores previamente

ingresada, la velocidad de propagación de onda y otros valores que no se tuvieron en cuenta.

Ubicados los transductores, se mantuvieron fijos en esa posición hasta observar que los valores medidos por el equipo se mantengan estables.

Luego se cambió la ubicación de los transductores intercambiando los extremos de la probeta y se volvió a realizar el mismo procedimiento.

Una vez registrados los valores del ensayo en ambos extremos, se volvió a almacenar la probeta en la cámara húmeda.

4.5.3 Estimación del Módulo de Young para bajas deformaciones

El Módulo de Young para bajas deformaciones se calculó según:

$$E_0 = v_p^2 \cdot \gamma \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}{(1 - \mu)} \quad (6)$$

siendo $[E_0]=\text{GPa}$, $[v_p]=\text{m/s}$ y $[\gamma]=\text{gr/cm}^3$.

El coeficiente de Poisson es función de la edad de la probeta y el contenido de cemento Portland. A menor edad y contenido de cemento este tiende a ser similar al del suelo sin cementación y a mayores edades y contenidos de cemento tiende a valores similares al de un hormigón pobre. Por lo tanto, si se re-escribe la ecuación (6) como (7) y se considera que el coeficiente de Poisson valdrá entre 0,20 y 0,30, entonces $C(\mu)$ valdrá entre 0.900 y 0.743.

$$E_0 = v_p^2 \cdot \gamma \cdot C(\mu) \quad (7)$$

Se estimó el valor de μ igual a 0.25 por lo que $C(\mu) = C(0.25) = 0.833$.

El error estimado por no medir μ ni considerar su variación es de $\pm 8\%$.

5 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos correspondientes al programa experimental, desarrollado en el capítulo anterior.

En la primer parte se presentan los resultados de los ensayos de durabilidad de “humedecimiento y secado” y “congelamiento y deshielo”.

Se incluyen las curvas de tensión-deformación, junto con los valores de resistencia y rigidez obtenidos de los ensayos de compresión simple para los distintos contenidos de cemento Portland para distintas edades de curado.

Finalmente se presentan los valores del Módulo de Young para bajas deformaciones y su evolución en el tiempo de las probetas con los distintos contenidos de cemento, obtenidos mediante la medición de velocidad de propagación de onda de ultrasonido.

Además se grafican las distintas relaciones entre los parámetros medidos.

5.1 Ensayos de durabilidad

Para los ensayos de durabilidad se moldearon probetas con 6, 7, 8 y 9% de cemento Portland. Los valores registrados durante la elaboración y curado de las probetas figuran en la Tabla 8.

5.1.1 Humedecimiento y secado

Los resultados de este ensayo se presentan en la Figura 41.

Todas las probetas se rompieron antes del octavo ciclo. Para los primeros ciclos de humedecimiento y secado se observó la formación de una fisura transversal superficial ubicada en la intersección entre capas de compactación. Esta fisura se propagó y se hizo más ancha con el correr de los ciclos de salto térmico y desgaste abrasivo, hasta provocar el desprendimiento de una de las capas.

Se observan menores porcentajes de pérdida en peso en probetas con mayores porcentajes de cemento.

5.1.2 Congelamiento y deshielo

Los resultados de este ensayo se presentan en la Figura 42.

Todas las probetas soportaron los 12 ciclos del ensayo sin desprendimiento de alguna de sus capas.

Las probetas con 6 y 7% de cemento presentaron valores muy similares y alcanzaron una pérdida en peso seco total cercana al 8%. La probeta con 8 % de cemento alcanzó una pérdida total cercana al 6% mientras que con 9% de cemento, la pérdida total registrada fue del 5%.

Se observan menores porcentajes de pérdida en peso en probetas con mayores porcentajes de cemento.

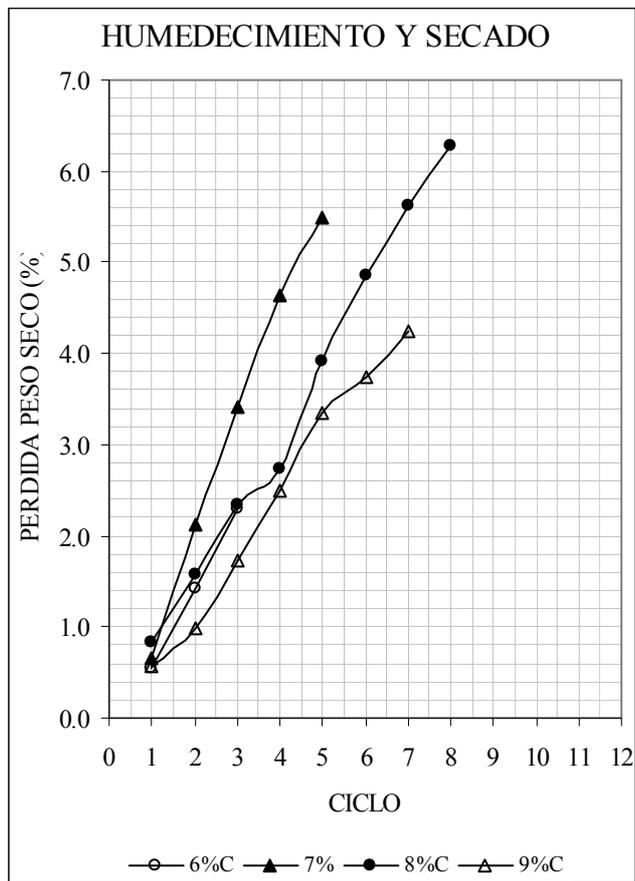


Figura 41: Pérdida de peso seco en ciclos de humedecimiento y secado.

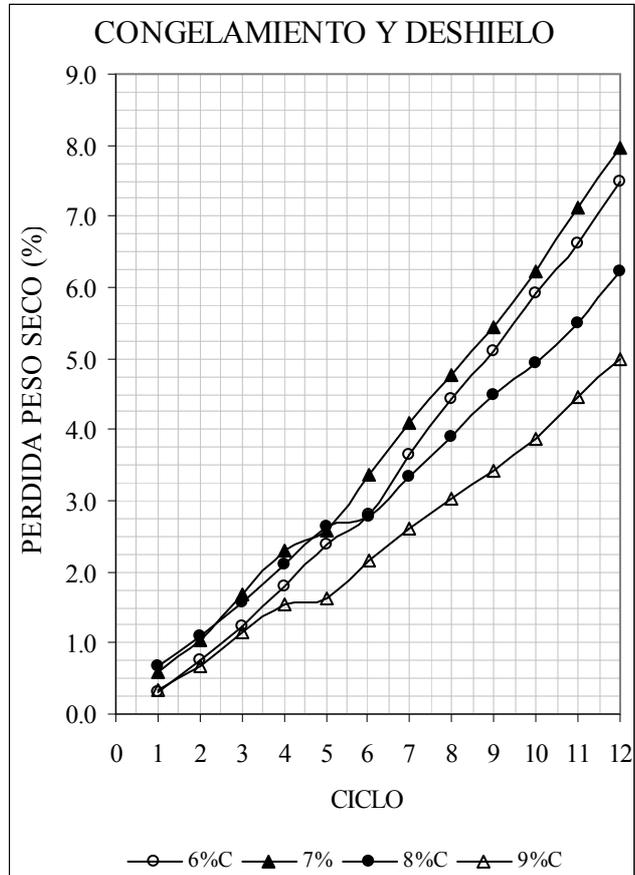


Figura 42: Pérdida de peso seco en ciclos de congelamiento y deshielo.

5.2 Resistencia a compresión simple

Se ensayaron probetas por duplicado para 4, 6, 8 y 10% de cemento Portland a las edades de 3, 7, 14, 28 y 56 días. Los valores registrados durante la elaboración y curado de las probetas figuran en la Tabla 8. Los valores de resistencia a compresión simple se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores registrados en ensayo de compresión.

