



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ

FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS, FÍSICAS Y

QUÍMICAS CARRERA INGENIERÍA CIVIL.

TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL.

TEMA:

"ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE BASE
ESTABILIZADA CON CEMENTO UTILIZANDO DISTINTOS ESPECÍMENES"

AUTORES:

ÁLAVA BASURTO YAMIL ADRIÁN

ZAMBRANO LOOR JUNIOR ANTONIO

MODALIDAD:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TUTOR:

ING. HUGO EGUEZ ÁLAVA

2022 – 2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ

FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICADO DEL TUTOR

Quien suscribe la presente el Ing. Eguez Álava Hugo Ernesto, Docente de la Universidad Técnica de Manabí, de la Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas; en mi calidad de tutor del trabajo de titulación "ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO UTILIZANDO DISTINTOS ESPECÍMENES" desarrollada por los estudiantes: Álava Basurto Yamil Adrián con C.I. 172361697-3 y Junior Antonio Zambrano Loor, con C.I. 131519896-8; en este contexto, tengo a bien extender la presente certificación en base a lo determinado en el Art. 20 y Art. 9 del instructivo de la Unidad de Integración curricular aprobado el 29-04-2022 por el HCD de facultad habiendo cumplido con los siguientes procesos:

1. Se verifico que el trabajo desarrollado por los profesionistas cumple con el diseño metodológico y rigor científico según la modalidad de titulación aprobada.
2. Se asesoró oportunamente a los estudiantes en el desarrollo del trabajo de titulación.
3. Se confirmó la originalidad del trabajo de titulación.

Cabe mencionar que durante el desarrollo del trabajo de titulación los profesionistas pusieron mucho interés en el desarrollo de cada una de las actividades de acuerdo con el cronograma trazado.

Particular que certifico para los fines pertinentes:



Firmado electrónicamente por:

**HUGO ERNESTO
EGUEZ ALAVA**

ING. EGUEZ ÁLAVA HUGO ERNESTO

TUTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ

FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN SOBRE DERECHOS DE AUTOR

Quienes firmamos la presente, profesionistas; desarrollada por los estudiantes: Álava Basurto Yamil Adrián con C.I. 131307835-2 y Junior Antonio Zambrano Loor, con C.I. 131519896-8, en calidad de autores del trabajo de titulación realizado sobre "ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO UTILIZANDO DISTINTOS ESPECÍMENES", declaramos que: El presente trabajo de titulación ha sido desarrollado en base a una exhaustiva investigación, respetando derechos intelectuales de terceros, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía, en consecuencia este trabajo de titulación es fruto del esfuerzo, entrega y dedicación a los autores, por la presente se autoriza a la UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ, hacer uso de todos los contenidos que nos pertenecen o de partes de los que contienen este proyecto, con fines estrictamente académicos o de investigación. Los derechos que como autores nos corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a nuestro favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento. Así mismo las conclusiones y recomendaciones constantes en este texto son criterios netamente personales y asumimos con responsabilidad la descripción de estas.

A handwritten signature in blue ink, reading "Yamil Alava". The signature is written in a cursive style and is tilted slightly to the right.

ÁLAVA BASURTO YAMIL ADRIÁN

AUTOR

A handwritten signature in blue ink, reading "Antonio Zambrano Loo". The signature is written in a cursive style and is tilted slightly to the right.

JR. ANTONIO ZAMBRANO LOOR

AUTOR

DEDICATORIA

Dedico:

Orgullosamente y de todo mi corazón a Dios principalmente por haberme otorgado una maravillosa familia, quienes han creído en mí siempre. Dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio, enseñándome a valorar todo lo que tengo. Dedico mi padre Freddy Zambrano y madre Zitha Loor quienes me han apoyado para poder llegar a esta instancia de mis estudios, a mi madre política María Luisa que sin duda alguna y que en paz descansa fue una de las principales orientaciones para mí, pues sin ellos no lo había logrado. Sus bendiciones a diario a lo largo de mi vida me protegen y me lleva por el buen camino, a mis docentes que se han ganado mi respeto y que además me han ensinado muchas clases interesantes, a mi tutor de tesis el Ing. Hugo Eguez por orientarme en este trabajo de titulación y brindarme su apoyo y sus consejos, a mi compañero de tesis porque a pesar de todas los obstáculos que se nos presentaron, dio todo su esfuerzo y dedicación para poder realizar esta investigación, a mis hermanos y sobrinos por sus palabras y compañía, También le dedico esto a la Srta. Pamela Varas quién ha sido mi mayor motivación para nunca rendirme en los estudios y llegar a ser una mejor persona cada día de mi vida pues su confianza y su amor me han brindado fuerzas para cumplir con mis objetivos.

Junior Antonio Zambrano Loor

DEDICATORIA

Dedico:

Infinitamente agradecido con Dios por permitirme llegar a esta instancia de mi vida, a mis familiares que fueron mi apoyo incondicional tanto en lo económico moral y psicológico. Dedico a mi madre, Raquel Basurto, que fue la persona que me dio comodidades para cumplir con esta meta, a mis abuelos Vicenta Solórzano, Ángel Basurto, donde siempre me incentivaron que me superara que el educarse es la mejor riqueza y ser ejemplo en la sociedad. Por otro punto dedico este trabajo investigativo a mis compañeros de carrera donde compartí muchas experiencias como: Visitas Técnicas, Trabajos Investigativos, aula de clases todo este entorno estimado en cinco años, situación que fue fundamental para terminar este proceso universitario. A la Ingeniera Gina Burgos que fue la persona que me oriento, a realizar mis primeras prácticas Preprofesionales en el Ministerio de Transporte y Obras Públicas Zona 4, y todo el personal de apoyo que representa esta prestigiosa institución.

A mi compañero de tesis Junior Zambrano por darme la confianza de participar por formar parte de este proyecto, y a mi tutor el Ing. Hugo Eguez Álava por ser el instructor en este trabajo investigativo, que con sus orientaciones nos recomendó a la compañía "HOLCIM" a realizar ensayos de ductilidad del material estudiado, en la ciudad de Guayaquil donde finalizamos nuestro proyecto, obteniendo resultados esperados como se planifico en el cronograma de investigación.

Álava Basurto Yamil Adrián

AGREDECIMIENTO

Agradecemos:

A la Universidad Técnica de Manabí:

Por habernos formados y orientados, especialmente a la Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas que nos permitió ser parte de ella, en la que pudimos prepararnos y crecer profesionalmente.

A Nuestros Asesores:

Ing. Hugo Eguez Álava

Por su atención, orientación y contribución en el desarrollo de esta investigación, así como también por la confianza, apoyo y su guía especializada generadas en las etapas de este trabajo.

Ing. Mario Ecuador Macias Loor

Por los conocimientos que nos brindó, la información que puso a nuestro alcance, por guiarnos y orientarnos en esta investigación.

Al laboratorio de suelo de Megarok S.A:

Total, agradecimiento a todas aquellas personas especializada por apoyarnos permitiéndonos utilizar los equipos necesarios para cada una de las etapas de este trabajo y que manera física y mentalmente dieron su aportación en esta investigación:

Jefe de Laboratorio: Ing. Mario Macias

Supervisor: Ing. Cesar Mora

Al Centro de Innovación Holcim Ecuador, Laboratorio de la Planta de Hormigones:

Por permitimos el acceso a sus dispositivos de calidad y que de manera colectiva con su personal especializado se pudo trabajar muy bien en cada uno de los ensayos realizados.

A Nuestros Seres Queridos:

Con la bendición de nuestro padre celestial le pedimos gracias por habernos dado la vida y su infinito amor que tiene, por otorgarnos a la mejor familia del mundo que han sido nuestro motor de vida, gracias a nuestra familia por apoyarnos en cada decisión y proyecto que hemos realizado, gracias a la vida porque cada día nos demuestra lo hermosa que es y lo justo que puede llegar a ser, gracias a nuestros docentes por permitirme cumplir con las exigencias y excelencias de cada materia.

A nuestros compañeros y amigos. Que al final de la carrera llegamos a relacionarnos como colegas y esperamos contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

En general a todas las personas que confiaron en nosotros, y que de una u otras maneras nos motivaron a culminar este trabajo de titulación para obtener el título de ingenieros civiles que ya es de gran importancia en nuestra vida.

Autores

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO I.....	27
1.1	TEMA.....	27
1.1.1	Localización de la investigación	27
1.1.1.1	Macro Localización	27
1.1.1.2	Micro Localización	27
1.2	INTRODUCCIÓN.....	28
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	30
1.3.1	Descripción de la Realidad Problemática	30
1.3.2	Formulación del Problema	31
1.3.3	Delimitación del Trabajo de Titulación	31
1.3.3.1	Espacial	31
1.3.3.2	Temporal	31
1.4	ANTECEDENTES.....	32
1.5	JUSTIFICACIÓN.....	34
1.6	OBJETIVOS.....	36
1.6.1	Objetivo general.	36
1.6.2	Objetivos específicos.	36
2	CAPÍTULO II.....	37
2.1	BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO.....	37
2.1.1	Científico:.....	37

2.1.1.1	Generalidades de la mezcla base de agregados gruesos y finos estabilizada con cemento.	37
2.1.1.1.1	Materiales seleccionados como base.	38
2.1.1.1.1.1	Material base clase 1	39
2.1.1.2	Fundamentos de bases granulares y bases estabilizadas con cemento hidráulico utilizados en pavimentos.	40
2.1.1.2.1	Tipos de mezclas de bases estabilizadas con cemento.	42
2.1.1.2.1.1	Base de agregados estabilizada con cemento.	43
2.1.1.2.1.2	Base granular estabilizadas con cemento.	45
2.1.1.2.1.3	Base fina-granular estabilizadas con cemento.	45
2.1.1.2.1.4	Base plástica estabilizadas con cemento	45
2.1.1.2.1.5	Base clase 1A estabilizada con cemento.	46
2.1.1.3	Componentes de la base clase 1A estabilizada con cemento.	48
2.1.1.3.1	Base clase 1A	48
2.1.1.3.1.1	Límites de Atterberg.	48
2.1.1.3.1.2	Capacidad de soporte del suelo	49
2.1.1.3.1.3	Granulometría adecuada de las partículas	49
2.1.1.3.2	Cemento hidráulico.	52
2.1.1.3.2.1	Cemento Pozolánico (ASTM C 1157).	54
2.1.1.3.2.2	Cemento tipo GU	55
2.1.1.3.2.3	Exigencias de uso del cemento para la base estabilizada con cemento GU	56
2.1.1.3.3	Agua potable	56

2.1.1.3.3.1	Funciones principales del agua:	57
2.1.1.3.4	Aditivos	58
2.1.1.4	Propiedades físicas de la base estabilizada con cemento.....	59
2.1.1.4.1	Densidad.....	60
2.1.1.4.2	Permeabilidad.....	61
2.1.1.4.3	Contracción	61
2.1.1.4.4	Agrietamiento.....	62
2.1.1.5	Propiedades Mecánicas de la base estabilizada con cemento.....	63
2.1.1.5.1	Resistencia a la Compresión Simple	63
2.1.1.5.2	Resistencia a la flexión.....	65
2.1.1.5.3	Módulo de elasticidad	66
2.1.1.5.4	Capacidad portante de la base estabilizada con cemento.....	67
2.1.1.5.5	Módulo de Poisson.....	68
2.1.2	Teórico:	69
3	CAPÍTULO III.....	71
3.1	DISEÑO METODOLÓGICO.....	71
3.1.1	Hipótesis.....	71
3.1.2	Variables:	71
3.1.2.1	Variable independiente.....	71
3.1.2.2	Variable dependiente	72
3.1.3	Nivel de investigación.....	72

3.1.4	Método.....	72
3.1.4.1	FASE A. Marco teórico y metodología de los ensayos.	72
3.1.4.2	FASE B. Ensayos.....	72
3.1.4.2.1	Caracterización del material granular	72
3.1.4.2.2	Determinación del diseño de las mezclas.....	84
3.1.4.2.3	Evaluación de la mezcla	85
3.1.4.2.4	Procedimientos de ensayos alternativos tomando como referencia principal la ASTM D 1633 y ASTM C 1435 empleados en la elaboración de la BAEC:.....	86
3.1.4.2.4.1	Ensayo A:.....	86
3.1.4.2.4.2	Ensayo B	87
3.1.4.2.4.3	Ensayo C	87
3.1.4.2.4.4	Uso y Significado.....	88
3.1.4.2.4.5	Equipos.....	89
3.1.4.2.4.6	Compactación de los cilindros.	90
3.1.4.2.4.7	Curado de los especímenes.	91
3.1.4.2.5	Determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico.	92
3.1.4.2.5.1	Ensayo de Pulso Ultrasónico.....	97
3.1.4.2.6	Determinación de la resistencia a la compresión simple.....	100
3.1.4.2.6.1	Realización de ensayo de resistencia a compresión.	101
3.1.4.2.6.2	Máquina de ensayo a compresión:	102
3.1.4.2.7	Determinación del Módulo de Elasticidad Estático.....	106
3.1.4.2.7.1	Realización de ensayo del Módulo de Elasticidad Estático.....	107

3.1.4.2.7.2	Máquina de ensayo a compresión:	108
3.1.4.3	FASE C. Análisis y resultados de los ensayos.	125
3.1.4.3.1	Análisis estadístico.....	125
4	CAPÍTULO IV	136
4.1	CONCLUSIONES	136
4.2	RECOMENDACIONES.....	137
5	CAPÍTULO V.....	138
5.1	ANEXOS.....	138
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Recomendaciones para uso de material de base.</i>	38
Tabla 2.	<i>Recomendaciones técnicas de la MOP para uso de material de base A y B.</i>	39
Tabla 3.	<i>Graduaciones recomendables para tratamientos de suelos areno - arcillosos.....</i>	50
Tabla 4.	<i>Clasificación de las AASTHO preparada para el diseño de suelo – cemento.</i>	50
Tabla 5.	<i>Especificaciones para los agregados de las bases o las subbases.</i>	51
Tabla 6.	<i>Requisitos Granulométricos Comparación Con Normativas Internacionales.</i>	52
Tabla 7.	<i>Requisitos de Plasticidad Comparación Normas Internacionales.</i>	52
Tabla 8.	<i>Distintas normas para los distintos tipos de cementos.</i>	53
Tabla 9.	<i>Comportamiento de resistencia a la compresión del cemento tipo ASTM C 1157 </i>	54
Tabla 10.	<i>Resistencia a la compresión simple de 7 y 28 días de suelo-cemento </i>	63
Tabla 11.	<i>Requerimiento mínimo de resistencia a la compresión de suelo-cemento </i>	64
Tabla 12.	<i>Requerimiento mínimo de resistencia a la compresión de suelo-cemento </i>	64
Tabla 13.	<i>Requerimiento mínimo de resistencia a la compresión de suelo-cemento </i>	64
Tabla 14.	<i>Propiedades comúnmente exigidas en mezcla de suelo – cemento.</i>	68
Tabla 15.	<i>Módulo de Poisson medidos del suelo – cemento.</i>	68
Tabla 16.	<i>Módulo de Poisson.</i>	69
Tabla 17.	<i>Requisitos típicos de cemento para varios tipos de suelo.</i>	69
Tabla 18.	<i>Ensayo de humedad natural de la base clase 1A (NTE INEN 1160).....</i>	73
Tabla 19.	<i>Ensayo granulométrico de la base clase 1A (NTE INEN 696).....</i>	74
Tabla 20.	<i>Ensayo de límites de Atterberg de la base clase 1A (NTE INEN 691 – 692) </i>	76

Tabla 21.	<i>Ensayo de Proctor Modificado de la base clase 1A (NTE INEN 857)</i>	78
Tabla 22.	<i>Ensayo de CBR de la base clase 1A (ASTM D 1883)</i>	80
Tabla 23.	<i>Ensayo penetración de CBR de la base clase 1A (ASTM D 1883)</i>	81
Tabla 24.	<i>Resultados del ensayo de CBR de la base clase 1A</i>	82
Tabla 25.	<i>Diseño de las Mezclas usada para este proyecto</i>	84
Tabla 26.	<i>Resultados de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros de 150x300 mm</i>	99
Tabla 27.	<i>Resultados de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros de 100x200 mm</i>	99
Tabla 28.	<i>Resultados de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros de 100x115 mm</i>	100
Tabla 29.	<i>Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión simple en cilindros de 150x300 mm</i>	103
Tabla 30.	<i>Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión simple en cilindros de 100x200 mm</i>	105
Tabla 31.	<i>Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión simple en cilindros de 100x115 mm</i>	105
Tabla 32.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 4 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad</i>	110
Tabla 33.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad</i>	112
Tabla 34.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 6 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad</i>	114
Tabla 35.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 4 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad</i>	116

Tabla 36.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5 % de cemento Holcim GU con más de 28 días de Edad</i>	118
Tabla 37.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 6 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad</i>	120
Tabla 38.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5.5 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad</i>	122
Tabla 39.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5.5 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad</i>	124
Tabla 40.	<i>Análisis de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros de 7 días.</i>	126
Tabla 41.	<i>Análisis de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros con más de 28 días.</i>	126
Tabla 42.	<i>Análisis de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros con más de 28 días.</i>	127
Tabla 43.	<i>Resumen de valores del módulo de elasticidad dinámico obtenidos del análisis del ensayo de pulso ultrasónico en cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños. ...</i>	128
Tabla 44.	<i>Resumen de desviaciones estándar del módulo de elasticidad dinámico</i>	129
Tabla 45.	<i>Análisis de los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con 7 días.</i>	130
Tabla 46.	<i>Análisis de los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con más de 28 días.</i>	130
Tabla 47.	<i>Análisis de los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con más de 28 días.</i>	131
Tabla 48.	<i>Resumen de valores de esfuerzos obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.</i>	132
Tabla 49.	<i>Resumen de desviaciones estándar de la resistencia a compresión simple.</i>	133