| Probeta Número | γ_a g/cm ³ | f_{max} MPa | Esbeltz H/D | Factor de corrección | f_c MPa |
|-------------------|---------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|--------------|
| 1-4%-03d | 1.521 | 1.83 | 1.284 | 0.941 | 1.72 |
| 2-4%-03d | 1.510 | 1.63 | 1.275 | 0.941 | 1.53 |
| 1-4%-07d | 1.521 | 2.07 | 1.275 | 0.941 | 1.95 |
| 2-4%-07d | 1.511 | 1.82 | 1.284 | 0.941 | 1.71 |
| 1-4%-14d | 1.508 | 2.33 | 1.284 | 0.941 | 2.19 |
| 2-4%-14d | 1.481 | 1.92 | 1.265 | 0.941 | 1.81 |
| 1-4%-28d | 1.521 | 2.42 | 1.275 | 0.941 | 2.28 |
| 2-4%-28d | 1.510 | 2.04 | 1.284 | 0.941 | 1.92 |
| 1-4%-56d | 1.496 | 2.13 | 1.294 | 0.942 | 2.01 |
| 2-4%-56d | 1.481 | 1.43 | 1.265 | 0.941 | 1.35 |
| VP 1-4%-56 | 1.561 | 2.89 | 1.294 | 0.942 | 2.72 |
| VP 2-4%-56 | 1.535 | 2.48 | 1.284 | 0.941 | 2.33 |
| 1-6%-03d | 1.524 | 2.70 | 1.265 | 0.941 | 2.54 |
| 2-6%-03d | 1.502 | 2.18 | 1.284 | 0.941 | 2.05 |
| 1-6%-07d | 1.551 | 3.90 | 1.284 | 0.941 | 3.67 |
| 2-6%-07d | 1.518 | 3.00 | 1.275 | 0.941 | 2.82 |
| 1-6%-14d | 1.539 | 4.00 | 1.294 | 0.942 | 3.77 |
| 2-6%-14d | 1.505 | 3.31 | 1.304 | 0.942 | 3.12 |
| 1-6%-28d | 1.546 | 5.30 | 1.284 | 0.941 | 4.99 |
| 2-6%-28d | 1.504 | 3.98 | 1.275 | 0.941 | 3.75 |
| 1-6%-56d | 1.497 | 4.38 | 1.284 | 0.941 | 4.12 |
| 2-6%-56d | 1.465 | 3.15 | 1.294 | 0.942 | 2.97 |
| VP 1-6%-56 | 1.561 | 5.70 | 1.294 | 0.942 | 5.37 |
| VP 2-6%-56 | 1.526 | 4.79 | 1.255 | 0.940 | 4.50 |
| 1-8%-03d | 1.515 | 2.92 | 1.314 | 0.943 | 2.75 |
| 2-8%-03d | 1.481 | 2.06 | 1.294 | 0.942 | 1.94 |
| 1-8%-07d | 1.511 | 4.17 | 1.275 | 0.941 | 3.92 |
| 2-8%-07d | 1.475 | 3.18 | 1.294 | 0.942 | 2.99 |
| 1-8%-14d | 1.554 | 5.93 | 1.275 | 0.941 | 5.58 |
| 2-8%-14d | 1.511 | 4.52 | 1.275 | 0.941 | 4.25 |
| 1-8%-28d | 1.560 | 6.97 | 1.265 | 0.941 | 6.56 |
| 2-8%-28d | 1.526 | 4.87 | 1.255 | 0.940 | 4.58 |
| 1-8%-56d | 1.498 | 4.71 | 1.245 | 0.940 | 4.43 |
| 2-8%-56d | 1.506 | 5.04 | 1.255 | 0.940 | 4.74 |
| 3-8%-56d | 1.475 | 4.07 | 1.255 | 0.940 | 3.83 |
| VP 1-8%-56 | 1.558 | 5.88 | 1.275 | 0.941 | 5.53 |
| VP 2-8%-56 | 1.535 | 6.64 | 1.265 | 0.941 | 6.25 |
| 1-10%-03d | 1.498 | 3.37 | 1.294 | 0.942 | 3.17 |
| 2-10%-03d | 1.460 | 2.14 | 1.324 | 0.943 | 2.02 |
| 1-10%-07d | 1.519 | 5.09 | 1.284 | 0.941 | 4.79 |
| 2-10%-07d | 1.472 | 3.28 | 1.284 | 0.941 | 3.09 |
| 3-10%-07d | 1.481 | 3.43 | 1.294 | 0.942 | 3.23 |
| 1-10%-14d | 1.571 | 6.02 | 1.265 | 0.941 | 5.66 |
| 2-10%-14d | 1.525 | 4.72 | 1.284 | 0.941 | 4.44 |
| 3-10%-14d | 1.547 | 6.19 | 1.275 | 0.941 | 5.82 |
| 1-10%-28d | 1.567 | 7.74 | 1.265 | 0.941 | 7.28 |
| 2-10%-28d | 1.523 | 5.44 | 1.265 | 0.941 | 5.12 |
| 1-10%-56d | 1.507 | 5.75 | 1.294 | 0.942 | 5.42 |
| 2-10%-56d | 1.464 | 4.25 | 1.255 | 0.940 | 4.00 |
| VP 1-10%-56 | 1.559 | 5.88 | 1.265 | 0.941 | 5.53 |
| VP 2-10%-56 | 1.557 | 7.97 | 1.265 | 0.941 | 7.50 |

Se observó una gran dispersión de los valores de resistencia a compresión simple, la cual fue mayor a mayor contenido de cemento y mayor edad de las

probetas. La diferencia entre resistencias de probetas por duplicado (definida según la ecuación (5)) promedio fue de 26% y la moda fue de 25%.

En la Figura 43 se graficó la frecuencia de diferencia entre las resistencias de las probetas por duplicado obtenidas en el ensayo.

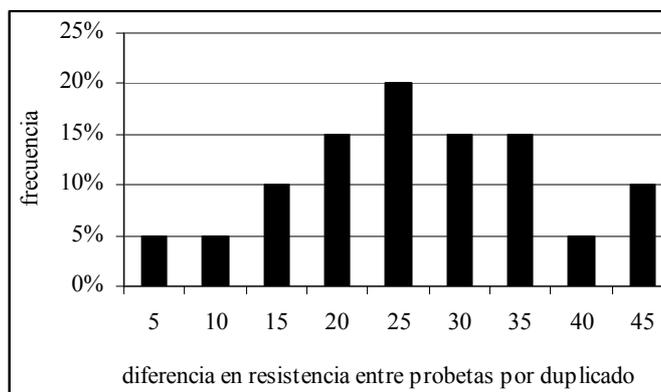


Figura 43: Diferencia en resistencia entre probetas por duplicado expresada como porcentaje del promedio entre ambas.

Esta dispersión se debe a la gran cantidad de factores que intervienen en la resistencia. En la Tabla 10 se observa que la probeta número 2 de cada serie tiene menor resistencia. Estas probetas se compactaron luego de la número 1; el tiempo entre el mezclado y la compactación de la primer probeta de la serie fue de aproximadamente 10 minutos mientras que para la segunda fue de aproximadamente 35 minutos. El efecto de este atraso en la compactación se mostró en la sección 3.4.2.4. Esto ocurrió a pesar de que en todo momento se cubrió la mezcla de suelo-cemento en espera de la compactación con una arpillera húmeda a fin de protegerla del intercambio de humedad con el ambiente.

Para todos los casos registró una ganancia en resistencia y rigidez hasta los 28 días. Para las probetas ensayadas a 56 días se registró una disminución de la resistencia en para las series 1 y 2 y en cambio se observó un incremento de para las probetas VP (utilizadas para ensayo de propagación de onda).

5.2.1 Curvas de tensión-deformación

En las figuras 45, 46, 47 y 48 se presentan curvas de tensión-deformación obtenidas de los ensayos de compresión simple representativas de los distintos tiempos de curado agrupadas según el contenido de cemento. En las mismas se observó un aumento de la resistencia y la rigidez con el tiempo de curado. Además se aprecia la mayor dependencia de edad de las probetas para mayores contenidos de cemento.

En las figuras 49, 50, 51 y 52 se presentan curvas de tensión-deformación obtenidas del mismo ensayo, agrupadas según el tiempo de curado, para los distintos contenidos de cemento. En las mismas se observa un incremento de los valores de resistencia y rigidez, y una menor incidencia en la ganancia de los mismos para mayores contenidos de cemento.

5.2.2 Resistencia a compresión simple en función de la edad

En la Figura 53 se graficó la resistencia a compresión simple en función de la edad. Se aproximó mediante cuadrados mínimos una curva logarítmica para cada contenido de cemento.

Se observa como la evolución de resistencia depende del contenido de cemento. Según los valores de la curva, la ganancia de resistencia en función de la edad crece con el contenido de cemento.

En la Figura 44 se graficó la ganancia de resistencia entre los 7 y 28 días. Esta fue del 12, 30, 37 y 38% para las probetas con 4, 6, 8 y 10% de cemento Portland respectivamente. Se observa como la curva de ganancia de resistencia tiende a aplanarse para contenidos de cemento Portland altos.

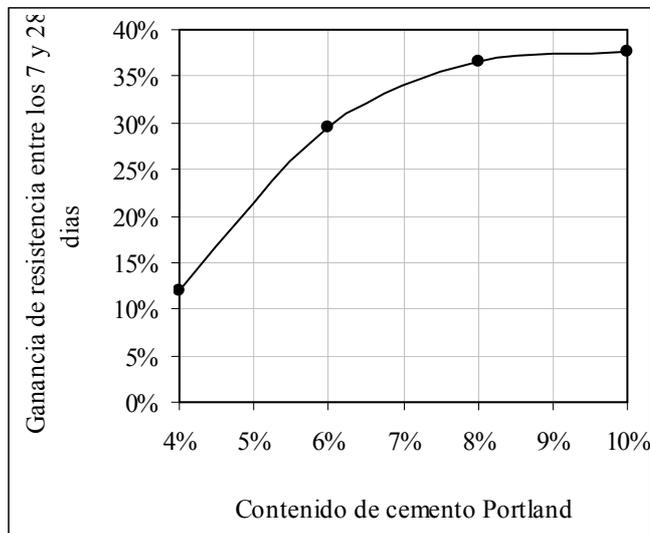


Figura 44: Ganancia de resistencia entre los 7 y 28 días de edad según el contenido de cemento.

A diferencia de experiencias previas recogidas de la bibliografía que indican la evolución permanente de la resistencia a lo largo del tiempo, se registró para las series 1 y 2 una disminución de esta entre los 28 y 56 días para todos los contenidos de cemento.

El grado de saturación de las probetas y la evolución de las reacciones entre el cemento Portland, agua y cada suelo en particular a lo largo del tiempo modifican las propiedades de la mezcla y su comportamiento. Sin embargo, no fue objeto de esta tesis investigar la causa de la disminución de resistencia de las probetas entre los 28 y 56 días para esas probetas. Una de las hipótesis posibles a investigar es la presencia de sulfatos o sales nocivas que hayan perjudicado el desarrollo de la hidratación del cemento.

5.2.3 Resistencia a compresión simple en función del contenido de cemento

En la Figura 54 se graficó la resistencia a compresión simple en función del contenido de cemento Portland. Se trazaron curvas según la edad de las

probetas aproximando mediante cuadrados mínimos usando para todos los casos una función potencial cuyas expresiones se transcriben en la parte inferior de la misma figura.

Se observa como la ganancia de resistencia por incremento del contenido de cemento crece con la edad del material. Para un contenido de cemento del 8% la ganancia de resistencia es prácticamente lineal. Para contenidos menores, la ganancia tiende a ser proporcional a la raíz cuadrada y para contenidos mayores de cemento, la ganancia de resistencia tiende a ser exponencial.

5.3 Velocidad de propagación de onda

Los resultados obtenidos del ensayo se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Velocidad de propagación de onda compresiva y Modulo de Young para bajas deformaciones derivado.

| Edad Hum. Dias | % | γ_d g/cm ³ | γ g/cm ³ | v_p (m/s) | | E_0 MPa | |
|---------------------|--------|------------------------------|----------------------------|-------------|------|-----------|---------|
| | | | | 1 | 2 | prom. | |
| <i>Probeta 1-4%</i> | | | | | | | |
| 4 | 24.88% | 1.949 | 1.561 | 1590 | 1570 | 1580 | 4054 |
| 6 | 24.91% | 1.949 | 1.561 | 1670 | 1660 | 1665 | 4503 |
| 7 | 24.97% | 1.950 | 1.560 | 1670 | 1670 | 1670 | 4531 |
| 12 | 24.98% | 1.950 | 1.560 | 1720 | 1720 | 1720 | 4807 |
| 15 | 25.03% | 1.949 | 1.559 | 1740 | 1750 | 1745 | 4946 |
| 19 | 24.99% | 1.949 | 1.559 | 1720 | 1730 | 1725 | 4833 |
| 22 | 25.01% | 1.949 | 1.559 | 1730 | 1740 | 1735 | 4888 |
| 32 | 25.07% | 1.947 | 1.557 | 1750 | 1750 | 1750 | 4970 |
| 51 | 25.05% | 1.947 | 1.557 | 1730 | 1740 | 1735 | 4883 |
| <i>Probeta 2-4%</i> | | | | | | | |
| 4 | 24.97% | 1.919 | 1.535 | 1590 | 1570 | 1580 | 3991 |
| 6 | 24.98% | 1.919 | 1.535 | 1640 | 1640 | 1640 | 4301 |
| 7 | 25.03% | 1.919 | 1.535 | 1650 | 1650 | 1650 | 4354 |
| 12 | 25.05% | 1.919 | 1.535 | 1680 | 1680 | 1680 | 4514 |
| 15 | 25.05% | 1.919 | 1.535 | 1700 | 1710 | 1705 | 4649 |
| 19 | 25.06% | 1.919 | 1.534 | 1680 | 1670 | 1675 | 4486 |
| 22 | 25.04% | 1.919 | 1.535 | 1700 | 1720 | 1710 | 4676 |
| 32 | 25.10% | 1.918 | 1.533 | 1720 | 1730 | 1725 | 4756 |
| 51 | 25.10% | 1.917 | 1.532 | 1740 | 1730 | 1735 | 4809 |
| <i>Probeta 1-6%</i> | | | | | | | |
| 4 | 24.40% | 1.942 | 1.561 | 1880 | 1870 | 1875 | 5691 |
| 6 | 24.39% | 1.942 | 1.561 | 2020 | 2010 | 2015 | 6571 |
| 7 | 24.49% | 1.943 | 1.560 | 2020 | 2020 | 2020 | 6606 |
| 12 | 24.50% | 1.943 | 1.561 | 2060 | 2070 | 2065 | 6905 |
| 15 | 24.57% | 1.942 | 1.559 | 2070 | 2090 | 2080 | 7003 |
| 19 | 24.50% | 1.943 | 1.561 | 2070 | 2080 | 2075 | 6971 |
| 22 | 24.53% | 1.943 | 1.560 | 2100 | 2110 | 2105 | 7174 |
| 32 | 24.51% | 1.943 | 1.561 | 2140 | 2140 | 2140 | 7416 |
| 51 | 24.68% | 1.941 | 1.557 | 2120 | 2130 | 2125 | 7306 |
| <i>Probeta 2-6%</i> | | | | | | | |
| 4 | 24.46% | 1.900 | 1.526 | 1890 | 1870 | 1880 | 5596 |
| 6 | 24.46% | 1.900 | 1.526 | 1940 | 1940 | 1940 | 5958 |
| 7 | 24.55% | 1.900 | 1.526 | 1910 | 1920 | 1915 | 5807 |
| 12 | 24.59% | 1.900 | 1.525 | 1980 | 1980 | 1980 | 6208 |
| 15 | 24.61% | 1.900 | 1.525 | 2000 | 1980 | 1990 | 6270 |
| 19 | 24.59% | 1.900 | 1.525 | 2000 | 2010 | 2005 | 6365 |
| 22 | 24.60% | 1.900 | 1.525 | 1990 | 2000 | 1995 | 6301.33 |
| 32 | 24.60% | 1.900 | 1.525 | 2030 | 2030 | 2030 | 6524 |
| 51 | 24.69% | 1.898 | 1.522 | 2020 | 2020 | 2020 | 6455 |

Probeta 1-8%

| | | | | | | | |
|----|--------|-------|-------|------|------|------|------|
| 4 | 25.55% | 1.956 | 1.558 | 1950 | 1940 | 1945 | 6165 |
| 6 | 25.61% | 1.957 | 1.558 | 1970 | 1980 | 1975 | 6360 |
| 7 | 25.69% | 1.957 | 1.557 | 2010 | 2010 | 2010 | 6589 |
| 12 | 25.69% | 1.958 | 1.558 | 2030 | 2030 | 2030 | 6723 |
| 15 | 25.76% | 1.957 | 1.556 | 2030 | 2040 | 2035 | 6754 |
| 19 | 25.72% | 1.957 | 1.557 | 2030 | 2050 | 2040 | 6788 |
| 22 | 25.71% | 1.958 | 1.557 | 2060 | 2070 | 2065 | 6956 |
| 32 | 25.80% | 1.956 | 1.555 | 2070 | 2080 | 2075 | 7019 |
| 51 | 25.75% | 1.956 | 1.556 | 2090 | 2100 | 2095 | 7154 |

Probeta 2-8%

| | | | | | | | |
|----|--------|-------|-------|------|------|------|------|
| 4 | 26.07% | 1.935 | 1.535 | 2100 | 2090 | 2095 | 7078 |
| 6 | 26.13% | 1.936 | 1.535 | 2150 | 2160 | 2155 | 7492 |
| 7 | 26.22% | 1.936 | 1.534 | 2140 | 2140 | 2140 | 7390 |
| 12 | 26.25% | 1.936 | 1.534 | 2210 | 2210 | 2210 | 7882 |
| 15 | 26.28% | 1.936 | 1.533 | 2210 | 2200 | 2205 | 7844 |
| 19 | 26.25% | 1.936 | 1.534 | 2220 | 2230 | 2225 | 7988 |
| 22 | 26.24% | 1.936 | 1.534 | 2250 | 2250 | 2250 | 8169 |
| 32 | 26.32% | 1.935 | 1.532 | 2240 | 2250 | 2245 | 8128 |
| 51 | 26.29% | 1.935 | 1.532 | 2270 | 2280 | 2275 | 8345 |

Probeta 1-10%

| | | | | | | | |
|----|--------|-------|-------|------|------|------|------|
| 4 | 25.92% | 1.963 | 1.559 | 1990 | 1970 | 1980 | 6413 |
| 6 | 26.04% | 1.965 | 1.559 | 2040 | 2030 | 2035 | 6781 |
| 7 | 26.13% | 1.966 | 1.558 | 2000 | 2010 | 2005 | 6585 |
| 12 | 26.16% | 1.966 | 1.558 | 2060 | 2070 | 2065 | 6985 |
| 15 | 26.18% | 1.966 | 1.558 | 2070 | 2080 | 2075 | 7053 |
| 19 | 26.16% | 1.966 | 1.558 | 2070 | 2080 | 2075 | 7053 |
| 22 | 26.16% | 1.966 | 1.558 | 2100 | 2110 | 2105 | 7259 |
| 32 | 26.22% | 1.965 | 1.557 | 2120 | 2130 | 2125 | 7394 |
| 51 | 26.18% | 1.965 | 1.557 | 2130 | 2130 | 2130 | 7428 |

Probeta 2-10%

| | | | | | | | |
|----|--------|-------|-------|------|------|------|------|
| 4 | 25.68% | 1.957 | 1.557 | 2230 | 2220 | 2225 | 8073 |
| 6 | 25.75% | 1.958 | 1.557 | 2280 | 2270 | 2275 | 8445 |
| 7 | 25.83% | 1.958 | 1.556 | 2230 | 2240 | 2235 | 8153 |
| 12 | 25.87% | 1.958 | 1.556 | 2330 | 2330 | 2330 | 8860 |
| 15 | 25.88% | 1.958 | 1.556 | 2330 | 2330 | 2330 | 8859 |
| 19 | 25.86% | 1.958 | 1.556 | 2330 | 2350 | 2340 | 8936 |
| 22 | 25.87% | 1.958 | 1.556 | 2340 | 2350 | 2345 | 8973 |
| 32 | 25.91% | 1.957 | 1.555 | 2370 | 2380 | 2375 | 9201 |
| 51 | 25.91% | 1.957 | 1.554 | 2380 | 2380 | 2380 | 9237 |

En la Figura 57 se graficó la velocidad de propagación de ondas compresivas en función de la edad de las probetas. Se trazaron curvas según el contenido de cemento Portland aproximando mediante cuadrados mínimos usando para todos los casos una función logarítmica.

Al igual que en el ensayo de resistencia, la dispersión de los resultados creció con el contenido de cemento, aunque en este caso no varió significativamente con la edad de la probeta.

5.3.1 Módulo de Young para bajas deformaciones en función de la edad

En la Figura 55 se graficó el Módulo de Young para bajas deformaciones en función de la edad de las probetas. Se trazaron curvas según el contenido de cemento Portland aproximando mediante cuadrados mínimos usando para todos los casos una función logarítmica.

Se observó una evolución gradual de la rigidez a lo largo del tiempo de curado para todos los contenidos de cemento en todas las probetas.

La ganancia de rigidez entre los 7 y 28 días fue de 8.2, 8.5, 10.3, y 9.5% para las dosificaciones de 4, 6, 8 y 10% de cemento Portland respectivamente. Esto significa que el contenido de cemento no influyó en la velocidad de ganancia de rigidez.