Tabla 50. <i>Resumen de resultados obtenidos de los ensayos del módulo de elasticidad estático en cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.</i>	133
--	-----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	<i>a. Micro localización de la Cantera Megarok S.A. b. Micro localización de la planta de cemento Holcim Ecuador.</i>	<i>27</i>
Ilustración 2.	<i>Mezclas de suelo Cemento según material predominante.</i>	<i>38</i>
Ilustración 3.	<i>Estructura típica de un pavimento de hormigón</i>	<i>40</i>
Ilustración 4.	<i>Paquete estructural de un pavimento flexible con materiales mejorados</i>	<i>41</i>
Ilustración 5.	<i>Paquete estructural de un pavimento rígido con materiales mejorados</i>	<i>42</i>
Ilustración 6.	<i>Gráfica de resistencia a la compresión con relación a los días de su dosificación...</i>	<i>55</i>
Ilustración 7.	<i>Estudio comparativo de resistencia a la compresión simple de especímenes de suelo cemento a través del tiempo para diferentes proyectos. (Revista ISCYC No. 43)</i>	<i>65</i>
Ilustración 8.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad estáticos y pulso ultrasónico módulos dinámicos.</i>	<i>67</i>
Ilustración 9.	<i>Micro localización de la cantera Megarok S.A. se encuentra localizada en el sector Picoazá del cantón Portoviejo perteneciente a la provincia de Manabí.</i>	<i>71</i>
Ilustración 10.	<i>Extracción del material granula base y toma de muestra</i>	<i>73</i>
Ilustración 11.	<i>Ensayo Granulométrico del material granular base clase 1 A.</i>	<i>73</i>
Ilustración 12.	<i>Gráfica del ensayo granulométrico de la base clase 1A (NTE INEN 696)</i>	<i>75</i>
Ilustración 13.	<i>Ensayo de límites de Aterberg método INEN 685</i>	<i>75</i>
Ilustración 14.	<i>Gráfica del ensayo granulométrico de la base clase 1A (NTE INEN 691 – 692). .</i>	<i>76</i>
Ilustración 15.	<i>Ensayo de Proctor Modificado método ASTM D-1557</i>	<i>77</i>
Ilustración 16.	<i>Gráfica del ensayo de Proctor Modificado de la base clase 1A (NTE INEN 857)</i>	<i>79</i>

Ilustración 17.	<i>Lectura de los diales en el esponjamiento del CBR</i>	79
Ilustración 18.	<i>Gráfica de penetración del ensayo de CBR de la base clase 1A.</i>	83
Ilustración 19.	<i>Gráfica del ensayo de CBR de la base clase 1A.</i>	83
Ilustración 20.	<i>Mezcla de los componentes del suelo cemento.</i>	85
Ilustración 21.	<i>Medidas de los cilindros pequeños</i>	86
Ilustración 22.	<i>Medidas de los cilindros medianos</i>	87
Ilustración 23.	<i>Medidas de los cilindros pequeños</i>	87
Ilustración 24.	<i>Instrumentos para llevar a cabo la compactación.</i>	89
Ilustración 25.	<i>Ensayo de compactación de la BAEC.</i>	90
Ilustración 26.	<i>Curado de los especímenes de diferentes edades y tamaños.</i>	91
Ilustración 27.	<i>Funcionamiento del equipo de pulso ultrasónico.</i>	95
Ilustración 28.	<i>Equipo utilizado en el ensayo de pulso ultrasónico</i>	96
Ilustración 29.	<i>Dimensiones y pesos de los especímenes previo al ensayo de pulso ultrasónico.</i>	97
Ilustración 30.	<i>Ensayo de resistencia a la compresión simple.</i>	101
Ilustración 31.	<i>Máquina de ensayo a compresión, Servo Plus.</i>	102
Ilustración 32.	<i>Fotografías de cilindros de base estabilizada con cemento tipo GU después resistir su máxima carga.</i>	103
Ilustración 33.	<i>Fotografías de un cilindro de 150x300 mm calibrado para su respectivo ensayo de Módulo de Elasticidad.</i>	108
Ilustración 34.	<i>Máquina de ensayo a compresión, Servo Plus.</i>	109
Ilustración 35.	<i>Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 4% de Cemento Tipo GU con 7 Días.</i>	111

Ilustración 36. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 5% de Cemento Tipo GU con 7 Días.	113
Ilustración 37. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 6% de Cemento Tipo GU con 7 días.	115
Ilustración 38. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 4% de Cemento Tipo GU con más de 28 días.	117
Ilustración 39. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 5% de Cemento Tipo GU con más de 28 días.	119
Ilustración 40. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 6% de Cemento Tipo GU con más de 28 días.	121
Ilustración 41. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 5.5 % de Cemento Tipo GU con más de 28 días.	123
Ilustración 42. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 5.5 % de Cemento Tipo GU con más de 28 días.	125
Ilustración 43. Gráficas de los resultados del módulo de elasticidad dinámico de cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.	128
Ilustración 44. Gráficas de las desviaciones estándar del módulo de elasticidad dinámico.	129
Ilustración 45. Gráficas de los resultados de la resistencia a la compresión de cilindros con diferentes edades y tamaños.	132
Ilustración 46. Gráficas de las desviaciones estándar del módulo de elasticidad dinámico.	133
Ilustración 47. Análisis de los resultados de Ductilidad de cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.	134

Ilustración 48.	<i>Gráficas de Esfuerzo – Deformación de los datos obtenidos con los ensayos de módulo de elasticidad estático de cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.</i>	135
Ilustración 49.	<i>Planta de explotación de materiales de construcción, cantera Megarok S.A.</i>	138
Ilustración 50.	<i>Toma de muestra de material Base clase 1A de la planta de trituración y almacenamiento del material granular y cemento Holcim tipo GU.</i>	138
Ilustración 51.	<i>Proceso de ensayos de granulometría del material granular.</i>	139
Ilustración 52.	<i>Ensayos de granulometría fina y límites de Atterberg.</i>	139
Ilustración 53.	<i>Ensayo de Proctor modificado y CBR.</i>	140
Ilustración 54.	<i>Componentes y mezcla de la BAEC.</i>	140
Ilustración 55.	<i>Preparación de la mezcla de BAEC e instrumentos para el ensayo de compactación.</i>	141
Ilustración 56.	<i>Compactación y enrasado de la BAEC en sus respectivos especímenes.</i>	141
Ilustración 57.	<i>Cilindros compactados en los especímenes para su posterior curado.</i>	142
Ilustración 58.	<i>Transporte de los especímenes a Holcim Ecuador en Guayaquil.</i>	143
Ilustración 59.	<i>Ensayo pulso ultrasónico y resistencia a la compresión simple.</i>	143
Ilustración 60.	<i>Ensayo de módulo de elasticidad en cilindros de 150x300 mm.</i>	144
Ilustración 61.	<i>Cilindros de 150x300 mm en su primer día de curado y después de su rotura.</i>	144
Ilustración 62.	<i>Fotografía del personal de las empresas Megarok. S.A. y Holcim Ecuador Guayaquil.</i>	145

RESUMEN

Este proyecto de investigación se hizo con la finalidad de indagar el comportamiento físico y utilizando como efecto la base estabilizada con cemento utilizando distintos especímenes a la hora de poder medir su resistencia a la compresión de las cuales cuyas características granulométricas tienen que cumplir con las especificaciones mediante el ensayo INEN 696 y 697 (AASHTO T-11 y T 27) como base clase 1A, puesto a todos los ensayos que se han realizado en las instalaciones los laboratorios de las empresas Megarok S.A ubicado en la ciudad de Portoviejo y Holcim Ecuador Guayaquil para obtener resultados de la caracterización del material principal, del tipo de la mezcla y resistencias, se hizo énfasis en la determinación— de las propiedades físicas del material granular extraído de la cantera Megarok y seleccionado como base clase 1A, Éste material fue mezclado con cemento Holcim tipo GU normalizado por NTE INEN 2380 y se probaron 4 contenidos de cemento del 4.0, 5.0, 5.5 y 6.0 % para los tres tipos de especímenes detallados a continuación, 150x300 mm, 100x200 mm y 100x115 mm.

Una vez obtenida la mezcla con un contenido de cemento Holcim tipo GU, se tomaron para su compactación utilizando un martillo Dewalt (eléctrico) y seis especímenes conformados por tres equipos de dos compañeros, se trabajó con 4.0, 5.0, 5.5 y 6.0 % de cemento, también se consideró una división de ensayos haciendo énfasis al comportamiento físico y resistente de la BAEC a diferentes edades de su respectiva dosificación inicial, en reducidas palabras se harán ensayos a los 7 y 28 días de su compactación inicial en sus respectivos especímenes.

El análisis comparativo de la resistencia la compresión de la BAEC utilizando distintos especímenes se estudió, realizando ensayos simples de laboratorio en cilindros mencionados anteriormente, dando con resultado su comportamiento, características y propiedades físicas.

En total se realizaron 48 ensayos de compactación ASTM D 1633 y ASTM C 1435 y resistencia a la compresión ASTM C39, 40 ensayos de pulso ultrasónico NTE INEN-ISO 7963, 1 ensayos de

granulometría INEN 696 y 697, 1 ensayo de límite de Atterberg mediante UNE 103103 y UNE 103104, 1 ensayo de Proctor Modificado ASTM D-1557 y 1 ensayo de CBR mediante NTE INEN 685, además 8 ensayos para obtener el módulo de elasticidad estáticos en cilindros de 150x300 mm a diferentes edades y porcentajes de cemento.

En los ensayos se pudo observar que la BAEC tiene un efecto de aumentar la capacidad portante del suelo y considerablemente las propiedades físicas en general. El efecto de la resistencia a la compresión dio mejores resultados mayormente en los especímenes de 100x200 mm en donde la mezcla tuvo un porcentaje de cemento del 6% y compactado casi en el mismo instante de que la mezcla ya estuviera lista, posterior mente pueden haber situaciones en donde la compactación no es la adecuada disminuyendo considerablemente las propiedades físicas de la BAEC, otras de las cualidades para obtener buenas resistencia es determinar la cantidades exactas de los componentes.

En términos generales, las mejores condiciones de resistencia a la compresión, trabajabilidad y compactación se obtuvieron en los especímenes medianos de 100x200 mm para un contenido de cemento tipo GU del 5.5%.

ABSTRACT

This research project was carried out with the purpose of investigating the physical behavior and using as an effect the base stabilized with cement using different specimens when it comes to being able to measure its resistance to compression, whose granulometric characteristics have to comply with the specifications by means of the INEN 696 and 697 test (AASHTO T-11 and T 27) as a class 1A basis, put to all the tests that have been carried out in the facilities of the laboratories of the companies Megarok S.A located in the city of Portoviejo and Holcim Ecuador Guayaquil for obtain results of the characterization of the main material, of the type of mixture and resistance, emphasis was placed on the determination of the physical properties of the granular material extracted from the Megarok quarry and selected as a class 1A base, this material was mixed with Holcim cement type GU normalized by NTE INEN 2380 and 4 cement contents of 4.0, 5.0, 5.5 and 6.0% were tested for the The three types of specimens detailed below, 150x300 mm, 100x200 mm and 100x115 mm.

Once the mixture with a GU type Holcim cement content was obtained, it was taken for compaction using a Dewalt hammer (electric) and six specimens made up of three teams of two partners, working with 4.0, 5.0, 5.5 and 6.0% cement, a division of tests was also considered, emphasizing the physical and resistant behavior of the BAEC at different ages of its respective initial dosage, in short, tests will be carried out at 7 and 28 days of its initial compaction in its respective specimens.

The comparative analysis of the compression resistance of the BAEC using different specimens was studied, performing simple laboratory tests on cylinders mentioned above, resulting in their behavior, characteristics and physical properties.

In total, 48 ASTM D 1633 and ASTM C 1435 compaction tests and ASTM C39 compressive strength tests were carried out, 40 NTE INEN-ISO 7963 ultrasonic pulse tests, 1 INEN 696 and 697 granulometry tests, 1 Atterberg limit test using UNE 103103 and UNE 103104, 1 Modified Proctor

test ASTM D-1557 and 1 CBR test using NTE INEN 685, in addition to 8 tests to obtain the static modulus of elasticity in 150x300 mm cylinders at different ages and percentages of cement.

In the tests it was observed that the BAEC has an effect of increasing the bearing capacity of the soil and considerably the physical properties in general. The effect of compressive strength gave better results, mainly in the 100x200 mm specimens where the mixture had a cement percentage of 6% and compacted almost at the same time that the mixture was ready, later there may be situations where the compaction is not adequate, considerably reducing the physical properties of the BAEC, other qualities to obtain good resistance is to determine the exact amounts of the components.

In general terms, the best conditions of compressive strength, workability and compaction were obtained in the medium specimens of 100x200 mm for a GU type cement content of 5.5%.

1 CAPÍTULO I

1.1 TEMA

"ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO UTILIZANDO DISTINTOS ESPECÍMENES"

1.1.1 Localización de la investigación

1.1.1.1 Macro Localización

Este trabajo de titulación se llevó a cabo en Ecuador en la provincia de Manabí, Portoviejo, en la cantera Megarok S.A. del cantón de Portoviejo ubicada en la parroquia Picoazá y en la planta de cemento Holcim en la provincia de Guayas del cantón Guayaquil Ubicada en la Av. Barcelona y, Av. José Rodríguez Bonín, Guayaquil.

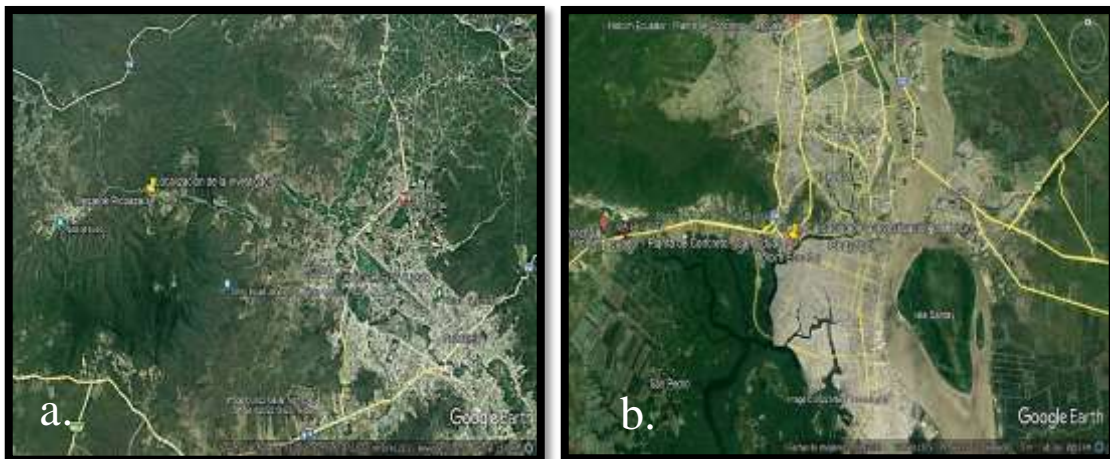


Ilustración 1. a. Micro localización de la Cantera Megarok S.A. b. Micro localización de la planta de cemento Holcim Ecuador.

1.1.1.2 Micro Localización

Los estudios complementarios a detalle de este trabajo de titulación se realizaron en los laboratorios de suelos de cantera Megarok S.A. y en el centro de innovación de las instalaciones de Holcim Ecuador, donde tienen acceso a varios equipos necesarios para el estudio de este trabajo de investigación.

1.2 INTRODUCCIÓN.

Los materiales de base granulares son parte de la estructura común de un pavimento, la estabilización se la puede realizar en este caso con cemento, hacer esto aporta una mayor resistencia a toda la estructura y también reduce los costos y aumenta beneficios, pues su espesor en la estructura de un pavimento varía relativamente. Las nuevas tendencias tecnológicas han desarrollado un cemento enfocado especialmente en la estabilización de suelos granulares denominado cemento de moderado calor de hidratación tipo MH, según especificación ASTM C 1157 o NTE INEN 2380, cementos hidráulicos por desempeño, que según sus especificaciones genera mejores características que utilizar el cemento de uso general tipo GU de la misma normativa, este cemento hace que la mezcla tenga mayor tiempo de trabajabilidad, pero para este estudio comparativo se utilizará únicamente cemento tipo GU.

En la actualidad, es fundamental optimizar recursos en los proyectos de ingeniería civil para posteriormente garantizar costos más competitivos en el mercado nacional, mejorando así la calidad de las obras de nuestro país. El tema del proyecto surge en respuesta a las necesidades de las obras de construcciones civiles, y aunque lo que se hace en este proyecto son ensayos básicos de la profesión, sirven para generar una experiencia académica que permita evaluar y comparar las ventajas o desventajas que proporcionan cada ensayo con los diferentes especímenes y ver su comportamiento mecánico, resistencia a la compresión y en el desempeño de las bases granulares estabilizadas con cemento.

Este proyecto de grado estudia tres tipos de ensayos para determinar la resistencia a la compresión de bases granulares estabilizada con cemento GU determinadas por la norma ASTM D1633 (Métodos de prueba estándar para la resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento), este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión del suelo cemento utilizando cilindros moldeados como muestras de ensayo, y ASTM C 1435 (Práctica

estándar para moldear Concreto compactado con Rodillo, en moldes de cilindros usando un martillo vibrador), esta práctica cubre el moldeado de especímenes cilíndricos de concreto usando procedimientos estándar de rodillado. La vibración interna como se describe en la práctica C 31 / C31 M y práctica C 1176, no son aplicables, ya que esta práctica es aplicable a concreto fresco mezclado, preparado en el laboratorio y en el campo.

La metodología descrita en las normas citadas permite realizar distintos ensayos como; la caracterización del material granular (dureza, durabilidad, limpieza, geometría, resistencia y características físicas y químicas), posteriormente, la densidad seca máxima y su respectiva humedad óptima con el ensayo de Proctor Modificado. Se inicia escogiendo un porcentaje de cemento que garantice un esfuerzo mínimo de 25kgf/cm² que solicita la norma para los 7 días de curado de las probetas. Simultáneamente, la mezcla de BAEC es evaluada en su trabajabilidad, esto es, las condiciones óptimas que permitan un adecuado mezclado, transporte, colocación y compactación, sin que se produzca segregación. Una vez que la mezcla tenga una consistencia óptima y con buena trabajabilidad, se hacen ensayos de compactación en diferentes especímenes que varían en tamaños y relación ancho – altura y porcentajes de cemento GU, para posteriormente determinar la resistencia a la compresión a los 7 días y comparar que espécimen tiene un mejor comportamiento físico mecánico y con buena característica de trabajabilidad, esto es, con menos tiempo de trabajo y sin perder las características que se necesitan en la obra (Ortíz y Díaz, 2019).

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.3.1 Descripción de la Realidad Problemática

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo por la necesidad de obtener información técnica de los distintos ensayos de resistencia a la compresión de la BAEC. El Instituto Nacional de Vías INVIAS Colombia, define que el mal procedimiento de la dosificación y el ensayo a la compresión de la BAEC como un problema global debido a las fallas presentadas en obra (agrietamientos, deformaciones o bajas resistencias). Por esto es necesario definir acciones y procedimientos que permitan a todos productores, clientes y fiscalizadores, establecer un mismo plan de control de calidad (es decir, hablar el mismo lenguaje). Desde el muestreo, toma de especímenes y método de ensayo ya que la carencia de dicha información hace dificultoso a quienes pudieran emplear estos ensayos.

La problemática de la mayoría de las vías de Ecuador, singularmente en la región Costa, siempre ha sido la baja calidad de suelo, las canteras de materiales clasificados se localizan solo en determinados sectores, encareciendo significativamente la operación de las vías debido a los altos costos de acarreo del material por las largas trayectorias. Los métodos constructivos y de control de calidad son elementos fundamentales para garantizar un buen desempeño óptimo de la base estabilizada. Por esta razón la norma ASTM D1633 (toma de moldes cilíndricos con martillo eléctrico de 150 x 300 mm), para agregados de 38 a 50 mm de tamaño máximo (condición muy frecuente de las bases utilizadas para estructura vial) define una guía de trabajo para determinar el desempeño de la BAEC, tomando en consideración solo su resistencia a la compresión simple. Sin embargo, no se exige un procedimiento de ensayo para la resolución del período de trabajabilidad de la mezcla simplificándolo a experiencia y experticia del constructor. En Ecuador se han venido operando proyectos viales mediante técnicas comunes que han llevado con el tiempo a deteriorarse debido a

varios factores entre estos el alto tráfico, provocando que las carreteras deban ser intervenidas mediante reparaciones integrales, significando esto una alta inversión para el estado.

Es por esta razón se planteó esta investigación, la elaboración en laboratorio de mezclas de BAEC y la toma de muestras en cilindros de 100x115 mm 100x200 mm y 150x300 mm según ASTM C 1633 y ASTM C 1435, para evaluar sus resultados y proponer la toma de muestras de acuerdo al procedimiento apropiado esto es, siguiendo la norma ASTM D 1632 antes descrita.

1.3.2 Formulación del Problema

¿Qué ensayo es el indicado para obtener la resistencia a compresión ideal de una BAEC?

1.3.3 Delimitación del Trabajo de Titulación

La presente investigación se elaboró bajo las siguientes características:

1.3.3.1 Espacial

La presente investigación se ejecutó en el laboratorio de la Cantera Megarok S.A. y en la planta de cemento Holcim Ecuador. Estas empresas cuentan con los equipos necesarios en laboratorio para realizar los ensayos en los laboratorios de suelo.

1.3.3.2 Temporal

La delimitación eventual del presente proyecto se la realizó durante este presente año 2022

1.4 ANTECEDENTES.

El origen de la técnica del Concreto Compactado con Rodillo (CCR), se fundamenta desde hace muchos años, la cual se utiliza desde 1865 en Escocia, desde entonces se ha venido evolucionando a través del tiempo con relación a métodos, aplicaciones, diseños estructurales, equipos y diseños de mezclas de concreto. Los resultados y las aplicaciones del CCR en diversos países europeos y americanos han sido prácticamente en proyectos hidroeléctricos y patios de carga, siendo la fabricación de equipos adecuados la que permitió ampliar la utilización del CCR en pavimentos, hacia vías de baja intensidad de tráfico y posteriormente hacia vías de mayor importancia y aeropuertos. (Olimpia, Sánchez, Vanessa, Flamenco, & Fabián, n.d.)

Las estructuras de pavimentos rígidos o flexibles son carpetas de rodamiento multicapas. Se trata de una mezcla de agregados minerales recubiertos y ligados con asfaltos o cementos hidráulicos. Estos materiales son capaces de resistir altos esfuerzos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Los pavimentos rígidos tienen una alta repercusión en la construcción de caminos, carreteras y vías urbanas, es por esta razón que, continuamente se busca como mejorar no solo el asfalto, sino las capas estructurales que lo componen, permitiendo que su durabilidad, eficiencia y resistencia sean mayores. (Arteaga, 2018).

Con respecto a lo anterior se ha demostrado que en Ecuador como en otros países, se realizan investigaciones que identifican y analizan las principales características de las capas que conforman la estructura de pavimentos flexibles, de este modo se desarrollan trabajos académicos concomitante con el mejoramiento de éstas capas estructurales, por medio de la adición de los agregados asfálticos, singularmente de uso reciclado, analizando sus propiedades físico mecánicas y determinando si éstos agregados son útiles, particularmente para ser usados como estabilizantes. (Arteaga, 2018).

Como se puede observar, este trabajo hace énfasis en que, la función de la capa granular, tiene un valor importante en el comportamiento de los pavimentos, por lo tanto, su mejoramiento es tema

indispensable, pues cada vez son mayores las exigencias en construcción de carreteras y vías urbanas; por tanto, la investigación dirigida a los tipos de materiales para pavimentos se enfoca especialmente en utilizar componentes o aditivos que mejoren sus características, propiedades y brinden mayor estabilidad a en los suelos. (Arteaga, 2018).

The National Lime Association (La asociación nacional de la cal) publica en 2004 el Manual de estabilización de suelo granulares mejorado con Cal: Estabilización y modificación con cal, en el cual se explica que la cal es un elemento que trabaja bien en la estabilización, utilizándola para mejorar el espesor total de los pavimentos. Adicionalmente, hace mención sobre como este material puede utilizarse para el mejoramiento de la calidad de los materiales que conforman la base o suelos en general, en especial los que “contienen cantidad excesiva de finos arcillosos, esto ascendiendo a la capacidad que tiene la cal de contribuir con la transformación de materiales estructurales, hace que la base mejorada tengo mayor resistencia portante por ende también su desempeño estructural. (Arteaga, 2018).

Por último, en las bases estabilizadas con asfalto espumado, expuesto por el Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, “la resistencia de la base se aproxima a la de materiales estabilizados con cemento, estos mantienen una buena flexibilidad, siendo relativamente resistente a la fatiga". El reciclamiento del material existente permite conservar materiales vírgenes y energía, así como disminuir los costos de acarreo. Mayormente el procedimiento se realiza en sitio y por lo tanto es más rápido que otros métodos de rehabilitación. (Arteaga, 2018).

1.5 JUSTIFICACIÓN.

La mezcla de los componentes de la base estabilizada con cemento ya dosificada es mucho más rígida que las bases comunes, aumentando considerablemente la capacidad portante, lo que permite mejorar la resistencia estructural del pavimento, al aumentar la capacidad portante es seguro reducir levemente el espesor requerido de los pavimentos, lo que porta una disminución de costos y operatividad. Por lo tanto, en la elaboración de los proyectos de obras se presentará frecuentemente la posibilidad de que, mediante la elaboración de un tratamiento adecuado, logrando satisfacer con las normas y especificaciones técnicas reglamentarias, es posible aprovechar parte de los suelos que se encuentran en el territorio, que de otra manera serían deficientes por no satisfacer los requerimientos del diseño. A nivel global, la tendencia de estabilizar suelos con cemento ha mostrado un importante incremento dada la necesidad existente de garantizar una mayor durabilidad de las vías de comunicación que favorecen el desarrollo de las regiones donde se llevan a cabo.

Respondiendo a las necesidades de la ingeniería, puesto que esta requiere cada vez más hacer un uso eficiente de los recursos y optimizar los procedimientos constructivos, y también a los avances de la industria que ha desarrollado un cemento especialmente para estabilización de suelos, se quiere brindar la experiencia desde un espacio académico, en el diseño de una base estabilizada con cemento bajo parámetros nacionales e internacionales que permita evaluar y comparar el desempeño de la misma. Por tanto, se pretende realizar un análisis comparativo de la resistencia a la compresión de la BAEC usando tres tipos de especímenes que genere el aprovechamiento del uso adecuado del método de compactación de los suelos propios de las zonas de proyecto mejorándolos mediante la estabilización con cemento, consiguiendo reducir los espesores de capa de material de base granular y de esta manera bajar los costos de construcción considerando para ello varios ejemplos que podrían replicarse en otros casos.

Puede ser posible que no se produzcan cambios significativos de volumen en las subcapas, debido a la humedad o al secado, esto permite el reutilizar un material de un pavimento flexible existente, lo que puede generar una capa que tenga alta resistencia para soportar grandes cargas vehiculares, por eso los espesores de capas de la estructura se reduce considerablemente de lo cual sería necesario para una base granular no tratada con cemento y bajo las mismas condiciones de carga y subrasante, para la realización de la BAEC puede ser utilizado casi todo tipo de suelos que cumplan con las especificaciones del proyecto.

Con esta investigación se pretende estudiar la influencia de los métodos aplicado para determinar las propiedades de la base estabilizada con cemento propuestas en el trabajo y las correlaciones entre estas, son necesarias, por el hecho que en el diseño de estructuras de pavimentos dichas variables son determinantes, ya que los valores utilizados hasta la fecha son extraídos de correlaciones de estudios realizados en distintos países o sencillamente son asumidos como valores constantes que no pueden adoptarse en condiciones locales, causando diseños poco exactos. Por lo que se busca reducir el uso de suelo cemento desde el punto de vista con el espesor final o porcentaje de cemento, tipo de cemento y suelo.

La influencia estudiada que posee los métodos aplicado para la elaboración de especímenes en la resistencia a la compresión, los resultados obtenidos de las metodologías utilizadas paralelamente serán analizados, comparados y estableciendo las respectivas correlaciones para determinar cuál de éstas presenta mejores resultados de la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad estático y módulo de elasticidad dinámico, propiedades en estado endurecido y que al momento de utilizar un método en particular se pueda determinar cuál será el más factible en base a estas propiedades.

1.6 OBJETIVOS.

1.6.1 Objetivo general.

- Realización de análisis comparativo de la resistencia a la compresión de base clase 1A estabilizada con cemento tipo GU, utilizando distintos especímenes cilíndricos de 150x300mm, 100x200mm y 100x115mm.

1.6.2 Objetivos específicos.

- Obtención de información crucial para la correlación de módulos de elasticidad, resistencia a la compresión y de las propiedades mecánicas, físicas, composición, generalidades y conceptualización que permitieron explicar la combinación de esta mezcla.
- Determinación de las propiedades mecánicas del material base granular de tipo clase 1 A con la dosificación adecuada con cemento y agua, para obtener la resistencia a la compresión en 7 y 28 días.
- Ejecución de ensayos de compactación de la base estabilizada con diferentes porcentajes de cemento tipo GU, en distintos especímenes de cilindros de 150x300 mm, 100x200 mm y 100x115 mm.
- Análisis de los resultados de los ensayos pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad dinámica y estático de los cilindros de la BAEC.
- Propuesta de criterios técnicos sobre la obtención de la resistencia a la compresión de la BAEC.

2 CAPÍTULO II

2.1 BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO.

2.1.1 Científico:

2.1.1.1 Generalidades de la mezcla base de agregados gruesos y finos estabilizada con cemento.

Grandes avances tecnológicos han podido producir continuamente diversos materiales que cumplen con las especificaciones técnicas de construcciones, a lo largo de las últimas décadas se ha logrado producir material endurecido de mezcla compactada de base granular previamente tratada con cemento y agua, que han demostrado buenos resultados de resistencia en pequeñas y grandes construcciones civiles.

Las mezclas de base estabilizada con cemento es íntima y homogénea de suelo pulverizado con agregados gruesos y finos mezclados con cierta cantidad de cemento hidráulico y agua potable, después de compactar la mezcla se pueden obtener densidades relativamente altas si se emplea un perfecto curado para que esta mezcla endurezca con eficacia, en cada país y en el transcurso del tiempo varios investigadores le han dado distintas connotaciones a la definición del suelo cemento en algunos casos consideraron el término en el sentido más amplio y otros lo restringen. Algunas de las conceptualizaciones que en la actualidad se utilizan son las siguientes:

La base estabilizada con cemento es un material fabricado cuyo contenido de cemento en peso suele ser del rango de 3 – 7%. A extenso plazo, su resistencia a compresión puede ser mayor a 4 MPa (Según las especificaciones colombiana incluidas en el PG3), a 7 días debería ser más de 2.5 MPa, su módulo de elasticidad muestra valores del orden de 6,000 MPa con suelos granulares y mejores a 10,000 Mpa.

Además, la revista Argos publicada por las cementeras colombianas, En la pirámide de la ilustración 3, se observa en todas sus esquinas todos los elementos que tiene el suelo cemento. Una vez que ponemos a todos ellos a predominar en la mezcla, se recibe materiales resultantes con propiedades y características diversas.

Los 4 materiales que tenemos se derivan de estas combinaciones que son: la base compuesta por suelo grava pulverizada, cemento hidráulico, agua potable y la base estabilizada propiamente dicho.

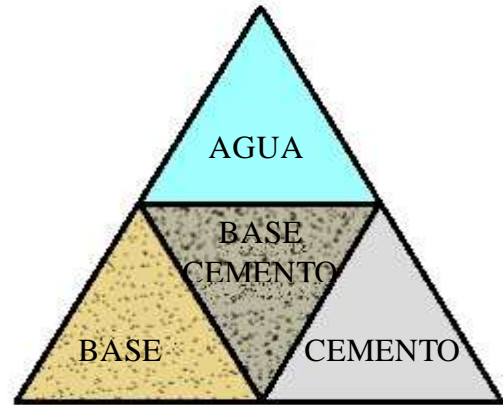


Ilustración 2. Mezclas de suelo Cemento según material predominante.

Fuente: Revista Argos (Colombia)

2.1.1.1.1 Materiales seleccionados como base.

Los materiales de base agregados basálticos son selecto y triturado que se distribuye entre la parte preeminente de una subbase o de la subrasante y la capa de rodadura. La base es parte bastante fundamental de la composición de un pavimento.

A continuación, se incluye un cuadro con las recomendaciones para el uso de los diferentes tipos de material de base.

Tabla 1. Recomendaciones para uso de material de base.

MATERIAL ESPECIFICADO	TIPO CARRETERA	No. CARRILES	TPDA
Base Clase 1	Para uso principalmente en aeropuertos y carreteras con intenso nivel de tráfico	8 a 12	≥ 50.000
Base Clase 2	Carreteras de 2 hasta 6 carriles con un ancho mínimo por carril de 3,65m. Se incluye franja central desde 2 a 4m	2 a 6	8.000 a 50.000

Base Clase 3	Vías internas de urbanizaciones con bajo nivel de tráfico	2 a 4	1.000 a 8.000
Base Clase 4	Caminos vecinales	2	≤ 1.000

Fuente: manual nevi volumen 3

El límite líquido debe ser < 25 y el I.P < 6 . El porcentaje de desgaste por abrasión de los agregados será menor del 40% y el valor de soporte de CBR $\geq 80\%$

2.1.1.1.1 Material base clase 1

Son bases constituidas por agregados gruesos y finos, triturados en un 100 por ciento y graduados uniformemente dentro de los límites granulométricos indicados para los Tipos A y B expresados en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. *Recomendaciones técnicas de la MOP para uso de material de base A y B.*

TAMIZ		BASE CLASE 1 TIPO A		BASE CLASE 1 TIPO B	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2"	50.00 mm		100		100
1 1/2"	37.50 mm	70	100	100	100
1"	25.00 mm	55	85	70	100
3/4"	19.00 mm	50	80	60	90
3/8"	9.50 mm	35	60	45	75
N°4	4.75 mm	25	50	30	60
N°10	2.00 mm	20	40	20	50
N°40	0.425 mm	10	25	10	25
N°200	0.075 mm	2	12	2	12

Fuente: Especificaciones Técnica de la MOP para la Base clase 1A y 1B.

2.1.1.2 Fundamentos de bases granulares y bases estabilizadas con cemento hidráulico utilizados en pavimentos.

Para los diseños de pavimentos que es una composición difícil que requiere un diseño singular debido a que esta composición se constituye por varias capas de diversos espesores y calidades que al interrelacionarse con otras portan resistencia al tráfico. Hay dos tipos de pavimentos que son los flexibles o asfálticos y firmes o de concreto hidráulico, con diversos tipos de bases y subbases y con diversos tipos de rehabilitación

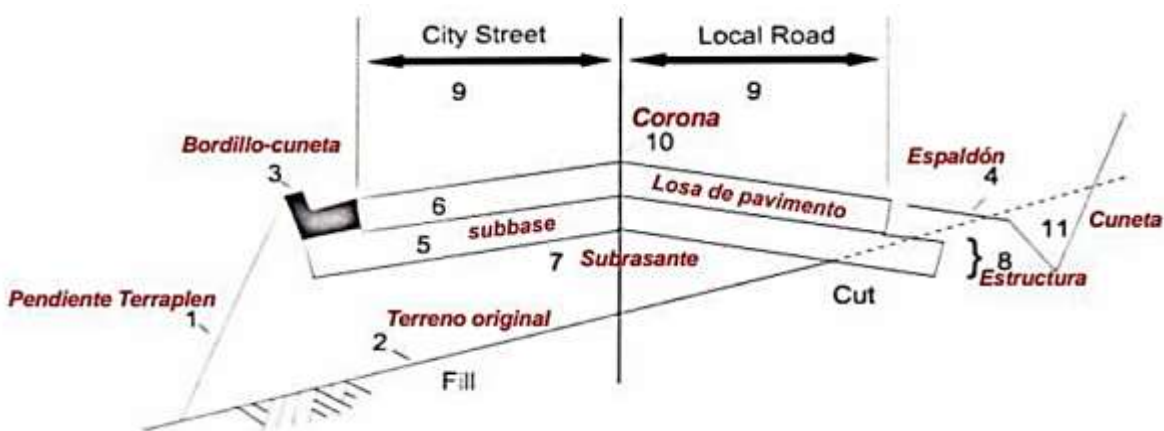


Ilustración 3. Estructura típica de un pavimento de hormigón

Fuente: Bases granulares estabilizadas con cemento para pavimentos de concreto. (Ing. Hugo Eguez, apuntes clase Tec. Del Hormigon 2010)

Se proseguirá al estudio de forma breve ambos tipos de pavimentos que hay en el territorio ecuatoriano y más todavía en la provincia de Manabí, los tipos de pavimento flexibles son esos que permanecen ejecutados con un revestimiento asfáltico sobre una base granular usual o estabilizada, en esta clase las capas de revestimiento y base tienden a aspirar las tensiones verticales de compresión ocasionadas por las cargas vehicular, mediante esta absorción de tensiones transversales se generan deformaciones una vez que el tráfico tiende a ser canalizado y esta ondulación longitudinal del área una vez que la heterogeneidad del pavimento es importante.