5.3.2 Módulo de Young para bajas deformaciones en función del contenido de cemento

La variación de E_0 en función del contenido de cemento se presenta en la Figura 56.

Se trazaron curvas según la edad de las probetas aproximando mediante cuadrados mínimos usando para todos los casos una función potencial cuyas expresiones se transcriben en la parte inferior de la misma figura. El exponente de estas expresiones es muy similar para las distintas curvas y está entre 0.5 y 0.65. Por lo tanto, el Módulo de Young para bajas deformaciones es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del contenido de cemento. Además, como se observó en la sección anterior, la ganancia de rigidez en el tiempo fue independiente del contenido de cemento.

Se observa también como la curva de rigidez de 56 días es prácticamente coincidente con la de 28 días. Por lo tanto, el Módulo de Young para bajas deformaciones consiguió un desarrollo prácticamente completo a los 28 días.

5.4 Relación entre el Módulo de Young para bajas deformaciones y la resistencia a compresión

En la Figura 58 figuran los valores de rigidez para bajas deformaciones en ordenadas y de resistencia a compresión simple en abscisas para 4, 6, 8 y 10% de cemento Portland. Se trazó una curva aproximando mediante cuadrados mínimos utilizando una función potencial con exponente 0.5.

Se observa que la rigidez a baja deformación del suelo-cemento fue proporcional a la raíz cuadrada de su resistencia a compresión simple con un exponente igual a 3433MPa y una banda de ± 500 MPa. Cabe mencionar que la rigidez se midió en probetas con la humedad óptima mientras que las probetas utilizadas para medir la resistencia a compresión fueron sumergidas por 4 horas en agua antes de ensayarse.

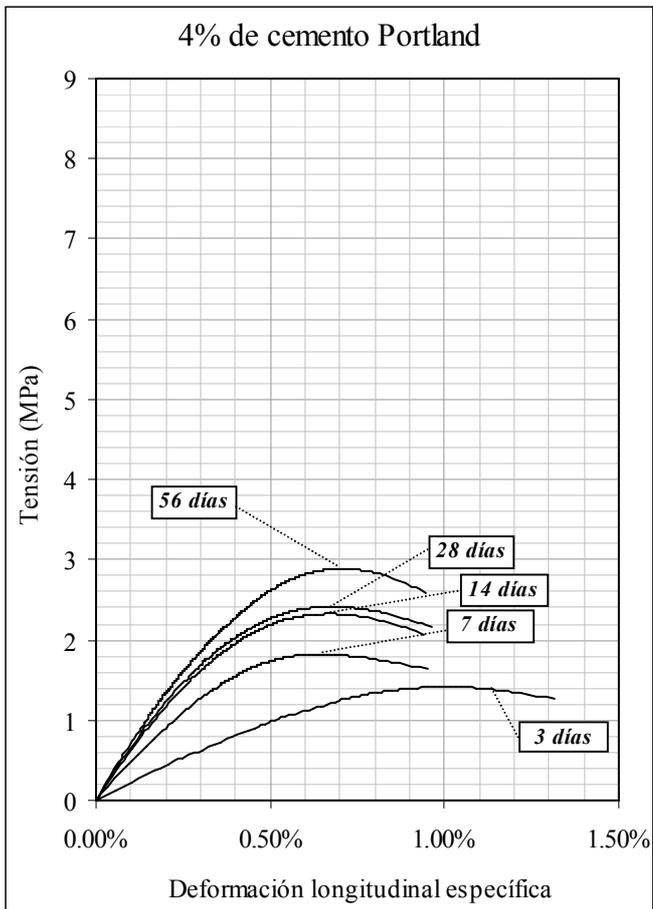


Figura 45: Curvas de tensão-deformação com 4% de cimento a diferentes idades.

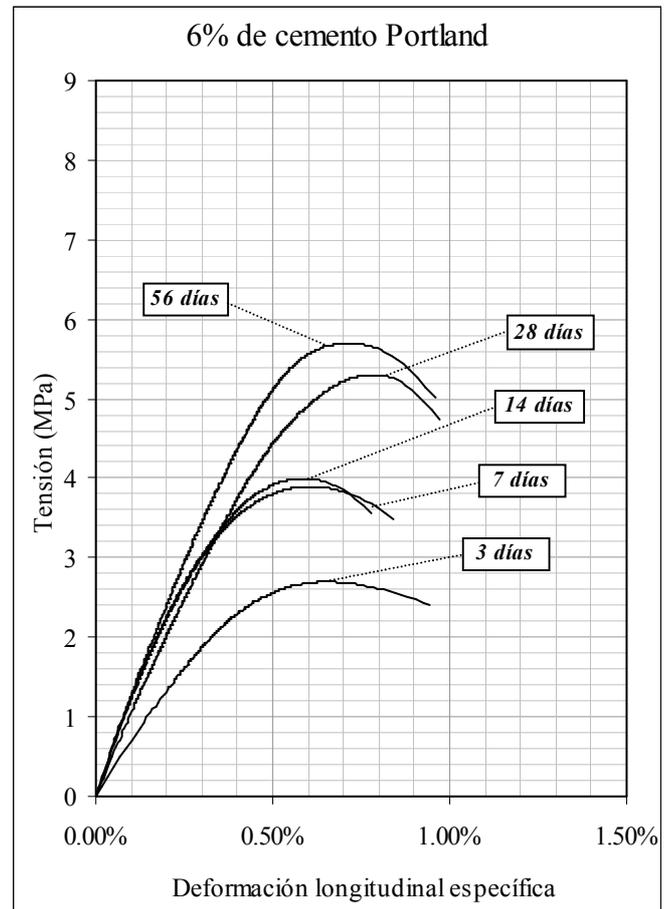


Figura 47: Curvas de tensão-deformação com 6% de cimento a diferentes idades.

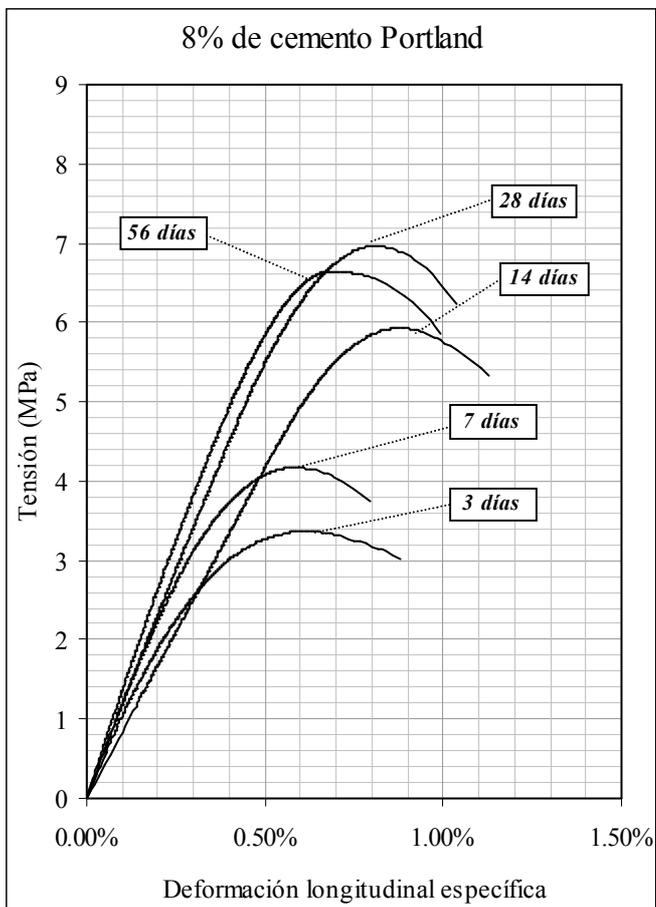


Figura 46: Curvas de tensão-deformação com 8% de cimento a diferentes idades.

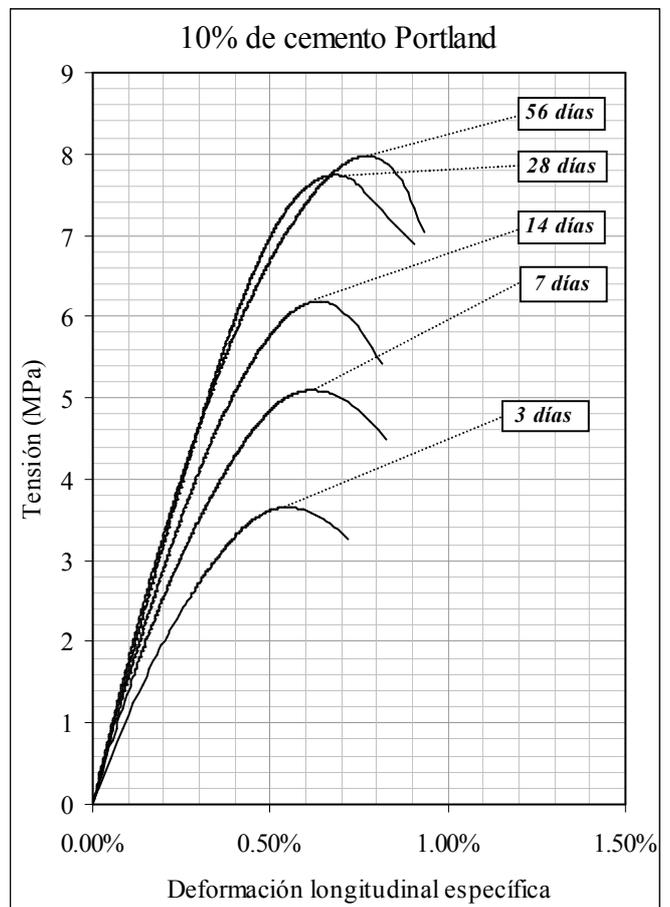


Figura 48: Curvas de tensão-deformação com 10% de cimento a diferentes idades.