El pavimento flexible se conforma en 5 capas:

- Sub – Rasante: Suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento.
- Sub – Base: Material granular que brinda un grado de resistencia al pavimento.
- Base Granular: Suelo granular negro de mejor calidad
- Base Asfáltica
- Carpeta Asfáltica: Capa superficial del pavimento

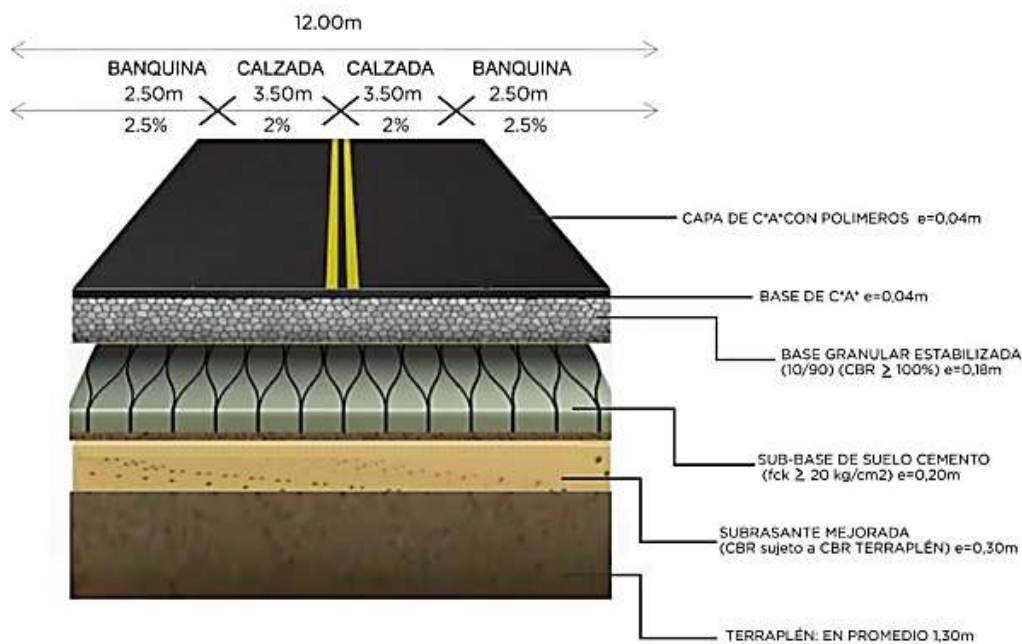


Ilustración 4. Paquete estructural de un pavimento flexible con materiales mejorados

Fuente: Ruta Bioceánica – Medios Digitales, 2019 (Paraguay – Chile)

Estos tipos de pavimento se los diseñan bajo los siguientes parámetros:

- N.º de ejes o vehículos que pasan por la vía
- Que las capas tengan que conforman el pavimento módulos elásticos óptimos para el diseño
- Temperatura del ambiente
- Que los espesores de las capas sean bien compactados

Por otro lado, los pavimentos rígidos cuentan como elementos estructurales tipo losa de hormigón de cementos hidráulicos, esta capa rígida difumina de manera muy efectiva las fuertes

tensiones ocasionadas por el tráfico por su gran resistencia a la flexión, los que puede causar que esta estructura tenga fisuraciones de fatiga cuando se generan tensiones y deformaciones de tracción por la parte inferior de la losa provocando por cargas secuenciales.

El pavimento rígido se conforma por las siguientes capas:

- Sub – Base
- Capa de Concreto pobre o base estabilizada con cemento
- Capa de concreto hidráulico

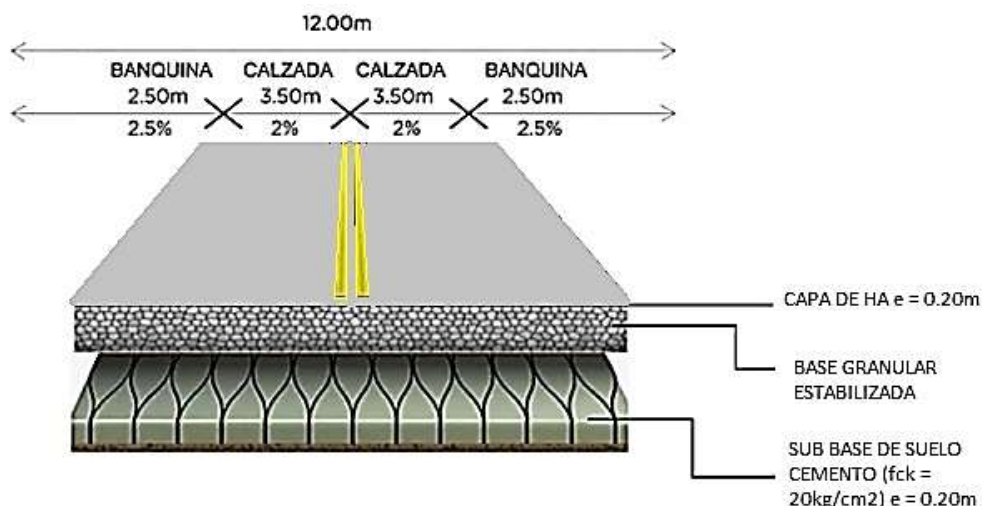


Ilustración 5. Paquete estructural de un pavimento rígido con materiales mejorados

Fuente: Ruta Bioceánica – Medios Digitales, 2019

2.1.1.2.1 Tipos de mezclas de bases estabilizadas con cemento.

La selección de la mezcla apropiada depende del uso para el cual quiera destinarse la base estabilizada con cemento. La cantidad del componente estabilizador, Se determina generalmente por medio de ensayos parciales de laboratorio que tratan de simular las condiciones a las que va a estar expuesto el material en el campo en relación con esfuerzos, meteorizaciones y otros procesos que afectan la durabilidad y que es muy posible que ocurran cuando el suelo basáltico tratado con cemento

se usa para subbases y, en algunos casos muy particulares, para capas de rodadura en pavimentos de carreteras, cubiertas superficiales para canales de irrigación o drenaje, protección de taludes de represas (Montejo et ál., 2018).

Montejo afirma que cinco son las variables principales que controlan la estabilización de suelos con cemento:

1. La naturaleza del suelo.
2. La proporción de cemento en la mezcla.
3. El contenido de humedad en el momento de compactarla.
4. La densidad obtenida en la compactación.
5. El método de curado de la mezcla compactada.

También existen materiales con agregados finos, gruesos o plástico, esto genera trabajar en diferentes condiciones, pero siempre se debe controlar la cantidad de humedad natural y la densidad máxima seca, siempre y cuando los procedimientos de mezcla y curado sean los adecuados, el grado de estabilización estará determinado por la naturaleza de la base basáltica y por la proporción de cemento usado. La posibilidad de manipular las propiedades de la mezcla de forma adecuada durante la construcción y de controlar el grado de estabilización de manera tal que se satisfagan los requisitos de resistencia y durabilidad ha dado como resultado el desarrollo de cinco tipos principales de mezclas de base y cemento, que se describen a continuación:

2.1.1.2.1.1 Base de agregados estabilizada con cemento.

La base de agregados estabilizados con cemento una vez que es colocada y compactada en el sitio tiene que resistir la mayoría de los esfuerzos de manera indirecta que son realizados por los vehículos y maquinarias empleadas para la obra. La BAEC es aquella que se sitúa de manera directa sobre la subbase o del mejoramiento, pues la capacidad para la carga de esta puede dar no será suficiente, por lo

que se necesita que se emplee una capa extra llamada capa de rodadura que provea del confinamiento primordial.

La estabilización tiene la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas y la durabilidad de la estructura del pavimento. La propiedad más importante de una BAEC es su estabilidad volumétrica. Esto quiere decir un material de baja resistencia mecánica y de muy baja retracción, lo que permite soportar las cargas ejercidas por los vehículos transmitiendo menores esfuerzos al terreno natural (subrasante) sin que este se fisure o se deforme.

Estas mezclas se diseñan para satisfacer dictámenes establecidos, determinados por ensayos normales de la AASTHO, ASTM, INEN NET u otras entidades. Estos criterios se basan especialmente en la resistencia a la compresión de la mezcla al cabo de un cierto tiempo (técnica británica en general) o pérdidas en el ensayo de meteorización acelerada (humedecimiento y secado), de acuerdo con el procedimiento norteamericano. Además, se consideran otros factores relacionados, tales como el incremento en la humedad y el cambio de volumen. Según Ortiz y Díaz (2019) las mezclas de base - cemento que satisfacen estos criterios se sugieren para las siguientes aplicaciones.

- Bases y subbases para pavimentos rígidos y flexibles de calles, carreteras y aeropuertos.
- Bermas con capa superficial de rodadura para carreteras y aeropuertos.
- Zonas de estacionamiento, con capa superficial de rodadura.
- Núcleo central en presas de tierra.
- Mantos de revestimiento para tanques, sin tratamiento superficial.
- Fundaciones para algunos tipos de estructuras.
- Construcciones varias, incluyendo drenajes superficiales, alcantarillas, puentes de arco pequeños, unidades pequeñas de construcción, aceras y pasarelas, etc.

2.1.1.2.1.2 Base granular estabilizadas con cemento.

Muchos terrenos arenosos y granulares están ligeramente por debajo de las especificaciones, como materiales para base, subbases y subrasante de pavimentos rígidos y flexibles. Tienen la posibilidad de contener porciones desmesuradas de fracciones finas o finos excesivamente plásticos, por lo cual bastaría añadirles una determinada proporción de cemento que modifique sus características plásticas, o tienen la posibilidad de además necesitar porciones de cemento para endurecer en forma importante la mezcla, dando una calidad solo ligeramente inferior a la del base-cemento. En resumen, el cemento se usa en estos casos para reducir las características de plasticidad y expansividad del material, aumentando su capacidad de soporte hasta hacerlo admisible para la construcción de bases o subbases para pavimentos rígidos o flexibles que se ciñan a las normas, el contenido de cemento varía desde tres por ciento en adelante, pero es siempre menor que el requerido para suelo-cemento (Ortíz y Díaz, 2019).

2.1.1.2.1.3 Base fina-granular estabilizadas con cemento.

En estos sucesos, donde hay existencia homogénea de agregados finos y gruesos, el cemento se usa para examinar las características de expansión y contracción del terreno. Este tipo de estabilización puede usarse también para aumentar la resistencia de la base anormalmente débiles o áreas de suelos húmedos. Este tipo de base de agregados plenamente homogénea estabilizada con cemento se usa en los siguientes casos como tratamiento para controlar encogimiento y expansión en subrasantes con suelo de alto cambio de volumen para aumentar la resistencia de subrasantes.

2.1.1.2.1.4 Base plástica estabilizadas con cemento

Estas mezclas pueden emplearse en estado plástico (consistencia de una mezcla de concreto). Sin embargo, se dosifican hasta formar un material que llena los requisitos de resistencia y durabilidad

establecidos para la base plástica con cemento, ya que en estos caso se requiere de contenidos de cemento superiores en más de un 4 por ciento a las estipulaciones para el base tratadas con cemento ordinario se usan generalmente con base de textura liviana, como en los suelos arenoso, la dificultad para colocar y compactar a humedad óptima los tipos usuales de base con cemento en obras que presentan superficies inclinadas planas llevó al desarrollo de la base plástica tratada con cemento y se usa principalmente en los siguientes casos:

- Revestimiento superficial para canales de drenaje.
- Cubierta superficial para canales de irrigación.
- Capa para proteger de la erosión los enroscados.
- Revestimiento de taludes.

2.1.1.2.1.5 Base clase 1A estabilizada con cemento.

Este material es una mezcla referida a mejorar las condiciones de seguridad de un pavimento o cimentación, en la cual por medio de un estudio de laboratorio se establece las características del tipo de suelo, el contenido y tipo de cemento y la proporción de agua para que este se dosifique correctamente, para que logre llevar a cabo con las especificaciones determinadas por la NEVI-12 (Norma Ecuatoriana Vial de Infraestructura).

Gracias a la proporción de definiciones que tienen la posibilidad de hallar en relación con la base clase 1A, cemento y agua que necesita laborar con una definición que sea conforme a nuestra indagación, como la siguiente:

Esta mezcla íntima de base clase 1 pulverizada y seleccionada como base 1A, cemento hidráulico y agua que, compactada con una humedad óptima puede alcanzar su densidad máxima, esto se genera después de la hidratación del cemento y se consigue protegiéndolo contra la pérdida de humedad a lo largo del lapso de curado, produciendo un material duro, durable y de bajo precio que

tiene varios usos en ingeniería, por lo general esta base clasificada como 1A tiende a obtener buenas condiciones físicas y mecánicas, siempre y cuando el material principal esté en condiciones reglamentarias.

En el procedimiento de estabilización pueden existir diferencias para ambos tipos primordiales de suelos naturales. En las bases de agregados finos (limosos y arcillosos), el cemento en hidratación lleva a cabo fuertes eslabones entre los agregados minerales y los agregados de base 1A para conformar una matriz semi rígida, ésta adopta una composición de tipo colmena de la cual es dependiente de la resistencia de la mezcla, debido a que los agregados arcillosos en la matriz poseen escasa resistencia y contribuyen en pequeña porción a la resistencia. La matriz sirve para fijar las partículas de tal forma que no se deslicen unas sobre otras. En este modo, el cemento no solo elimina la plasticidad, sino que además se incrementa su resistencia al esfuerzo cortante. El impacto químico superficial del cemento disminuye la afinidad por el agua y, por lo tanto, la funcionalidad de los suelos naturales arcillosos para retenerla. Esta doble función de minimizar la afinidad por el agua y de crear una matriz o composición profunda que otorga a las partículas mayores y no pulverizadas de base clase 1A una especie de capa defensora, la cual sirve no solo para protegerlas, sino que además previene las expansiones causadas por el crecimiento de humedad (Montejo et ál., 2018).

En la más grande parte de las bases granulares naturales extraídos de cantera, la acción cementante es parecido a la que pasa en el concreto, pero en este caso la pasta de cemento no llena todos los vacíos existentes en el añadido. En las arenas, las partículas se cementan solamente en los puntos de vista de contacto. A medida que más densa sea la gradación de la base, más pequeños van a ser los vacíos, más grande el sector de contacto y más profundo la acción cementante. Las arenas de gradación uniforme (un solo tamaño) que poseen un área de contacto mínimo entre granos necesitan mayor contenido de cemento para su estabilización. Pues las bases granulares bien gradados poseen una baja extensión potencial, es viable estabilizarlos con menos contenidos de cemento que los

requeridos para arenas uniformemente gradadas y para material arcillosos de alta extensión potencial (Montejo et ál., 2018).

2.1.1.3 Componentes de la base clase 1A estabilizada con cemento.

2.1.1.3.1 Base clase 1A

Este material es una porción semi superficial de la corteza terrestre dura de color negro y se puede estabilizar con cemento hidráulico, puede originarse por la mezcla de gravas, arenas, limos y arcillas, prácticamente en cualquier suelo puede estabilizarse con cemento a privilegio de los suelos altamente plásticos u orgánicos con altos contenidos de sales o materiales deletéreos que puedan afectar el desempeño del cemento.

Sin embargo, en el estado de la práctica, los suelos que se pueden utilizar se encuentran limitados por las siguientes prácticas mencionadas a continuación:

2.1.1.3.1.1 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg, límite plástico o límite de densidad, se utilizan para caracterizar suelos finos. Los límites se basan en el concepto de que solo pueden existir cuatro estados homogéneos en suelos de grano fino dependiendo de su contenido de humedad. Por lo tanto, el suelo se encuentra en estado sólido cuando se seca. Al agregar agua gradualmente, pasa sucesivamente a un estado semisólido, resinoso y finalmente líquido. El contenido de humedad en los puntos de transición de un estado a otro se denomina límite de Atterberg y se produce bajo las siguientes condiciones:

- Límite líquido: cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la copa de Casagrande.
- Límite plástico: cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

- Límite de retracción o contracción: cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder humedad.

2.1.1.3.1.2 Capacidad de soporte del suelo

Técnicamente, la capacidad de carga es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el suelo para que no se produzca rotura por derrumbe o asentamiento diferencial excesivo. Por lo tanto, la capacidad de carga admisible debe basarse en uno de los siguientes criterios funcionales:

- Si la función del terreno de cimentación es soportar una determinada tensión independientemente de la deformación, la capacidad portante se denominará carga de hundimiento.
- Si lo que se busca es un equilibrio entre la tensión aplicada al terreno y la deformación sufrida por este, deberá calcularse la capacidad portante a partir de criterios de asiento admisible.

De acuerdo con la análoga, la expresión de capacidad portante se utiliza en todas las ramas de la ingeniería para referir a la capacidad de una estructura para resistir las cargas aplicadas sobre la misma.