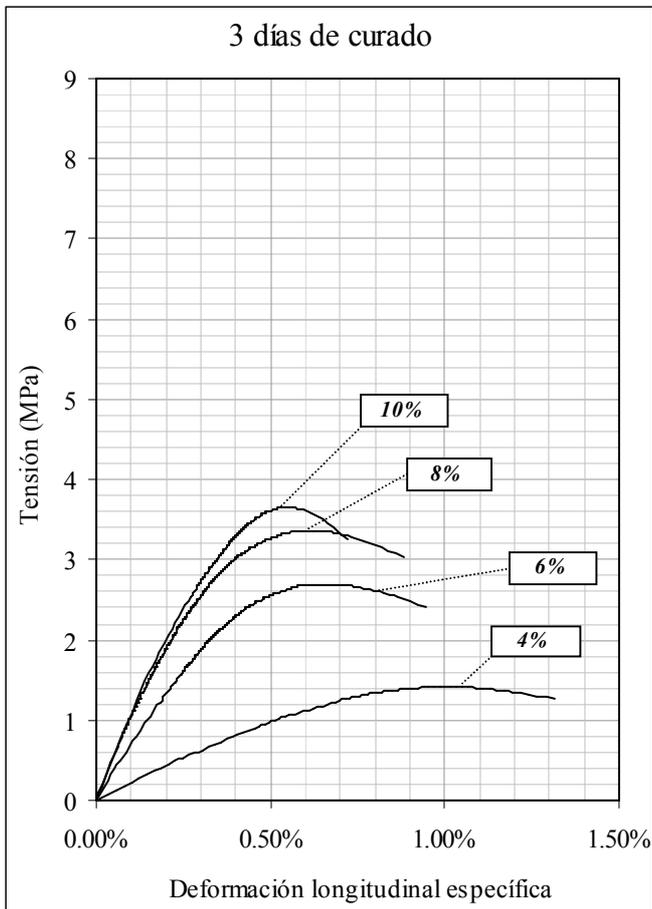


Figura 49: Curvas de tensão-deformação de probetas com 3 dias de curado com diferentes conteúdos de cimento.

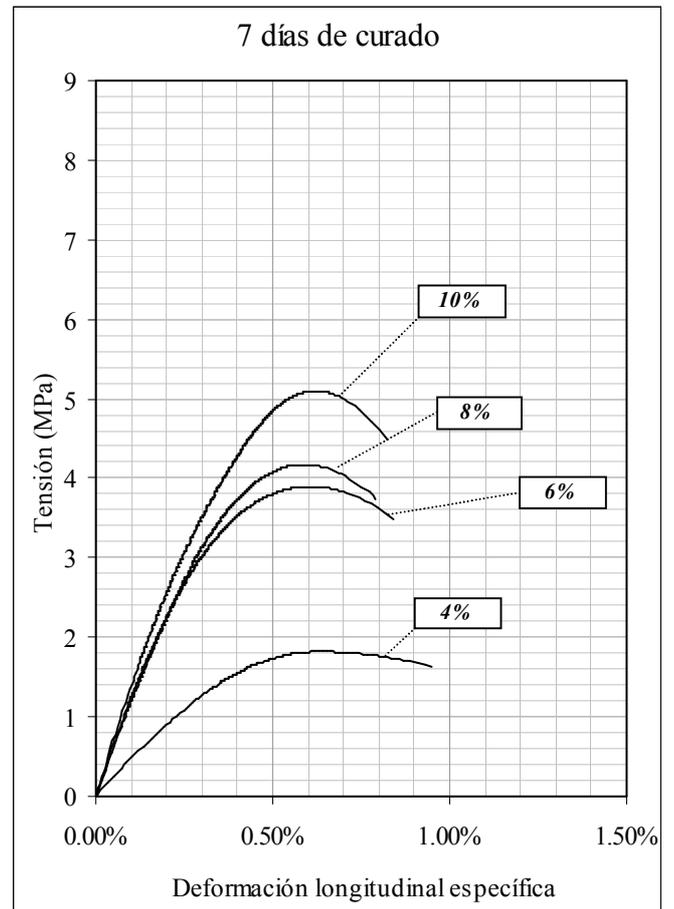


Figura 51: Curvas de tensão-deformação de probetas com 7 dias de curado com diferentes conteúdos de cimento.

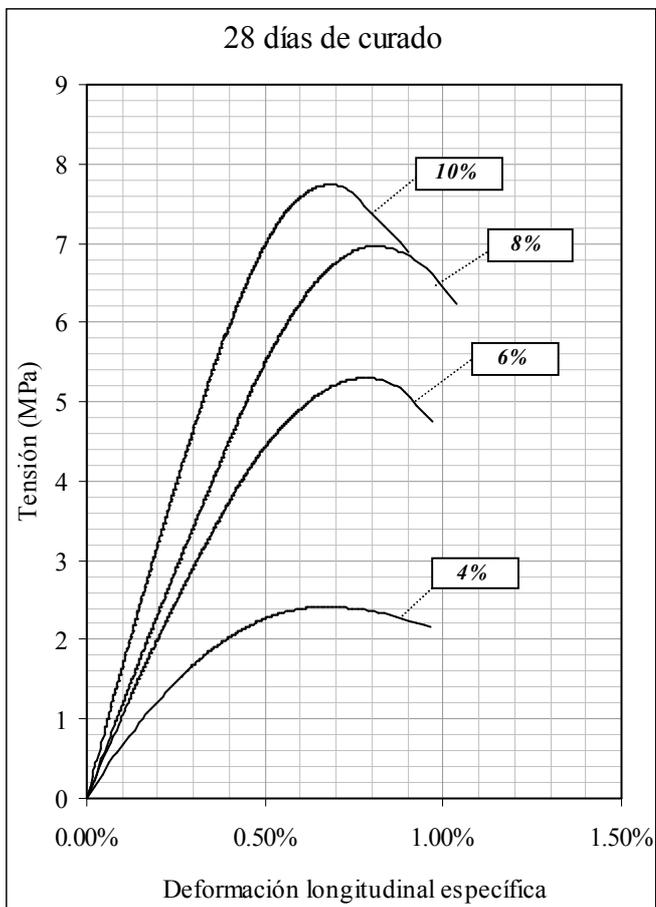


Figura 50: Curvas de tensão-deformação de probetas com 28 dias de curado com diferentes conteúdos de cimento.

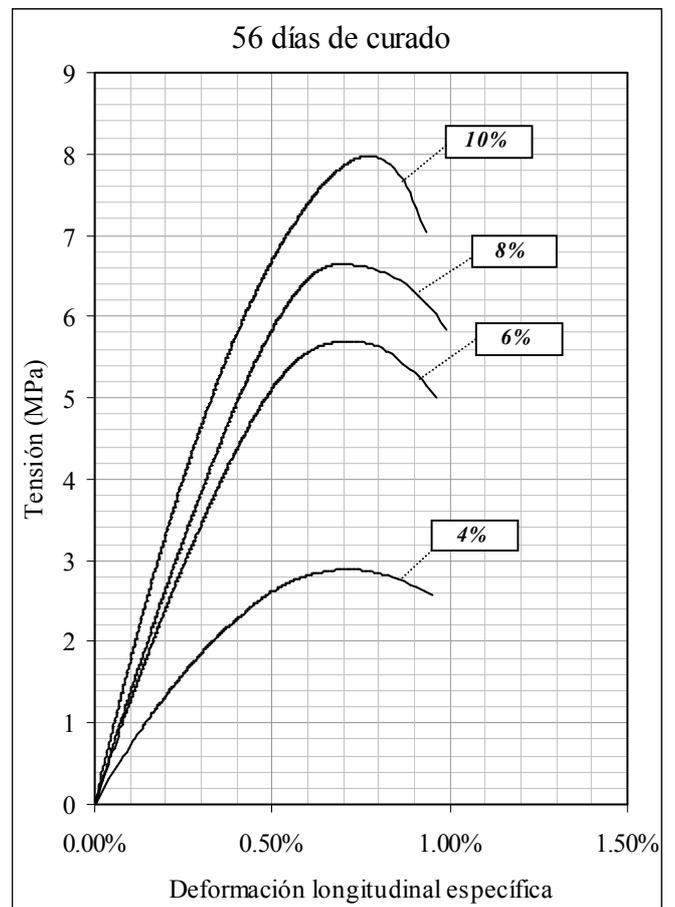


Figura 52: Curvas de tensão-deformação de probetas com 56 dias de curado com diferentes conteúdos de cimento.