2.1.1.3.1.3 Granulometría adecuada de las partículas

La importancia de la granularidad varía según los diferentes sujetos, para endurecer adecuadamente el suelo agregando la cantidad correcta de cemento, debe tener la siguiente granularidad: Según el IMCYC, el límite superior para el tamaño máximo de partícula es un tercio del espesor de la capa compactada. En la distribución granulométrica, el máximo de partículas finas que atraviesan la red n°200 debe estar próximo al 50%, con un límite líquido no superior al 50% y un

índice de ductilidad inferior al 25%. En otras palabras, deben evitarse los suelos con alta presión y alta plasticidad. La APC recomienda que no se retenga más del 45% en la grilla #4 y un tamaño máximo de agregado de 3", aceptando incorrectamente la clasificación de suelos granulados. También recomienda no utilizar suelos que contengan mucha grava, preferiblemente menos del 15% de arcilla, y la cantidad total de arcilla y limo va del 20 al 45% y contiene arena y preferiblemente del 55 al 80%.

Por otro lado, APC considera no aptos los suelos cohesivos con un límite líquido superior al 45% y un límite plástico superior al 20%. Los suelos con un alto contenido de arcilla tienen serios inconvenientes porque eventualmente producen muchas grietas, y la humectación previa o el secado que a menudo se requiere para compactarlos es costoso y difícil. Además, durante la construcción, el proceso de mezcla es bastante laborioso. AASHTO hace las recomendaciones en las Tablas 3 y 4. Por otro lado, ASTM hace una serie de recomendaciones resumidas en la Tabla 5.

Tabla 3. Graduaciones recomendables para tratamientos de suelos areno - arcillosos

MATERIAL	CONDICIONES DE LLUVIA EN LA ZONA		
	Fuerte 1	Moderada 2	Escasa 3
PORCIONES DE ARENA:			
Pasa malla No. 10	100	100	100
Pasa malla No. 40	40-80	40-80	40-80
Pasa malla No. 60	30-70	40-55	55-70
Pasa malla No. 270	10-40	20-35	30-50
PORCIONES DE LIMO:			
Finos de 0.05 a 0.005 mm	3-20	0-15	10-20
PORCIONES DE ARCILLA:			
Finos menores de 0.005 mm	7-20	9-18	15-25

Fuente: AASTHO – NTE INEN 696

Tabla 4. Clasificación de las AASTHO preparada para el diseño de suelo – cemento.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	GRUPOS DE SUELOS GRANULARES (35 % o menos pasa la malla No. 200)					
	A-1		A-3	A-2		
% que pasa la:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6

Malla No. 10	50 máx.						
Malla No. 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.				
Malla No. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
CARACTERÍSTICAS DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA No. 200							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	GRUPOS DE SUELOS LIMO – ARCILLOSOS (Más del 35% se retienen en la malla No. 200)						
% que pasa la:	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 V A-7-6			
Malla No. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.				
CARACTERÍSTICA DE LA FRACCIÓN QUE PASA A MALLA No. 200							
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.			
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.			

Fuente: AASTHO M 145. NTE INEN 691

Tabla 5. Especificaciones para los agregados de las bases o las subbases.

TAMAÑO DE LA MALLA	PORCENTAJES QUE PASAN	
	BASES	SUBBASES
2' (50.0 mm)	100	100
1 ½' (37.5 mm)	95-100	90-100
¾' (19.0 mm)	70-92	
3/8" (9.5 mm)	50-70	
No. 4 (4.75 mm)	35-55	30-60
No. 30	12-25	
No. 200	0-8	0-12
REQUERIMIENTOS ADICIONALES		
1.- Al menos el 75 % de las partículas retenidas en la malla de 3/8" deben tener dos caras fracturadas.		
2.- La cantidad de material que pasa la malla No. 200 no debe ser mayor que el 60 % de la que pasa por la No. 30.		
3.- La fracción que pasa la malla No. 40 debe tener máximo $w = 25$ % máximo I.P. = 4 %		

Fuente: Norma ASTM D2940.

Es de gran importancia saber que existen diferentes criterios en distintos países que tienen sus propias especificaciones que caracterizan el material, un suelo debe considerarse aceptable en la elaboración de una mezcla de suelo con cemento, si es que hay algunas diferencias de criterios, existen coincidencias en aspectos relativos con la granulometría del suelo, a continuación, se presenta en las tablas 4 y 5 Requisitos Granulométricos Comparación Con Normativas Internacionales.

Tabla 6. *Requisitos Granulométricos Comparación Con Normativas Internacionales.*

El Salvador (SIECA)	Colombia INVIAS (2002)	Canadá Saskatchewan Carreteras y Transporte 1998	Estados Unidos PCA (2003)	Organización de las Naciones Unidad ONU	ACI 230
Pasa N°4 50-100%	Pasa N°4 \geq 40%			Pasa N°4 \approx 75% Pasa N°4 \approx 25%	Pasa N°4 \geq 55%
Pasa N°200 5-35%	Pasa N°200 \leq 50%	Pasa N°200 5-30%		Pasa N°200 \geq 10%	Pasa N°200 5-35%
Tmáx 50 mm (2")	Tmáx 75 mm (3")	Tmáx 63 mm (2 1/2")	Tmáx 50 mm (2")		Tmáx 50 mm (2")

Fuente: Revista ISCYC No. 43

Si bien se sabe que los valores son independientemente del tipo del suelo cemento y tráfico estimado en catálogos de secciones. Los requerimientos del tamaño de las partículas se encuentran en el pliego de prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes.

Tabla 7. *Requisitos de Plasticidad Comparación Normas Internacionales.*

El Salvador (SIECA)	Colombia INVIAS (2002)	Canadá Saskatchewan Carreteras y Transporte 1998	Instituto Mexicano del Transporte IMT	Experiencias en Sudáfrica	España
LL < 40%	LL < 35%		LL 45-50%		LL < 30%
IP < 8%	IP < 15%	IP < 10%	IP < 25%	IP < 8%	IP < 15%

Fuente: Revista ISCYC No. 43

2.1.1.3.2 Cemento hidráulico.

Fue descubierto por el inglés JOHN SMEATON en 1756, el primero entre los ingenieros civiles contemporáneos. Cuando se le encargó la reconstrucción del faro de Eddystone, comenzó a buscar piedra caliza arcillosa que pareciera ser la mejor para el hormigón hidráulico.

Sin embargo, una patente británica para la fabricación de una sustancia llamada cemento Portland, un pariente lejano del cemento que conocemos hoy, fue otorgada a Joseph Aspdin en 1824, lo que generó controversia sobre su importancia de su trabajo en la producción de esta sustancia.

STEINOUR investigó más y concluyó que la clave para el desarrollo del cemento hoy en día es la temperatura utilizada en el proceso de fabricación. Algunos investigadores contemporáneos como I.C. JOHNSON y WILLIAM ASPDIN concluyeron, utilizando materiales similares a los de JOSEPH ASPDIN, que llevó los materiales a temperaturas superiores a su punto de fusión, incorporando así casi toda la cal libre (CaO), formando una sustancia sobre ellos.

Cemento: Es una sustancia finamente molida que no es un aglutinante, pero desarrolla esta propiedad debido al agua cuando ocurren reacciones químicas entre los minerales en el cemento y el agua. Se clasifica como cemento hidráulico cuando los productos de rehidratación son estables en medio acuoso. El cemento hidráulico más utilizado para la construcción de cemento molido es el Portland, que consiste en silicato de calcio hidráulico, que se forma con la hidratación del cemento Portland y es responsable de sus propiedades adhesivas.

Las propiedades del cemento dependen de su composición química, grado de hidratación, finura de las partículas, velocidad de fraguado, calor de hidratación y resistencia mecánica a la que puede desarrollarse.

El tipo de hormigón utilizado para estabilizar la base clase 1A depende de las características del suelo y del proyecto. Por lo tanto, el cemento utilizado debe estar sujeto a las normas pertinentes según ASTM o AASHTO.

Tabla 8. *Distintas normas para los distintos tipos de cementos.*

Cemento Pórtland sin adiciones	ASTM C 150
Cemento Pórtland con adiciones hidráulicamente activas	ASTM C 595
Cemento Siderúrgico	NC h148
Cemento Puzolánico	ASTM C
Cemento Aluminoso	NTE INEN 151
Cemento de Mampostería	ASTM C 91
Cemento Blanco	ASTM C 150

Fuente: ASTM, AASHTO y MTOP.

2.1.1.3.2.1 Cemento Puzolánico (ASTM C 1157).

Cemento que se deriva por la molienda agrupada de Clinker de cemento Pórtland y estabilizador de fraguado, en significativas porciones inferior al 80% en peso puzolana en porción superior al 20% en peso.

Estos cementos mezclados descritos por la norma NTE INEN 2380 basada en la ASTM C 1157 están definidos para las aplicaciones indicadas de la siguiente manera:

- TIPO GU: Cemento hidráulico mezclado para construcciones generales. Se usa cuando uno o más de los tipos especiales no son requeridos.
- TIPO HE: Alta resistencia temprana, muy utilizado para pavimentos y estabilización de suelos.
- TIPO MS: Moderada resistencia a los sulfatos (se fabrica localmente).
- TIPO HS: Alta resistencia a los sulfatos (se fabrica localmente).
- TIPO MH: Moderado calor de hidratación (se fabrica localmente).
- TIPO LH: Bajo calor de hidratación (no se fabrica localmente).

Tabla 9. Comportamiento de resistencia a la compresión del cemento tipo ASTM C 1157

CEMENTO HIDRÁULICO	EDAD (Días)	RESISTENCIA (kgf/cm²)
TIPO GU, MS	0	0
	3	106
	7	175
	28	281
TIPO MH	0	0
	3	53
	7	106
	28	211
TIPO HE	0	0
	3	176
	7	246
	28	422
TIPO HS	0	0
	3	52

	7	105
	28	175
TIPO LH	0	0
	3	21
	7	43
	28	174

Fuente: ASTM C 1157

A continuación, se presentará una gráfica donde se expresa los valores recomendados por la experiencia que tiene la ASTM C 1157

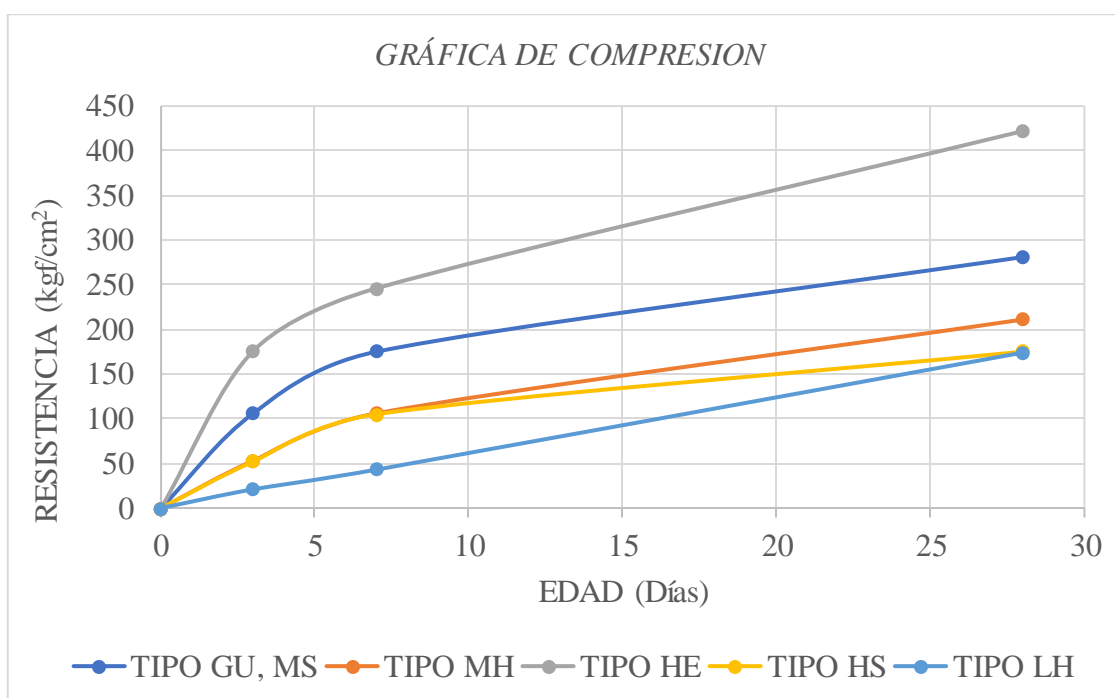


Ilustración 6. Gráfica de resistencia a la compresión con relación a los días de su dosificación

Fuente: ASTM C 1157

2.1.1.3.2.2 Cemento tipo GU

El cemento Holcim hidráulico Tipo GU cumple con lo predeterminado en la Regla NTE INEN 2380 como un cemento Tipo GU para uso general, por lo que podría ser usado en cualquier tipo de obras de creación donde no se requieran características especiales, Nuestro cemento Holcim hidráulico cuenta con una ecoetiqueta que avala una reducción de 30% de emisiones de CO₂, mostrando nuestro compromiso con el medio ambiente, tiene estupendo resistencia mecánica, optimización en la

trabajabilidad de las mezclas, y disminuye la segregación y exudación. (Cemento Holcim hidráulico, 2022)

2.1.1.3.2.3 Exigencias de uso del cemento para la base estabilizada con cemento GU

Los requisitos de cemento varían según las propiedades deseadas de la mezcla y el tipo de suelo utilizado, sin embargo, la cantidad de cemento utilizado depende de si la base está modificada o estabilizada.

ACI 230.1R recomienda cemento ASTM C150 Clase I o Clase II en la mayoría de los casos. Sin embargo, PCA y FP sugieren que el cemento mezclado ASTM C595 o el cemento de alto rendimiento grado HE o GU ASTM C1157 se pueden usar en la producción de pisos de concreto. Varios autores sugirieron que la tendencia general al agrietamiento aumenta con el contenido de cemento y al utilizar suelos finos y plásticos, reduce la resistencia global, por lo que se sugiere estabilizar estos suelos con cal.

Básicamente, cualquier cemento puede ser utilizado en la estabilización de suelos siempre y cuando haya sido analizado antes en el diseño de la mezcla, se debe prestar especial atención a los suelos ricos en sulfatos, varios estudios demostraron que el contenido de sulfato por encima del 0,2 % afecta la disminución de la resistencia a la compresión. El cemento ASTM C150 Tipo II y V resiste el ataque de sulfatos en mezclas de suelo y cemento.

2.1.1.3.3 Agua potable

El agua es esencial en las reacciones que nos permiten obtener los beneficios de construcción del cemento hidráulico. Actúa directamente sobre los principales elementos que lo componen, iniciando una serie de reacciones químicas, cuyos resultados finales son el endurecimiento de la mezcla y la mejora de las propiedades mecánicas para alcanzar la presión requerida.

2.1.1.3.3.1 Funciones principales del agua:

- Hidratar el cemento para producir la aglutinación de las partículas sólidas.
- Producir la lubricación entre las partículas para facilitar la compactación.

De acuerdo con el IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto), la cantidad de agua suele ser del 10-20% del peso seco de la mezcla en bases plásticas y menos del 10% en bases granulares.

Se recomienda que el agua utilizada sea relativamente limpia y exenta de grandes cantidades de ácidos, álcalis y materia orgánica que pueda afectar al cemento.

Cuando se usa lechada de cemento, en lugar de agua natural, como muestra en las pruebas de compactación, el contenido de humedad óptimo obtenido es algo diferente del obtenido cuando se usa agua sola.

Los registros de varias fuentes muestran que, durante la construcción con cemento, está completamente mojado después de 43 días para bases un poco plásticas y alrededor de 28 días para bases granulares. (IMCYC, Usos, Propiedades y Aplicaciones de Suelos de Cemento)

El contenido de agua se determina teniendo en cuenta la trabajabilidad, la trabajabilidad de la mezcla, la necesidad de evitar el agrietamiento excesivo y lograr la presión más adecuada para el equipo existente.

En general, la mayoría de las especificaciones técnicas y documentos relacionados con los requisitos de agua para uso en mezclas de base y cemento se limitan a establecer que deben ser potables o relativamente limpias y libres de álcalis, ácidos o materia orgánica. En algunas especificaciones, como en el caso de Colombia y España, sugieren que el agua utilizada para hacer la mezcla base-cemento debe tener un pH entre 5,5 y 8,0 y el contenido de sulfato no debe exceder 1 gramo por litro. Además de los requisitos de calidad del agua, también existen requisitos de cantidad de agua, en los

que se debe alcanzar la máxima densidad de la mezcla y el cemento debe estar correctamente hidratado. En general, el contenido de humedad debe estar entre el 10 y el 13 % del peso seco de la mezcla, pero esto debe determinarse en la etapa de diseño de la mezcla (ACI 230R.1).

2.1.1.3.4 Aditivos

Los aditivos químicos muchas veces se usan en mezclas de la base estabilizada con cemento, y hay más literatura in vitro que en grandes ensayos de campo, y algunos fabricantes proporcionan aditivos específicos para suelos y cemento, como potenciadores de unión entre capas de cemento en suelos, basados en sobre ácidos Lignosulfato cálcicos e Hidroxicarboxílicos, o tensioactivos y sellantes a base de sales sódicas y silicato sódico, existen otros aditivos químicos menos habituales como los higroscópicos y los reductores de agua.

En el caso de las adiciones, estas deberán ser utilizadas en mayor cantidad que los aditivos químicos, adiciones como, por ejemplo, puzolanas y cenizas volantes según ASTM C618.

Este tipo de adiciones puede aumentar considerablemente la resistencia inicial de las mezclas, optimizar el porcentaje de cemento y mejorar en algunos casos, la trabajabilidad de las mezclas.

De acuerdo con el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) los aditivos más usados son:

- Aditivos higroscópicos: Azúcar, cloruro de sodio, cloruro de calcio.
- Aditivos para reducir el contenido de agua durante el mezclado: Ligno- sulfatos (Pozzolith 8).
- Agentes floculantes: Cal.
- Agentes reductores del calor de hidratación de la mezcla: Fly-Ash y carbonatos de sodio.
- Agentes endurecedores y selladores de superficie: Sales de sodio, silicatos de sodio, hidróxidos de sodio, silicatos de sodio.

- Aditivos expansivos: Sulfatos de sodio, Sales, Aluminatos.
- Cementos expansivos: Cemento Pórtland tipo V.
- Agentes para ayudar la liga entre capas de suelo-cemento: Lignosulfato de calcio y ácido carboxílico hidroxilatado

La eficacia de cada aditivo depende del tipo de suelo y de las condiciones ambientales. En general, una cantidad óptima del aditivo producirá los mejores resultados. Los aditivos que han demostrado ser más beneficiosos para reducir el agrietamiento, en orden de importancia son:

- Cenizas volantes (Fly-ash),
- Pozzolith,
- Cloruro de calcio,
- Sulfatos de magnesio, sodio y calcio,
- Cementos expansivos,
- Hidróxidos de sodio (solamente en caolinitas).

Según Arman y Dantin la utilidad de ácidos Lignosulfato cálcicos e hidroxicarboxílicos han sido efectivos para mejorar la liga entre las capas.

En suma, con la inclusión de estos se pueden obtener buenas ventajas y en algunos casos desventajas.

2.1.1.4 Propiedades físicas de la base estabilizada con cemento

Las bases estabilizadas con cemento tienen propiedades que son particularmente adecuadas para la construcción de estructuras viales.

Las propiedades de las bases tratadas cementos varían en función de diferentes factores, siendo los más importantes:

- La naturaleza de la base, proporción de cemento, cantidad y calidad de agua, y de la cantidad de estos elementos por unidad de volumen de la mezcla compactada.
- Las condiciones de mezclado, compactado, curado y acabado que se presentan durante el periodo de hidratación del cemento.

Se describe una clasificación de las propiedades físicas de la base estabilizada con cemento:

2.1.1.4.1 Densidad

La densidad de la base estabilizada con cemento generalmente se mide por el peso volumétrico seco máximo y se usa como uno de los parámetros de control de campo. La relación óptima de densidad y humedad para el mismo contenido de material y cemento puede cambiar si la energía de compactación cambia, lo que significa un aumento en el peso volumétrico seco máximo debido a un aumento en la cantidad de compactación sin lograr una fractura significativa en las partículas del suelo. aumentar la resistencia a la compresión de la matriz de cemento y mejorar el resto de propiedades estructurales.

Tradicionalmente, los diseños de mezclas de base y cemento se han realizado con base en la resistencia a la compresión de acuerdo con las normas ASTM D558 o AASHTO T134. Sin embargo, durante los últimos 10 años, diferentes países han adoptado una mayor energía de compactación en los métodos y especificaciones de diseño de asfalto mediante la adopción de AASHTO T180, y se ha observado este cambio. Altamente congruente y compatible con la energía de compactación producida por los equipos actuales. Además, se mejora el costo de la mezcla, ya que el diseño de la mezcla requiere menos cemento para lograr la resistencia específica, debido a la mayor energía de compresión.

Finalmente, un suelo granular no plástico con un peso unitario seco máximo relativamente alto sería una excelente opción para cumplir con estándares textiles muy exigentes.

2.1.1.4.2 Permeabilidad

En general, la permeabilidad de la mayoría de las bases estabilizadas se reduce con la adición de cemento hidráulico, y la permeabilidad depende principalmente del tipo de suelo, el contenido de cemento y la compactación adecuada.

Cuando se utilizan estas mezclas para la impermeabilización, como en estanques u otro tipo de estructuras rurales para el almacenamiento permanente o temporal de agua, es extremadamente importante evitar, en la medida de lo posible. Las contracciones provocan grietas generales en la superficie del hormigón y del suelo. Por esta razón, el tipo y contenido de cemento debe elegirse de forma adecuada, específicamente para que tenga una menor retracción y una mayor permeabilidad, en lugar de tener un único módulo de resistencia mecánica.

Las mezclas elaboradas con base fina son aquellas que presentan una permeabilidad baja y la mantienen en el tiempo, valores típicos del coeficiente de permeabilidad K , en las mezclas de base-cemento elaboradas con suelos mixtos arenosos, más que en las mezclas de base-cemento. Cambio de $0,4$ a 3×10^{-6} cm/s. La proporción de cemento en estos casos corresponde a valores inferiores al 5% en peso.

2.1.1.4.3 Contracción

La retracción en la mezcla estabilizada ocurre como resultado de la pérdida de agua debido al secado y las reacciones que ocurren durante la hidratación del cemento. Los factores que afectan la severidad y extensión del agrietamiento son muchos y complejos, incluyendo: el tipo y la cantidad de cemento usado, el contenido y la calidad del agua usada en el campo, la naturaleza del agregado y el proceso de curado externo, condiciones climáticas, tiempo de instalación y grado de unión en la interfaz entre el sustrato y el sustrato de hormigón. Las causas y soluciones de las grietas por contracción en mezclas de base y cemento han sido estudiadas por más de 50 años, y la referencia para

entender este fenómeno son los estudios desarrollados por George K. (Mecanismo de contracción en suelos de cemento. historial de búsqueda de carreteras)

Muestra países como Francia, España y Estados Unidos. Ha desarrollado e implantado sistemas para la reducción de fisuras por retracción, que se basan en la aplicación de técnicas constructivas avanzadas como prefisuración, creación de nuevos procesos de unión, compactación y post-microfisuración. En El Salvador, el agrietamiento se puede reducir mediante un buen control de la retracción sin crear juntas, gracias a los requisitos para mejorar el diseño de la mezcla, particularmente el tipo de cemento utilizado, la energía y la presión aplicada. (El estado actual del suelo cemento en la estructura de pavimentación. Revista ISCYC Año 11, Número 43).

2.1.1.4.4 Agrietamiento.

El agrietamiento es uno de los aspectos insatisfactorios del concreto del suelo porque si se ignora y no se toma con las medidas adecuadas, puede reducir la vida útil del pavimento y hacer que el diseño sea deficiente. Sin embargo, el diseño de ingeniería experta y las prácticas de construcción correctas pueden prevenir la mayoría de los impactos negativos.

La grieta es una característica común de los suelos – cemento. La formación de grietas por contracción relativamente cercanas se puede observar en la mayoría de las estructuras de hormigón de tierra. Estas grietas muy delgadas se forman de una manera que permite que el material se adhiera bien entre sí, lo suficiente para que el pavimento se comporte de manera similar a la roca triturada. Algunos autores se refieren a las capas de suelo de hormigón como una serie de grandes piezas que se pegan entre sí, a las que denominan "islas".

2.1.1.5 Propiedades Mecánicas de la base estabilizada con cemento

2.1.1.5.1 Resistencia a la Compresión Simple

La resistencia a la compresión de una mezcla de base estabilizada con cemento es un indicador de la reacción base-cemento-agua y de la velocidad de fraguado a lo largo del tiempo. Los valores obtenidos dependen de muchos factores, entre ellos:

- El contenido y tipo de cemento
- Tipo de suelo.
- La energía de compactación aplicada.
- La eficiencia lograda en el mezclado.
- El tipo y cantidad de materia orgánica, sales y materiales deletéreos existentes en el suelo.
- Cantidad y calidad del agua.
- El tiempo transcurrido después de realizado el mezclado y compactación.
- La duración y forma de hacer el curado.
- Las medidas consideradas para disminuir el agrietamiento.
- Las características y efectividad de los aditivos o adiciones utilizadas.
- Tamaño y forma del espécimen de ensayo.

De acuerdo con ACI 230.1R, los rangos tradicionales de resistencia a compresión simple de 7 a 28 días de edad (saturados previamente al ensayo) estos cambian de acuerdo con lo mostrado en la tabla 10.

Tabla 10. Resistencia a la compresión simple de 7 y 28 días de suelo-cemento

Tipos de Suelo. SUCS	F'c a 7 días (kgf/cm ²)	F'c a 28 días (kgf/cm ²)
Suelo de arena y grava: AASHTO grupos A – 1, A – 2, A – 3. Grupos unificados GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM	21 – 42	28 – 70

Suelos limosos: AASHTO grupos A – 4 y A – 5. Grupos unificados ML, CL	18 – 35	21 – 63
Suelos arcillosos: AASHTO grupos A – 6 y A – 7. Grupos unificados MH, CH	14 – 28	18 – 42

Fuente: ACI 230.1R

Los requerimientos mínimos para el estudio de la resistencia a la compresión simple establecidos en varios países. se muestran en las siguientes tablas (curado húmedo).

Tabla 11. *Requerimiento mínimo de resistencia a la compresión de suelo-cemento*

Tipo de suelo	Resistencia mínima a la compresión (psi)	
	7 días	28 días
Todos los tipos	284	-

Fuente: El salvador

Tabla 12. *Requerimiento mínimo de resistencia a la compresión de suelo-cemento*

Tipo de suelo	Resistencia mínima a la compresión (psi)	
	7 días	28 días
Suelos arenosos y gravas	300-600	400-1000
Suelos limosos	250-500	300-900
Suelos arcillosos	200-400	250-600

Fuente: PCA (EUA)

Tabla 13. *Requerimiento mínimo de resistencia a la compresión de suelo-cemento*

Tipo de suelo	Resistencia mínima a la compresión (psi)	
	7 días	28 días
Bases estabilizadas	300	-

Fuente: INVIAS (Colombia)

Es importante mostrar que la resistencia a la compresión simplemente aumenta con el tiempo, y los experimentos y mediciones realizados muestran que hay un aumento significativo en la resistencia con el tiempo. La resistencia a la compresión simple aumenta gradualmente en los primeros 90 días, de 1 a 3 veces después de 7 días, según el tipo de suelo, el tipo y el contenido de cemento, la edad después de 28 días el crecimiento es mucho más lento. Un estudio en El Salvador en un camino

que había estado en uso por más de 50 años mostró el desarrollo de prácticamente todos los parámetros de resistencia mecánica que podían ser analizados en una mezcla de suelo y concreto. En el caso de los valores medios de resistencia a compresión simple obtenidos en este estudio, se muestran en la ilustración 8, en comparación con otros proyectos desarrollados y evaluados a largo plazo en Estados Unidos.

Resistencia a la compresión simple (kgf/cm²)

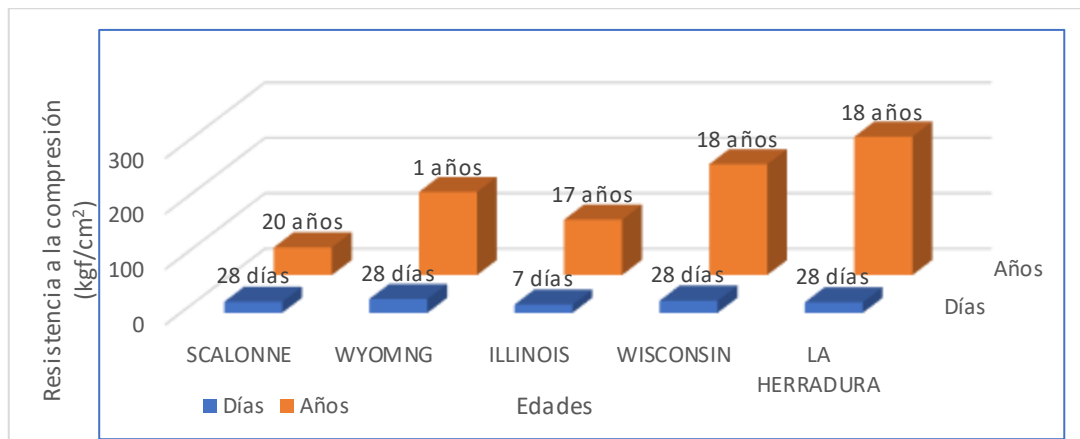


Ilustración 7. Estudio comparativo de resistencia a la compresión simple de especímenes de suelo cemento a través del tiempo para diferentes proyectos. (Revista ISCYC No. 43)

Fuente: El salvador

2.1.1.5.2 Resistencia a la flexión

El comportamiento de un suelo cemento para su resistencia a la flexión se conoce directa e indirectamente por varias pruebas, como la preparación y prueba de vigas descrito por ASTM D1635 y la prueba de tensión indirecta. En general se distinguen dos o dos conjuntos de valores, los correspondientes a suelos finos y los obtenidos mediante mezclas con suelos granulares. Simple y con un peso volumétrico seco máximo del compuesto, ACI 230.1R propone la siguiente ecuación como una "buena aproximación" entre la resistencia a la compresión y el módulo de fractura:

$$MR = 0.51 (F'c)^{0.88}$$

Donde:

MR = Modulo de ruptura en psi.

F_c = Resistencia a la compresión simple en psi.

Varios investigadores hacen coincidir que el módulo de ruptura puede variar de 1/3 a 1/5 de la resistencia a compresión simple del suelo cemento, esto aclara una idea de la rigidez y la conveniente capacidad de distribución de cargas, que pueden ocasionarse en estructuras de pavimentos utilizando este tipo de mezclas. Según Rieuwerts De Vries (Dutch Stichting Studie C. Holland), con respecto al desarrollo de la resistencia a la flexión con la edad, se puede decir que su crecimiento es insignificante, el módulo de ruptura a los 28 días es de 1.1 a 2 veces más al que se obtiene a 7 días, y a los 90 días es de 1.5 a 2.7 veces más al de los 7 días. Un rango tradicional de valores de módulo de rotura a 28 días es de 6 a 17 kgf/cm².

2.1.1.5.3 Módulo de elasticidad

Para el diseño pavimentos, es importante que cada capa componente de la estructura sea capaz de distribuir las cargas impuestas por los vehículos, provocando la menor deformación posible. Esto se logra al tener un alto módulo de elasticidad en una o dos capas de la estructura del pavimento. La estabilización de la base con cemento aumenta significativamente el módulo de elasticidad, creando una rigidez utilizable con la ventaja de una distribución uniforme de la carga y un buen desempeño de la estructura del piso durante la vida útil del proyecto.

La PCA y AASHTO recomiendan valores entre 35,000 Kg/cm² y 148,000 Kg/cm² a 28 días para la mayoría de las mezclas.

A lo largo de la historia se ha implementado varios proyectos de investigación relacionados con la determinación del módulo de elasticidad estático y dinámico en mezclas de las bases estabilizada con cemento. En general, mezclas elaboradas con el 4 al 5% de cemento en peso en suelos granulares no plásticos, presentan valores de módulos de elasticidad estáticos entre 38,000 y 60,000 kg/cm² a 28 días. En el caso de suelos finos y plásticos han presentado valores límite de 34,000 kg/cm². Esta práctica genera la posibilidad que el valor seleccionado no sea representativo para el suelo, tipo y contenido de cemento a utilizar en el proyecto



Ilustración 8. Ensayo de módulo de elasticidad estáticos y pulso ultrasónico módulos dinámicos.

2.1.1.5.4 Capacidad portante de la base estabilizada con cemento.

- **Valor de Soporte de California (C.B.R)**

Valores del C.B.R, y otras propiedades exigidas para distintas capas de base estabilizada se presentan en la tabla. Los intentos para ligar el proporcionamiento de las mezclas con el valor relativo de soporte no han llevado a resultados concluyentes porque es usual que cualquier base con cemento, y sobre todo los que contienen suelos granulares gruesos, alcancen sistemáticamente valores tan altos del C.B.R. que su interpretación sea poco confiable.

Tabla 14. *Propiedades comúnmente exigidas en mezcla de suelo – cemento.*

TIPO DE CAPA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE A 7 DÍAS (kgf/cm²)	C.B.R (%)	EXPANSIÓN (%)	PERDIDAS DE PESO EN P. HUMEDO Y SECO (%)
Sub – bases. Material de relleno para trincheras	3.5 – 10.5	20 – 80	27	
Sub – bases o bases para tráfico muy ligero	7.0 – 14.0	50 – 150	2	10
Bases para tráfico intenso	14.0 – 56.0	200 – 600	2	14
Protecciones de terraplenes contra erosión V acción del agua	56	600	2	14
Después de siete días de curado a humedad constante. La resistencia de los especímenes análogos sumergidos en agua no debe ser aproximadamente de un 20%				
Luego de un periodo de inmersión.				

Fuente: IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

2.1.1.5.5 Módulo de Poisson.

Valores adoptados en los módulos de Poisson para suelo – cemento y se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 15. *Módulo de Poisson medidos del suelo – cemento.*

INVESTIGADORES	VALORES MEDIOS DEL MÓDULO
Felt y Abrams	0.08 – 0.24
Inglés, O.G.	0.10 – 0.30
Portand Cement Association, E.U.A.	0.12 – 0.14
Larsen T.J. Nussbaum M. y Collev B.E.	0.10 – 0.20
Granular con finos.	0.12
Granular.	0.14
Reinhold, F.	0.13

Fuente: IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

Tabla 16. *Módulo de Poisson.*

INVESTIGADORES	ESTÁTICO	DINÁMICO	TIPO DE SUELO
Felt y Abrams		0.22 – 0.27	Arenoso
		0.41 – 0.42	Areno – Arcilloso
Reinhold	0.095 – 0.125		Areno – Arcilloso
Portland Cement Association. E.U.A.	0.120 – 0.142		Arenoso

Fuente: IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

2.1.2 Teórico:

Los suelos adecuados para la estabilización de un material base con cemento son aquellos en los que el cemento se consume con un peso del 5-12% del peso del suelo. Instituto Americano del Concreto (ACI, 2009).

Tabla 17. *Requisitos típicos de cemento para varios tipos de suelo.*

Clasificación del suelo AASHTO. (Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte)	Clasificación del suelo ASTM. (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	Rango típico de cemento requerido, porcentaje en peso.
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	3-5
A-1-b	GM, GP, SM, SP	5-8
A-2	GM, GC, SM, SC	5-9
A-3	SP	7-11
A-4	CL, ML	7-12
A-5	ML, MH, CH	8-13
A-6	CL, CH	9-15
A-7	MH, CH	10-16

Fuente: Informe sobre Suelo Cemento. Informado por el Comité 230 del Instituto Americano del Concreto (ACI) 2009.