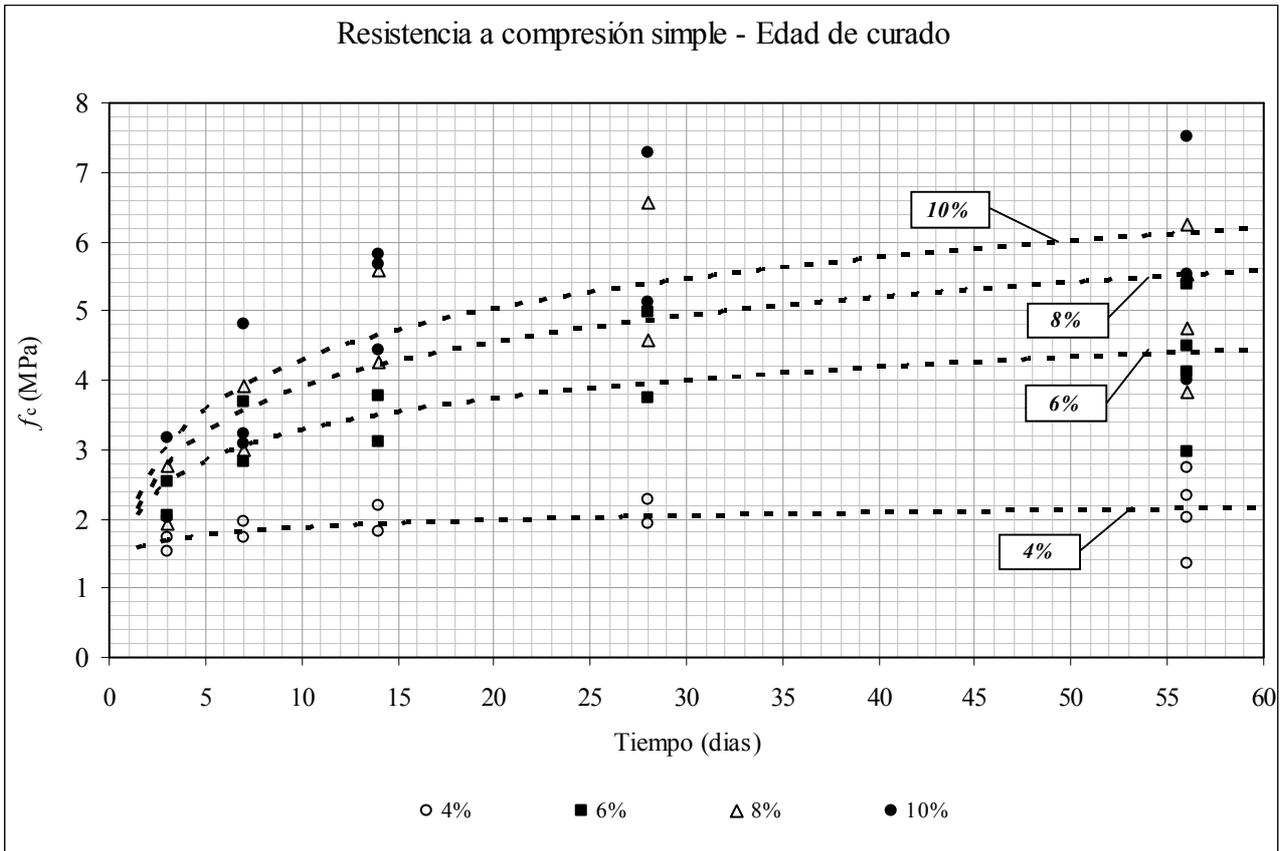


Figura 53: Resistencia a compresión simple en función del tiempo.

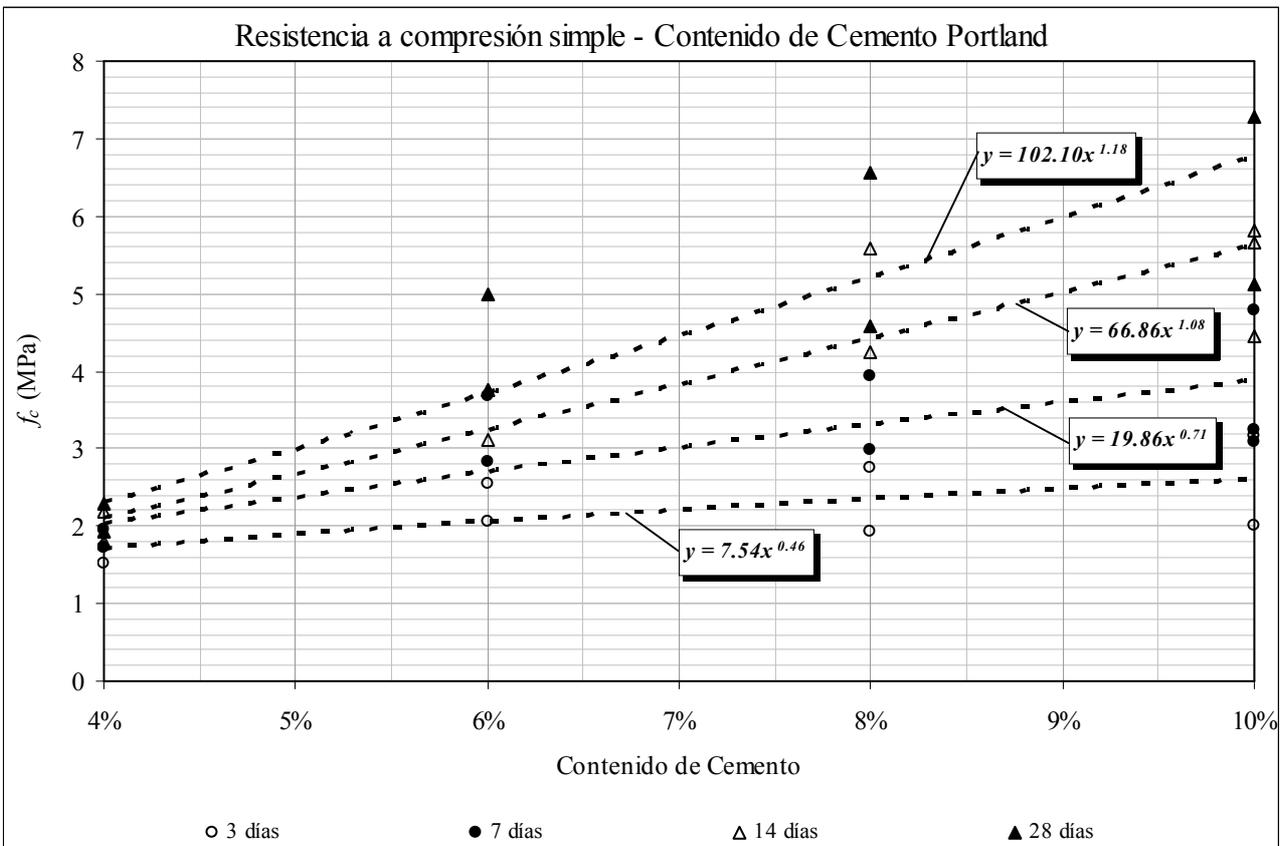


Figura 54: Resistencia a compresión simple en función del contenido de cemento.

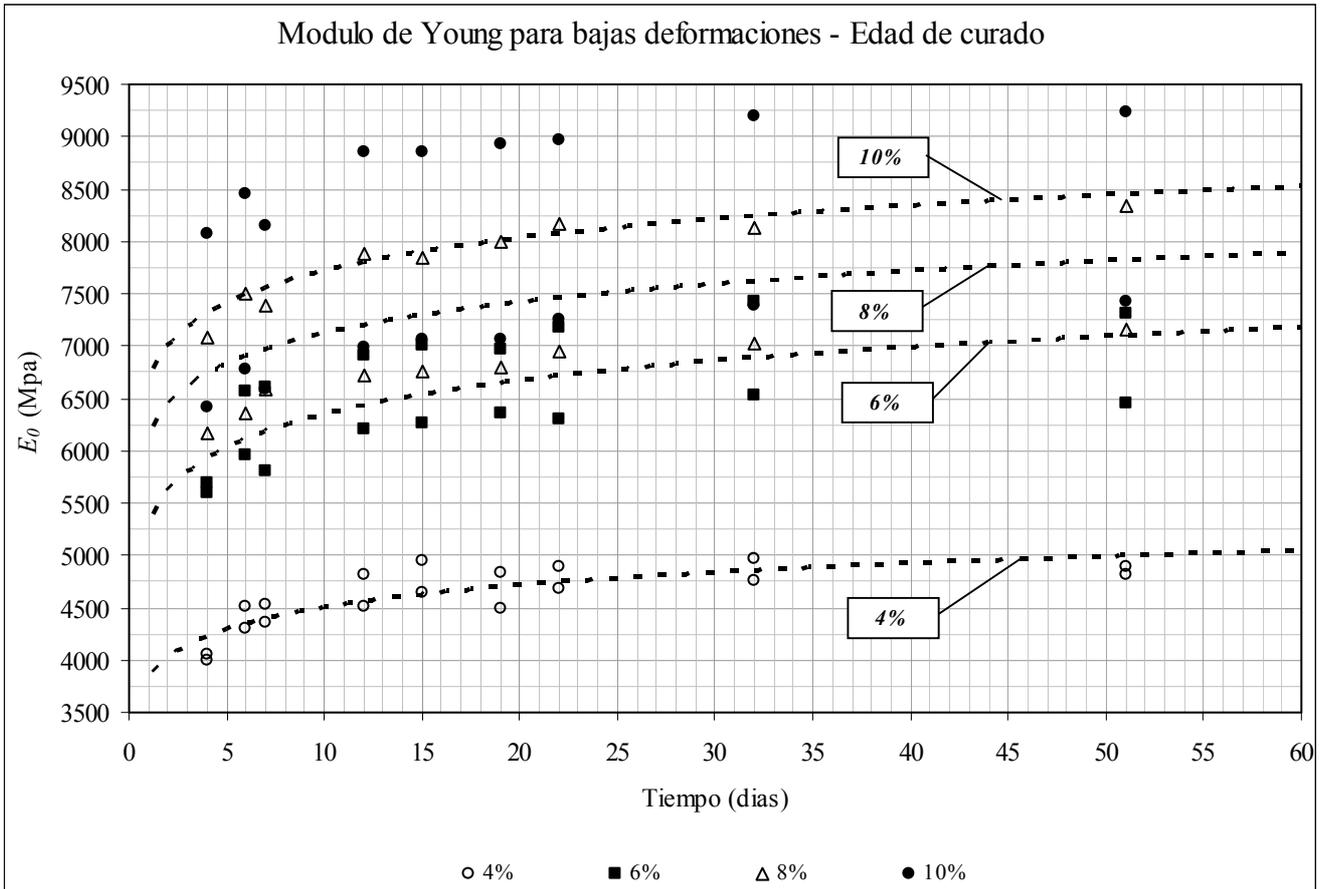


Figura 55: Módulo de Young para bajas deformaciones en función del tiempo.