La estabilización con cemento generalmente se aplica para aumentar la resistencia del suelo y así mismo incrementar las cargas de tránsito y obtener mezclas con un mejor comportamiento físico ante la erosión y los cambios de temperatura. Es por esto que es usado como un material para

pavimentos donde es muy importante la calidad de la base debido a que permite una alta capacidad estructural y durabilidad a largo plazo, como una consecuencia de la incorporación de cemento, el espesor de la base estabilizada es menor que el requerido para bases granulares que soporten el mismo tráfico, porque la rigidez de esta hace que las cargas de tráfico se distribuyan sobre un área mayor, haciendo disminuir los esfuerzos sobre la subbase o sobre la subrasante. No existen limitaciones para el uso de agua en estas mezclas, cualquier agua potable es apta para emplear en dichas mezclas. Esta agua debe cumplir con un requisito básico respecto al pH ya que este debe estar entre 5,50 y 8,0. También se recomienda que el máximo contenido de sulfatos debe ser 1,0 g/l. En cuanto al cemento, el más utilizado es hidráulico normal tipo I, aunque para algunos proyectos se han usado los de alta resistencia, tipo III. Existen trabajos de investigación que concluyen que el cemento hidráulico tipo I permite a la mezcla alcanzar mayor resistencia que la del tipo II pues contiene mayor cantidad de aluminato tricálcico y sulfato de calcio, pero el tipo II es preferible al tipo I cuando se trata de reducir el agrietamiento. Además, se ha observado que los cementos tipo II y IV son más resistentes al ataque de los sulfatos (los sulfatos ejercen mucha influencia en la durabilidad y resistencia a la compresión simple) que el tipo I. Las bases predominantemente granulares dan después de tratados materiales frágiles. Los suelos cohesivos tratados presentan un comportamiento elástico lineal y elástico no lineal significativo.

3 CAPÍTULO III

El presente capítulo se llevó a cabo con la utilización de los agregados de la cantera de Megarok S.A., y cemento tipo GU, se detallan los ensayos y resultados correspondientes.

Caracterizaciones de este trabajo de titulación:

- Micro localización



Ilustración 9. Micro localización de la cantera Megarok S.A. se encuentra localizada en el sector Picoazá del cantón Portoviejo perteneciente a la provincia de Manabí.

Fuente: Propia

3.1 DISEÑO METODOLÓGICO.

3.1.1 Hipótesis.

¿La utilización de los distintos especímenes influyen en la variación del comportamiento resistente a la compresión de la base estabilizada con cemento?

3.1.2 Variables:

3.1.2.1 Variable independiente

Los distintos especímenes cilíndricos.

3.1.2.2 Variable dependiente

La base estabilizada con cemento.

3.1.3 Nivel de investigación.

De acuerdo a la naturaleza del análisis de la investigación, reúne por su nivel las características de un estudio descriptivo, explicativo y correlativo.

3.1.4 Método.

El proyecto se divide en 3 fases (A, B y C), con el fin de cumplir cada uno de los objetivos específicos, y dentro de la segunda fase se subdivide en otras mencionadas a continuación:

3.1.4.1 FASE A. Marco teórico y metodología de los ensayos.

Esta fase ya fue presentada anteriormente, las conceptualizaciones y definiciones generales en el marco referencial del capítulo II y la metodología detallada en este capítulo III.

3.1.4.2 FASE B. Ensayos.

En esta fase se realizaron ensayos de laboratorio para la obtención de las propiedades mecánicas específicamente de base granular de clase 1A, así como también la tabulación estadística.

3.1.4.2.1 Caracterización del material granular

Como material principal se usó la Base Clase 1A extraído y procesado de la cantera Megarok S.A, es un material granular, cúbica, angular, baja plasticidad, color gris, los agregados utilizados son limpios, sólidos y resistentes.



Ilustración 10. Extracción del material granular base y toma de muestra

Fuente: Propia

Granulometría de los áridos gruesos y finos: “Esta norma trata de la determinación cuantitativa de la distribución granulométrica de los áridos gruesos y finos de los materiales, por tamizado”.



Ilustración 11. Ensayo Granulométrico del material granular base clase 1 A.

Fuente: Propia

Tabla 18. Ensayo de humedad natural de la base clase 1A (NTE INEN 1160)

CONTENIDO DE AGUA			
Tara No	1	2	3
Peso muestra húmeda + tara (gr)	175,18	198,15	201,3
Peso muestra seca + tara (gr)	163,65	185,21	187,56
Peso de agua (gr)	11,53	12,94	13,74
Peso de tara (gr)	31,54	31,70	31,55
Peso de muestra seca (gr)	132,11	153,51	156,01
Contenido de humedad (kg/ m ³)	8,73	8,43	8,81

Fuente: Propia

El porcentaje de agua obtenido de manera promedio es de 8,66 %, este dato es muy importante para el diseño de la mezcla.

Tabla 19. Ensayo granulométrico de la base clase 1A (NTE INEN 696)

Granulometría de Base Clase 1A				HMAT-H00-RC02	
Planta	Picoazá			Muestreo:	20/5/2022
Agregado	Base C1A Omnicon			Ensayo:	20/5/2022
Fuente	Producción			Realizado:	Jr. Antonio
Tamiz		Retenido	Retenido	Retenido	Pasante
INEN	ASTM	Acumulado (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	Acumulado (%)
75 mm	3 in.			#N/D	#N/D
50 mm	2 in.	0,0	0,0	0,0	100,0
37.5 mm	1½ in.	2578,7	8,1	8,1	91,9
25 mm	1 in.	11669,3	28,6	36,7	63,3
19 mm	¾ in.	14935,1	10,3	46,9	53,1
9.5 mm	¾ in.	19558,2	14,5	61,4	38,6
4,75 mm	No. 4	22542,0	9,3	70,8	29,2
2,00 mm	No. 10	2013,7	6,4	77,2	22,8
430 µm	No. 40	4168,5	6,8	83,9	16,0
75 µm	No. 200	9196,0	15,9	99,8	0,2
Bandeja		60,0	0,2	100,0	0,0
Total		31.834,2			
Pasa # 4 Wh.		10.039,1			
Pasa # 4 Ws.		9.292,2			
Fracción Wh.		10.000,0			
Fracción Ws.		9.256,0			
Peso Húmedo	500,0	Peso Seco	462,8		
Porcentaje de humedad		8,04%			

Fuente: Propia

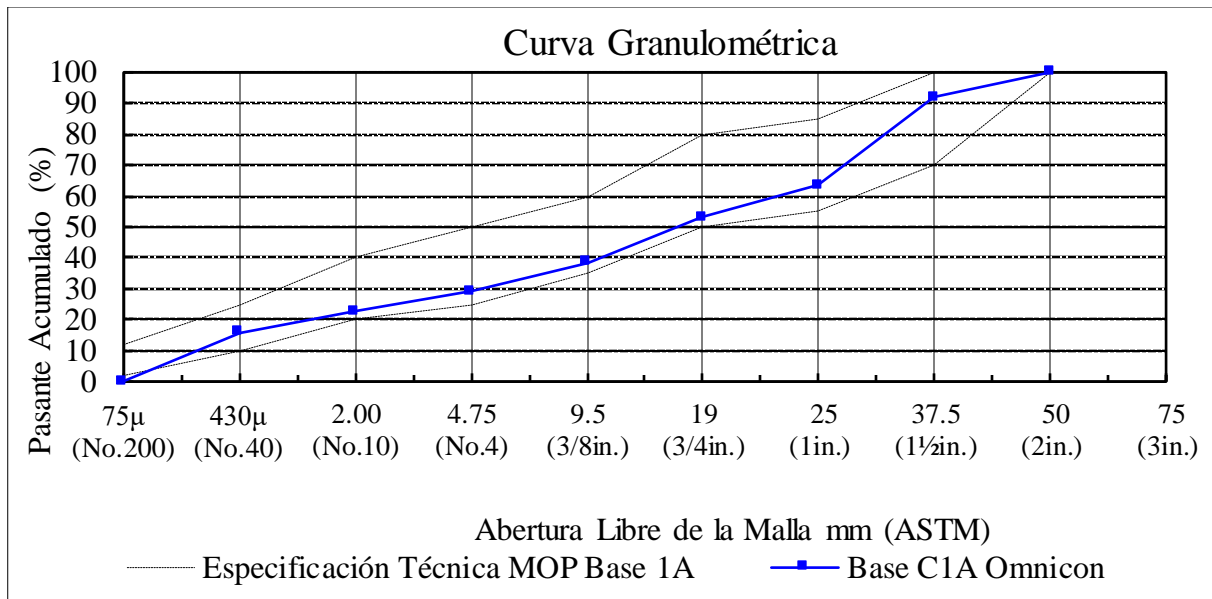


Ilustración 12. Gráfica del ensayo granulométrico de la base clase 1A (NTE INEN 696)

Fuente: Propia

La base clase 1A se encuentra dentro de la especificación recomendada por la MOP (Ministerio de Transporte y Obras Públicas) por lo tanto se sigue el procedimiento.

El ensayo límite de Atterberg consiste en determinar el contenido de agua del suelo, en el límite entre sus propiedades líquidas y plásticas, utilizando un dispositivo mecánico (Copa de Casa grande), que, con el número máximo de golpes, determina el contenido de humedad del suelo bajo condiciones estándar. condiciones de INEN 685, 688 y 690.

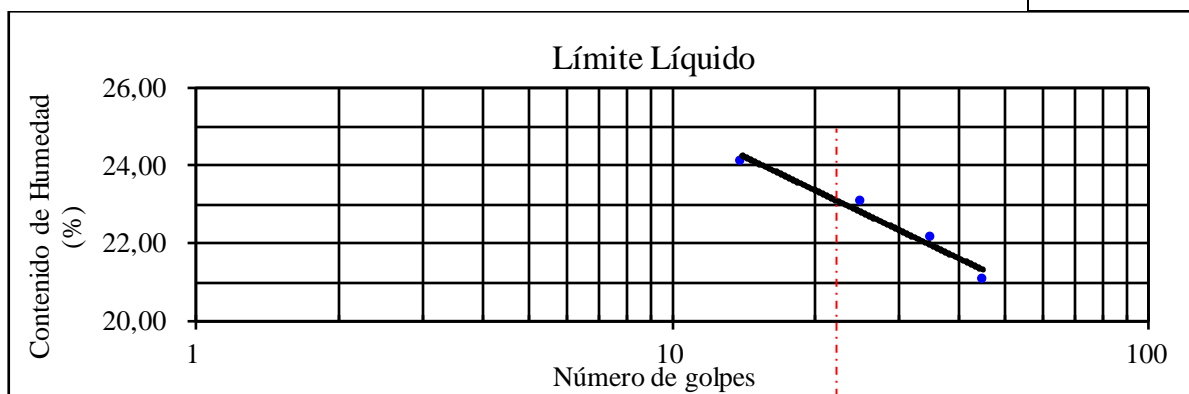


Ilustración 13. Ensayo de límites de Aterberg método INEN 685

Fuente: Propia

Tabla 20. Ensayo de límites de Atterberg de la base clase IA (NTE INEN 691 – 692)

Límite líquido / Límite plástico NTE INEN 691 – 692				HMAT-H00-RC01		
Planta:		Picoazá			Muestreo:	21/5/2022
Agregado:		Base C1A Omnicon			Ensayo	21/5/2022
Fuente:		Producción			Realizado:	Jr. Antonio
No. De Golpes	Recipiente		Masa del recipiente		Contenido	
	No.	Masa	+ suelo húmedo	+ suelo seco	de agua	
		g	g	g	%	
Líquido	45	A	31,5	53,2	49,4	21,1
	35	B	31,7	51,5	47,9	22,1
	25	C	24,4	47,5	43,1	23,1
	14	D	31,7	53,5	49,3	24,1
Plástico	-	1	9,4	10,6	10,4	20,4
	-	2	6,1	6,9	6,8	20,3
	-	3	6,1	6,8	6,7	20,0
						20,23



Límite líquido	23,05
Límite plástico	20,23
Índice de plasticidad	2,82

Ilustración 14. Gráfica del ensayo granulométrico de la base clase IA (NTE INEN 691 – 692).**Fuente:** Propia

El ensayo de Atterberg realizado con el método de casa grande demuestra que la base clase 1A se encuentra dentro de las especificaciones que recomienda la INEN 692 (Normativa Ecuatoriana), teniendo un índice de plasticidad de 2,82 %.

La prueba de presión Proctor es uno de los procedimientos de investigación y control de calidad más importantes en la compactación del suelo. A partir de él, es posible determinar la máxima densidad seca del suelo en relación con su contenido de humedad, a una determinada energía de presión.

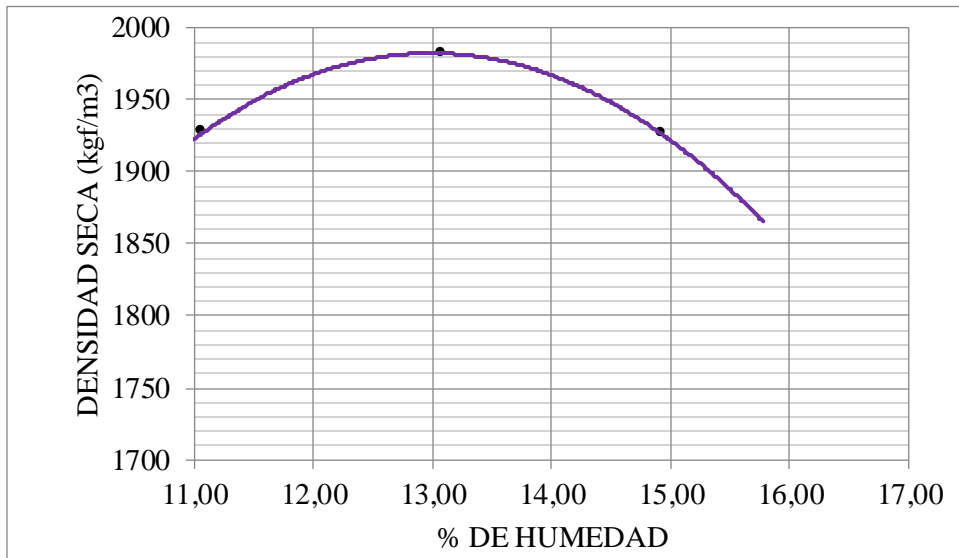


Ilustración 15. *Ensayo de Proctor Modificado método ASTM D-1557*

Fuente: Propia

Tabla 21. Ensayo de Proctor Modificado de la base clase 1A (NTE INEN 857)

ENSAYO DE COMPACTACIÓN			
Proyecto:			
Localización:			
Procedencia:	CANTERA MEGAROK		
Descripción de la muestra:	Base Clase 1A Omnicon (Material Negro)		
Fecha:	22/5/2022		
Profundidad:			
Masa del cilindro (p7)	6150,8	Tipo del ensayo	Modificado Ø=6"; 18"-4.5 Kg.; 5c-56g/c
Volumen del cilindro (v)	2104,9	# De capas	5
MASA DEL MARTILLO (lb)	10	# De golpes por capa	56
Altura de caída del martillo	45,7		
DATOS PARA LA CURVA			
Masa del cilindro + suelo húmedo	10656	10869	10810
Masa del suelo húmedo	4505	4718	4659
Densidad húmeda del suelo	2140	2241	2213
Densidad seca del suelo	1927	1982	1926
CONTENIDO DE AGUA			
% De humedad añadida al suelo	2 %	4 %	6 %
Recipiente no tara	1	2	3
Tara + suelo húmedo	177,6	167,9	177,5
Tara + suelo seco	163,1	152,1	158,5
Peso de agua	14,6	15,8	19,0
Peso de tara	31,5	31,3	31,3
Peso suelo seco	131,5	120,8	127,3
Contenido de agua promedio %	11,1	13,1	14,9



DENSIDAD SECA
MÁXIMA

1982 kgf/m³

% DE HUMEDAD
ÓPTIMA

13,08 %

Observaciones:

Normas de Referencia

ASTM D 698-91

ASTM D 1557-91

AASHTO T 99-94

AASHTO T 180-93

Ilustración 16. Gráfica del ensayo de Proctor Modificado de la base clase 1A (NTE INEN 857)

Fuente: Propia

El Ensayo CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) es un parámetro del suelo que consistió en cuantifica su capacidad resistente como subrasante, sub base y base en el diseño de pavimentos, así como también el esponjamiento una vez que lo sumerge en agua.



Ilustración 17. Lectura de los diales en el esponjamiento del CBR

Fuente: Propia

Tabla 22. Ensayo de CBR de la base clase 1A (ASTM D 1883).

ENSAYO DE C.B.R.	
Proyecto:	
Localización:	
Procedencia:	CANTERA MEGAROK
Descripción de la muestra:	Base Clase 1A Omnicon (Material Negro)
Fecha:	22/5/2022
Profundidad:	

Molde No.	1	2	3
Número de capas	5	5	5
Número de golpes por capa	56	25	10
	ANTES DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO
Peso muestra húmeda + molde (gr)	10756,2	11344,4	10937
Peso de molde (gr)	5683,4	6334,4	6302,5
Peso de muestra húmeda (gr)	5072,8	5010	4634,5
Volumen de la muestra (cm ³)	2329	2337	2325
Densidad húmeda (kg/m ³)	2178	2143	1993
Densidad seca (kg/m ³)	1930	1902	1765

CONTENIDO DE AGUA			
Tara No	1	2	3
Peso muestra húmeda + tara (gr)	165,2	206,8	202,0
Peso muestra seca + tara (gr)	150,0	187,0	182,5
Peso de agua (gr)	15,2	19,8	19,5
Peso de tara (gr)	31,7	31,3	31,5
Peso muestra seco (gr)	118,4	155,7	151,0
Contenido de humedad (kg/m ³)	12,8	12,7	12,9

Fuente: Propia

Tabla 23. Ensayo penetración de CBR de la base clase 1A (ASTM D 1883).