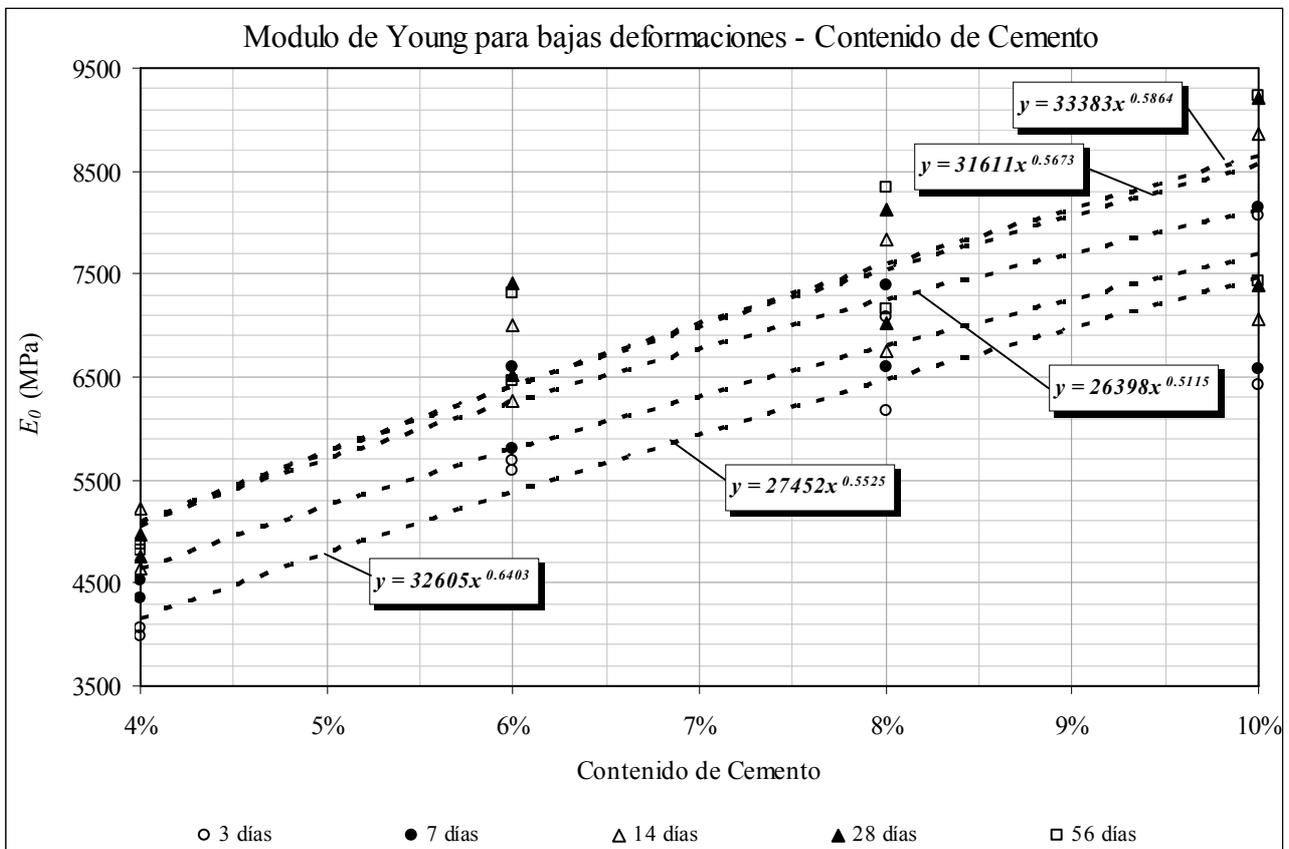


Figura 56: Módulo de Young para bajas deformaciones en función del contenido de cemento.

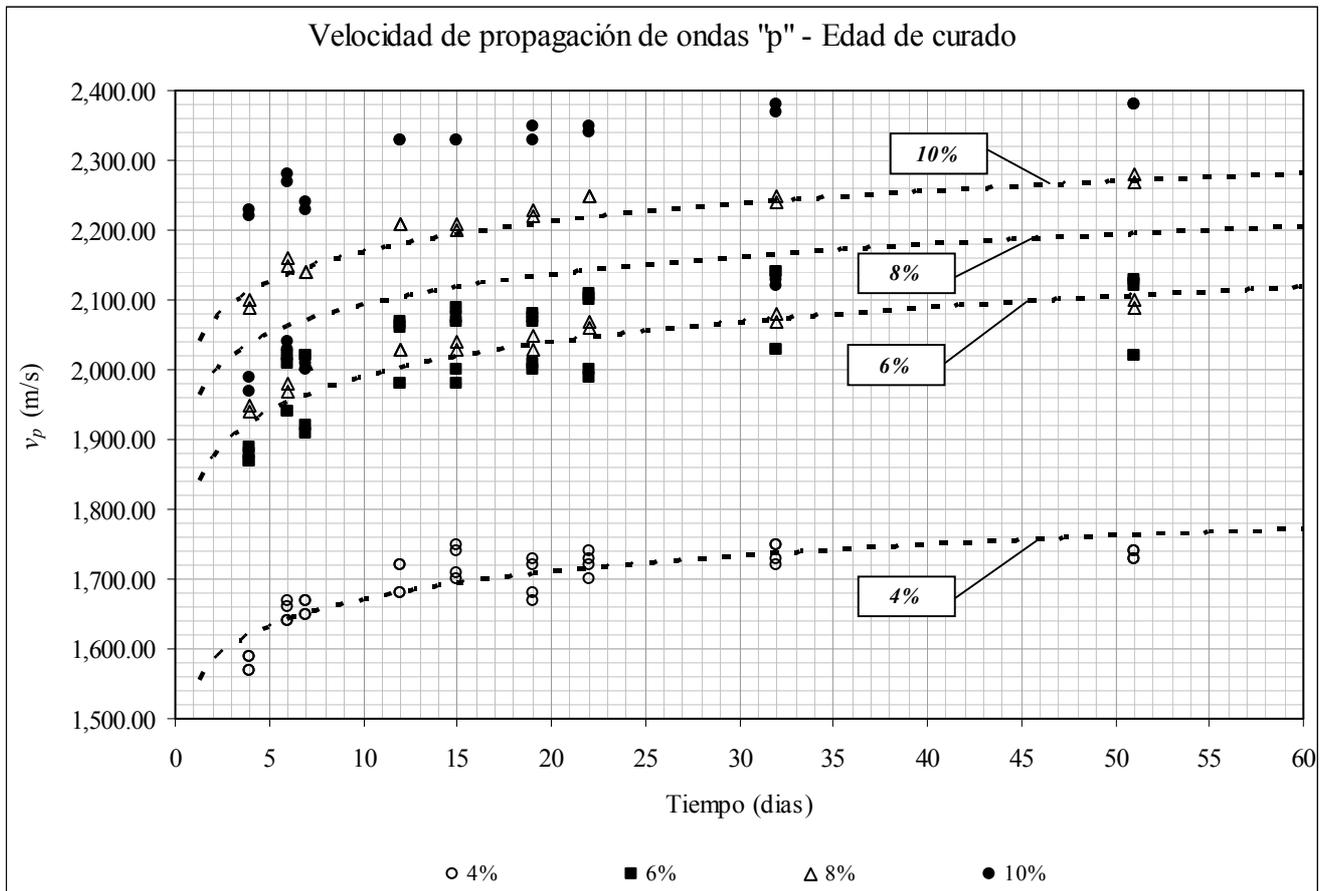


Figura 57: Velocidad de propagación de ondas compresivas en función del tiempo.

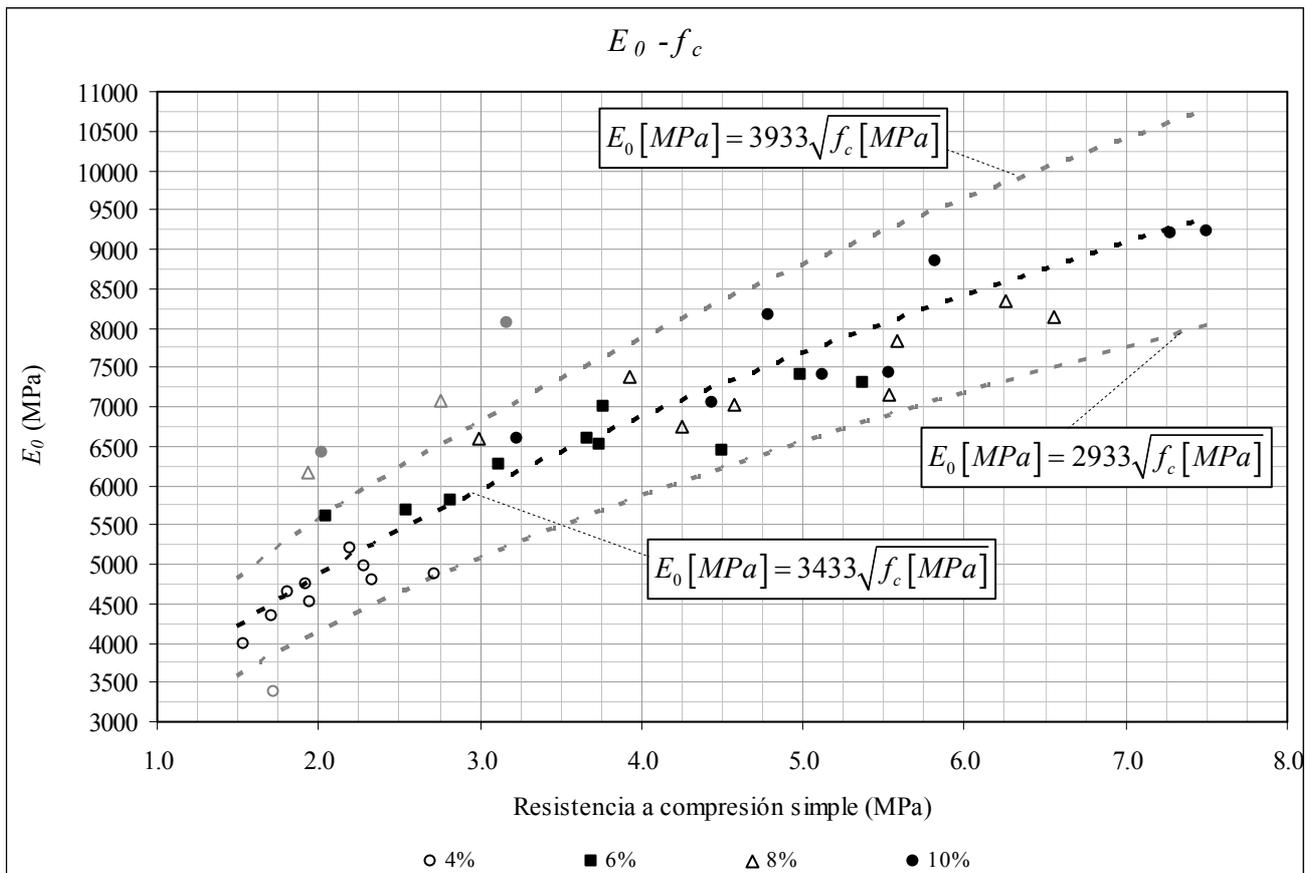


Figura 58: Módulo de Young para bajas deformaciones en función de la resistencia a compresión simple.

6 CONCLUSIONES

Los productos de las reacciones químicas entre el agua, cemento Portland y los minerales de la fracción arcillosa del suelo dependerán del tipo y de la cantidad de cada una de estas.

El suelo utilizado en este trabajo es un limo de baja plasticidad de la formación Pampeano proveniente de la localidad de Ranelagh, en la Provincia de Buenos Aires.

El cemento utilizado fue un CPN 40 (MRS).

Las dosificaciones de cemento utilizadas fueron del 4, 6, 8 y 10%.

Para este suelo y para este tipo y estas dosificaciones de cemento Portland, se observó que:

- La resistencia al desgaste abrasivo bajo ciclos de congelamiento y deshielo creció con el contenido de cemento. Las pérdidas en peso seco registradas luego de 12 ciclos para dosificaciones de cemento entre un 6 y 9% fueron menores al 8%.
- Para contenidos de cemento entre un 6 y 9% las probetas ensayadas presentaron grandes fisuras durante los ciclos de desgaste abrasivo bajo humedecimiento y secado. Todas las probetas fallaron por el desprendimiento de una de las capas antes de los 12 ciclos.
- La resistencia y la rigidez del suelo-cemento creció de forma logarítmica con el tiempo
- La resistencia a compresión simple creció con el contenido de cemento de forma proporcional a la raíz cuadrada para edades tempranas y aumentó de forma casi lineal para mayores tiempos de curado.
- El Módulo de Young para bajas deformaciones aumentó aproximadamente de forma proporcional a la raíz cuadrada del contenido de cemento para todas las dosificaciones ensayadas.
- La ganancia de resistencia a compresión simple entre los 7 y 28 días de edad creció con el contenido de cemento tendiendo a un valor constante.
- El aumento de rigidez a baja deformación entre los 7 y 28 días fue prácticamente independiente del contenido de cemento.
- La rigidez a baja deformación consiguió un desarrollo prácticamente total a los 28 días de edad.

- Se observó una gran dependencia entre las propiedades de la mezcla y la eficiencia del moldeo, compactación y curado.
- La rigidez a baja deformación del suelo-cemento fue proporcional a la raíz cuadrada de su resistencia a compresión simple.
- A mayor contenido de cemento se observó:
 - Un incremento del Módulo de Young.
 - Mayor dispersión en los valores obtenidos. Esto se debe al incremento de la rigidez, el material es más frágil y por lo tanto la propagación de las fisuras es más inestable.
 - Mayor incidencia del curado en la ganancia de resistencia.

Cuanto mayor sea el contenido de cemento, mayor deberá ser el tiempo de curado para un mismo tipo de cemento para lograr el mejor aprovechamiento de éste.

Los resultados obtenidos en el ensayo de humedecimiento y secado no cumplieron con lo especificado por la DNV en el Pliego de Especificaciones Técnicas [19] para sub-bases o bases de suelo-cemento. De utilizarse este material para esa aplicación se deberá incrementar el contenido de cemento, incorporar arena a la mezcla o aumentar la energía de compactación a fin de cumplimentar la especificación.

Todas las probetas de una serie ensayadas a 56 días presentaron resistencia a compresión simple menor que a los 28 días de edad. No se encontró la explicación de tal efecto. Posibles causas a investigar son: deficiencias en los procesos de dosificación, mezclado, compactado y curado de las probetas o posible presencia de sulfatos o sales nocivas que perjudiquen el desarrollo de la hidratación del cemento, entre otros.

Una posible línea de investigación futura es la medición del Módulo de Young para bajas deformaciones mediante la medición localizada de deformaciones en ensayos de compresión simple o triaxial.

REFERENCIAS

- [1] Sagüés, P. (2008). “Rigidez a baja deformación en el Pampeano compactado”. <http://materias.fi.uba.ar/6408/investigacion.htm>.
- [2] Quintana Crespo, E. (2005). “Relación entre las Propiedades Geotécnicas y los Componentes Puzolánicos de los Sedimentos Pampeanos”. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba.
- [3] Rico Rodriguez A. y Del Castillo H. (1977). La ingeniería de suelos en las vías terrestres, volumen 2. Editorial Limusa, 505-528.
- [4] Cordon, William A. (1962), “Resistance of Soil-Cement Exposed to Sulfates,” Bulletin No. 309, Highway Research Board, Washington, D.C., p. 37-56.
- [5] Sherwood, P. T. (1962), “Effect of Sulfates on Cement-and Lime-Stabilized Soils,” Bulletin No. 353, Highway Research Board, Washington, D.C., 1962, pp. 98-107.
- [6] Torrente, M. y Sagüés, L. (1968). Estabilización de Suelos. Suelo Cemento. Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona.
- [7] American Concrete Institute (1997). “State of the Art report on soil Cement”, ACI Committee 230.1R-90.
- [8] Hveem, F.N. y Zube, E. (1963). California Mix Design for Cement Treated Bases. California Division of Highways. Materials and Research Department. Sacramento, Cal.
- [9] Ingles, O.G. y Metcalf, J. B. (1972). Soil Stabilization: Principles and Practice. Butterworths. Sydney.
- [10] Federal Highway Administration (1962). “Soil Stabilization in Pavement Structures: A User’s Manual, V. 2”. Report No. FHWA-IP-80-2, Washington D.C.
- [11] Quintanilla Rodríguez, C. (2007). “El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimento”, Federación Interamericana del Cemento.
- [12] Marchall, T. J., (1954). “Some Properties of Soil Treated with Portland Cement,” Symposium on Soil Stabilization, Australia, p. 28-34.
- [13] Calo, D. (2008). “Diseño de Pavimentos Rígidos”. Jornadas de actualización técnica “Diseño y construcción de pavimentos de hormigón - DNV”. Instituto de Cemento Portland Argentino. http://www.icpa.org.ar/files/dc_cordoba.pdf.
- [14] ICPA, (1995). “Suelo Cemento. Una respuesta al desafío del tránsito por caminos de tierra los días de lluvia”. Revista Cemento. Año I, N° 2.
- [15] Office of Solid Waste and Emergency Resources (1983), “Lining of Waste Impoundment and Disposal Facilities”, Publicación No. SW870, Washington, D.C.
- [16] USBR (1986). “Design Standards No. 13 - Embankment Dams, Chapter 17, Soil-Cement Slope Protection”, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
- [17] Skokie, (1984). “Soil-Cement Slope Protection for Embankments: Planning and Design, Information Sheet No. IS173W”, Portland Cement Association, 10 pp.
- [18] Hansen, K. D. (1986), “Soil-Cement for Embankment Dams, Bulletin No. 54”, U.S. Committee on Large Dams, Denver.
- [19] Dirección Nacional de Vialidad, (1998). Pliego de especificaciones técnicas, Sección C.IV. p. 92.
- [20] ICPA, (1991). “Suelo - cemento. Un material con muchas aplicaciones”. Boletín ICPA N° 139.
- [21] ICPA, (1996). “Bloques con Mezclas Hipercomprimidas de Suelo – Cemento”. Revista Cemento, Año 2, N° 7.
- [22] ICPA, (2007). “Fabricación de ladrillones con mezclas de suelo y cemento Portland” <http://www.icpa.org.ar/index3.php?IDM=49&IDSM=84>
- [23] ICPA, (1996). “Construcción de viviendas con ladrillos de suelo - cemento. Experiencia de la Municipalidad de Victoria, Entre Ríos”. Revista Cemento, Año 2, N° 10.
- [24] ICPA, (1978). “Diversas aplicaciones de los ladrillos de suelo - cemento en un Viñedo de Mendoza”. Boletín ICPA N° 64.
- [25] HYPERBRICK, (2008). “STABIBLOCK’ System. sistema constructivo tipo Lego”. <http://www.hyperbrickl.com/stabiblock.ppt>
- [26] ICPA, (1993). “Silos forrajeros de suelo – cemento: Una solución económicamente ventajosa para nuestro agro”. Boletín ICPA N° 152.

NORMAS DE ENSAYO CITADAS

- IRAM 50001. Cemento. Cementos con propiedades especiales.
- IRAM 1619. Cemento. Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado.
- IRAM 1612. Cemento. Método de ensayo para la determinación de la consistencia normal.
- VN-E19. Ensayo De Compactación De Mezclas De Suelo-Cemento Y Suelo –Cal.
- VN-E20. Determinación Del Dosaje Para Ensayar Mezclas De Suelo-Cemento.
- VN-E21. Ensayo de durabilidad por humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cemento.
- VN-E22. Ensayo de durabilidad por congelamiento y deshielo para mezclas de suelo-cemento.
- VN-E33. Ensayo de compresión de probetas compactadas de suelo-cal y suelo-cemento.
- ASTM-D1633. *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders.*
- ASTM-D1635. *Standard Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement Using Simple Beam with Third-Point Loading.*
- ASTM-D4318. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.*
- ASTM-D3282. *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.*
- ASTM-D2487. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).*
- ASTM-D698. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.*