ENSAYO DE CBR													
PROYECTO:													
LOCALIZACIÓN:													
PROCEDENCIA:		CANTERA MEGAROK											
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:													
FECHA:		25/5/2022											
PROFUNDIDAD:													
Día y mes	Lectura dial Pulg.	Altura muestra Pulg.	Molde 1		Molde 2		Molde 3		Lectura dial Pulg.	Altura muestra Pulg.	Esponjamiento		Esponjamiento %
			Carga Dial	Presiones Lb/Pulg ²	Valores de CBR	Carga Dial	Presiones Lb/Pulg ²	Valores de CBR			Carga Dial	Presiones Lb/Pulg ²	
25/5/2022	0	5,00	0,000	0,00	0	5,00	0,000	0,00	0	5,00	0,000	0,00	0,00
25/5/2022	1	5,00	0,001	0,02	0	5,00	0,000	0,00	1	5,00	0,001	0,02	0,02
25/5/2022	2,5	5,00	0,003	0,05	2	5,00	0,002	0,04	3,5	5,00	0,004	0,07	0,07
25/5/2022	5,2	5,00	0,005	0,10	3,5	5,00	0,004	0,07	4	5,00	0,004	0,08	0,08
Seg	Tiempo Min	Penetr. Pulg.	Molde 1		Molde 2		Molde 3		Valores de CBR	Presiones Lb/Pulg ²	Carga Lb	Presiones Lb/Pulg ²	Valores de CBR
			Carga Dial	Presiones Lb/Pulg ²	Valores de CBR	Carga Dial	Presiones Lb/Pulg ²	Valores de CBR					
0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0,30	25	298	105	201	71	185	65	65	185	65	65	65
30	1,00	50	685	242	605	213	614	217	217	614	217	217	217
30	1,30	75	1158	408	988	349	973	343	343	973	343	343	343
30	2,00	100	2655	937	1985	700	1280	451	451	1280	451	451	45,15
60	3,00	150	3145	1109	2467	870	1755	619	619	1755	619	619	619
60	4,00	200	4578	1615	3154	1113	2130	751	751	2130	751	751	751
60	5,00	250	6548	2310	4567	1611	2507	884	884	2507	884	884	884
60	6,00	300	7894	2784	5498	1939	2843	1003	1003	2843	1003	1003	1003
120	8,00	400	8456	2983	6245	2203	3312	1168	1168	3312	1168	1168	1168
120	10,00	500	9564	3374	7895	2785	4524	1596	1596	4524	1596	1596	1596

Fuente: Propia

Tabla 24. Resultados del ensayo de CBR de la base clase 1A.

# golpes	CBR (%)	Densidad (kgf/m ³)
56	93,7	1930
26	70,0	1902
11	45,1	1765
DENS MAXIMA		1982
%		100
=		1982

LINEA DE DENSIDAD MAXIMA	
1982	84,7
1982	0

X	Y	m	corte "x"
70,0	1901,7	5,5	84,66
45,1	1765,0		

Gráfico perpendicular al eje X		
	X	Y
CBR	84,66	1700
	84,66	1982,17

Fuente: Propia

Se determinó que el porcentaje de CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) Ensayo de Relación de Soporte de California), es de 84,66 % que es mayor a la mínima requerida de un 80,00 %.

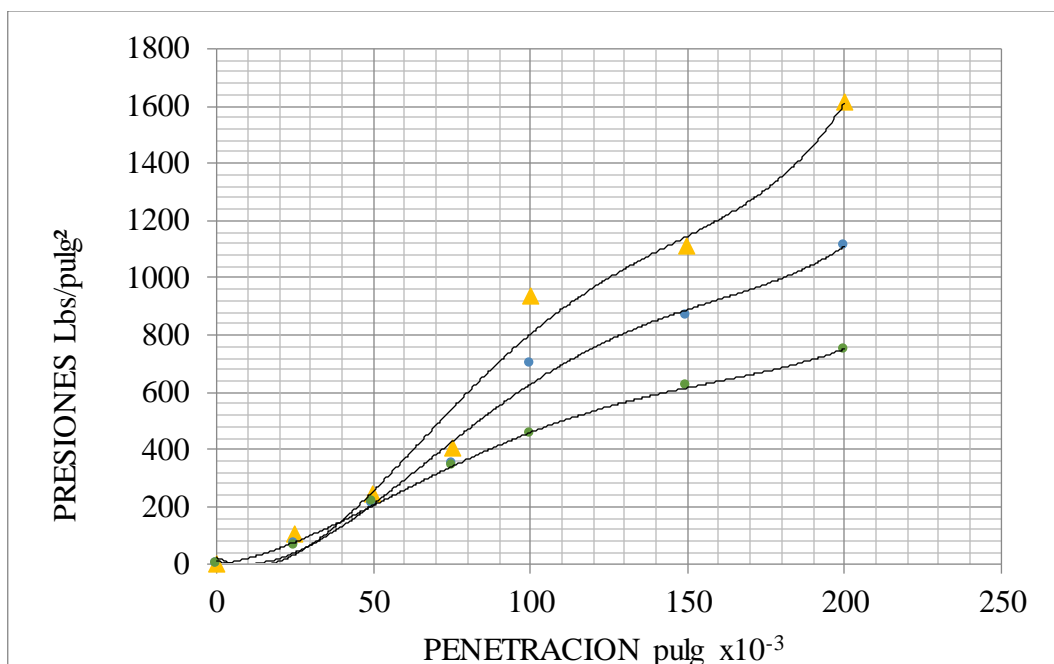


Ilustración 18. Gráfica de penetración del ensayo de CBR de la base clase IA.

Fuente: Propia

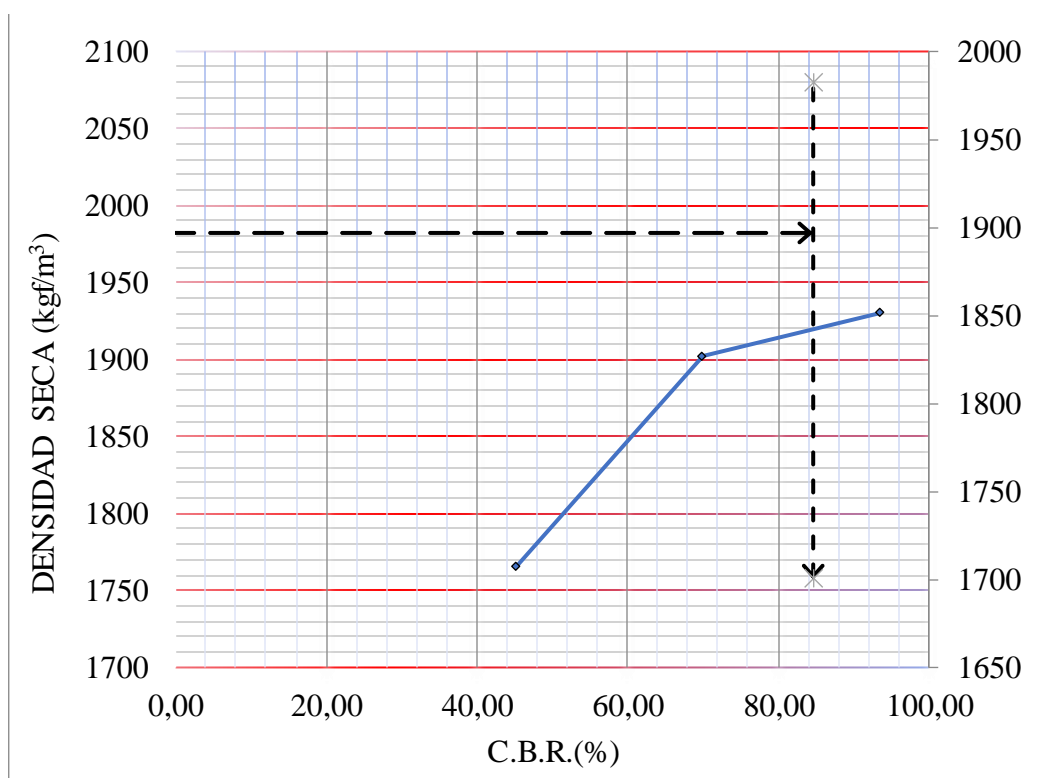


Ilustración 19. Gráfica del ensayo de CBR de la base clase IA.

Fuente: Propia

3.1.4.2.2 Determinación del diseño de las mezclas

Relaciones humedad - peso unitario de mezclas de suelo cemento: “Estos métodos se refieren a la determinación de la relación entre la humedad y la densidad de mezclas de suelo - cemento cuando se compactan del modo que se prescribe en esta norma y antes de que ocurra la hidratación del cemento” (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Para esto fue necesario primero tomar en cuenta el contenido de agua natural y el contenido de agua óptima para garantizar una buena mezcla, con los resultados obtenidos de contenido de agua natural siendo de 8,66 % y el óptimo de 13,06 % con una diferencia de 4,40 %, esta diferencia se utiliza para el mezclado de la BAEC.

Luego se pudo caracterizar el material se escogió un rango típico de cemento Holcim Tipo GU requerido, porcentaje en peso. Se escogió un rango de (4-6) porciento para la base clase 1A, la primera mezcla se la realiza con un 4.0 % de cemento, 5.0 % de agua añadida y una cantidad de 55.0 kg de base clase 1A (material negro), después se utilizó un 5.0 % y 6.0 % de cemento, pero con los mismos porcentajes de agua y material.

Tabla 25. *Diseño de las Mezclas usada para este proyecto.*

Diseño de las Mezclas con Material Base C1A, Cemento GU y Agua Potable.		
Porcentaje estimado de cemento tipo GU (%)	Peso estimado de Material Base C1A (gr)	Porcentaje estimado de agua potable (%)
4	55000	5
5	55000	5
6	55000	5

Fuente: Propia

Estos tres componentes se mezclaron hasta que la muestra quedó completamente homogénea, así la base estabilizada con cemento quedará en un estado de humedad óptimo para que este material alcance un buen nivel de densidad y posteriormente una buena resistencia.

Solo si la resistencia de la mezcla da por debajo de la esperada se escogerá un rango superior de cemento requerido, porcentaje en peso.

3.1.4.2.3 Evaluación de la mezcla

Una vez que la mezcla quede lista se para su posterior compactación se la evalúa, en caso de que la mezcla quede un poco seca se le agrega cuidadosamente una pequeña cantidad de agua y se mezcla nuevamente, en el caso contrario de que la mezcla quede muy húmeda se tendrá que agregar cuidadosamente porciones relativa de material negro y cemento y se procede a mezclar hasta que quede homogénea.

Estas mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Método de ensayo para la determinación del periodo de trabajabilidad: “Esta norma describe los métodos de ensayo para determinar el periodo de trabajabilidad de una mezcla de áridos con conglomerante hidráulico, utilizando materiales granulares” (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2004).



Ilustración 20. Mezcla de los componentes del suelo cemento.

Fuente: Propia

Posterior a la preparación de la mezcla se tiene un rango de tiempo de trabajabilidad menos de una hora, por esta razón posterior al mezclado se tiene que tener listo los equipos con los que se realizan los ensayos.

Preparación y curado de probetas de la BAEC para pruebas de compresión en el laboratorio: “Esta norma cubre el procedimiento para moldear y curar en el laboratorio probetas de suelo - cemento, utilizadas en pruebas de compresión, bajo un control exacto de las cantidades de materiales y de las condiciones de ensayo.” (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de la BAEC (a los siete días y con distintos especímenes): Esta norma se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión del suelo - cemento, empleando cilindros moldeados como especímenes de ensayo (INVIAS, 2013).

3.1.4.2.4 Procedimientos alternativos en la elaboración de especímenes tomando como referencia principal la ASTM D 1633 y ASTM C 1435 empleados en la elaboración de la BAEC:

3.1.4.2.4.1 Ensayo A:

Este procedimiento emplea un cilindro de ensayo de 100 mm (4.0") de diámetro y 115 mm (4.584") de altura. La relación de la altura al diámetro es de 1.15. Este método de ensayo debe ser usar solamente en materiales con un 30% o menos retenido en los 3/4" (19.0mm).

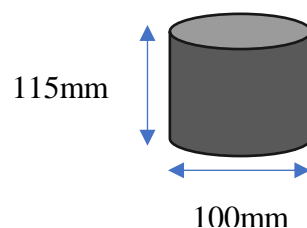


Ilustración 21. Medidas de los cilindros pequeños

Fuente: ASTM D 1633

3.1.4.2.4.2 Ensayo B

Este procedimiento emplea un cilindro de ensayo de 100 mm (4.0") de diámetro y 200 mm (8.0") de altura. La relación de la altura al diámetro es de 2.0. utiliza agregados pasantes de tamiz 3/4" (19.0mm).

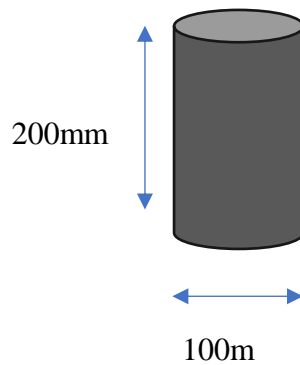


Ilustración 22. Medidas de los cilindros medianos

Fuente: ASTM C 1435

3.1.4.2.4.3 Ensayo C

Este procedimiento emplea un cilindro de ensayo de 150 mm (6.0") de diámetro y 300 mm (12.0") de altura. La relación de la altura al diámetro es de 2.0. emplea agregados de pasantes de 1 pulgada.

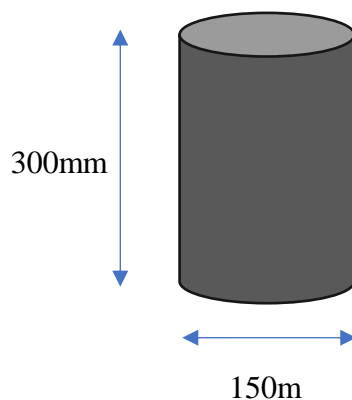


Ilustración 23. Medidas de los cilindros pequeños

Fuente: Propia

Nota 1. En esta norma se utiliza un cilindro con la relación al diámetro de 2, haciendo uso de un cilindro de 71.1 mm (2.8") de diámetro y de 142.2 mm (5.6"). Este método de ensayo es aplicable a los materiales que pasan por el tamiz No. 4 (4,75mm): Pero los especímenes más grandes de 100 mm (4") de diámetro y 200 mm (8") de altura, se moldean de una manera similar al Método B y C.

3.1.4.2.4.4 Uso y Significado

El Método A hace uso del mismo equipo de compactación y moldes comúnmente disponibles en los laboratorios de suelos y empleados para otros ensayos de suelo-cemento. Se considera que este método suministra una medida aproximada de la resistencia en lugar de un valor exacto de la resistencia a la compresión. Debido a una menor relación de altura al diámetro (1.15) de los cilindros, la resistencia a la compresión determinada mediante el Método A será normalmente mayor que la del Método B y C.

A causa de la mayor relación de la altura al diámetro (2.00), el Método B y C da una mejor medida de la resistencia a la compresión desde un punto de vista técnico, ya que reduce condiciones complejas de esfuerzos que pueden presentarse durante el aplastamiento de especímenes del Método A. En la práctica, el Método A ha sido empleado más comúnmente que el Método B y C. Como consecuencia de esto, ha sido costumbre evaluar o especificar valores de resistencia a la compresión según el Método A.

3.1.4.2.4.5 Equipos

Las máquinas de prueba de presión. Puede ser de cualquier tipo de potencia y control suficientes para proporcionar las tasas de carga especificadas y deben cumplir con los requisitos prácticos requeridos por la Especificación ASTM. Debe haber dos superficies de apoyo de acero endurecido (ver Nota 1), una de las cuales es un bloque de elevación montado sobre una bola, generalmente en la superficie superior de la pieza de prueba, y la otra es un bloque sólido y plano en la parte superior del espécimen. La muestra permanecerá estacionaria. Las superficies de apoyo deben ser al menos tan grandes como la superficie de la muestra sobre la que se lleva la carga. Las superficies de apoyo, cuando son nuevas, no deben desviarse del nivel en más de 0,013 mm (0,0005 in) en ningún punto y deben permanecer dentro de la variación permitida de 0,02 mm (0,001 in). En un espaciador de bola, el diámetro de la bola no debe exceder el diámetro de la pieza de prueba y el centro de la bola debe coincidir con el centro de la superficie de apoyo. La parte móvil de este bloque debe estar fijada a la base esférica, pero debe diseñarse de manera que la superficie de apoyo pueda girar e inclinarse libremente en pequeños ángulos en cualquier dirección.



Ilustración 24. Instrumentos para llevar a cabo la compactación.

Fuente: Propia

Nota 2. Es deseable que las superficies de soporte de los bloques empleados para el ensayo de compresión de la BAEC tengan una dureza no menor de 60 HRC (Unidades de Dureza Rockwell con punta de diamante) (AASHTO T 80, ASTM E 18).

Los equipos y moldes de compactación, de acuerdo con los métodos (a) secado de mezclas de suelo – cemento compactadas para el Método A; o con el método (b) preparación en el laboratorio de pruebas de suelo - cemento para el Método B.

3.1.4.2.4.6 Compactación de los cilindros.

Para la compactación de los cilindros se utilizó un rotomartillo de marca Bosch GBH 11 Tipo de alimentación: con cable Potencia: 1500 W Energía de un impacto: 18 J N.º de impactos: 2250 min-1 Velocidad de giro ajustable: 3500 rpm Tipo de montaje: SDS-Max Posibilidad de cincelado: sí Diámetro máx. de perforación - hormigón: 52 mm Diámetro máx. de perforación - corona: 150 mm Motor sin escobillas: no Empuñadura adicional de taladro: no Sistema antivibración: sí Paquete: maletín de plástico Peso: 11 kg

Una vez preparada la mezcla, el cilindro se elabora compactándolo la mezcla de suelo cemento dentro del molde previamente engrasado en 4 capas y con un tiempo de compactación de 25 segundos por cada capa con el roto martillo Bosch GBH 11

Antes de colocar la capa siguiente es necesario escarificar la capa ya compactada para garantizar la adherencia entre capas y evitar planos de discontinuidad.



Ilustración 25.

Ensayo de compactación de la BAEC.

Fuente: Propia

Para garantizar que se requiere la relación de compresión en las muestras de prueba, se requiere una mezcla ideal de humedad, suelo y cemento (especificada por AASHTO T 134), esto se puede verificar tomando una muestra mixta antes de comenzar la compactación, para encontrar la humedad presente en la mezcla mediante secado en horno, aunque si se desean resultados inmediatos se puede realizar secado por calor directo (ASTM D 4959).

3.1.4.2.4.7 Curado de los especímenes.

Una vez realizadas las muestras, deben someterse a un proceso de curado para asegurar una adecuada hidratación del cemento en la mezcla suelo-cemento. Inicialmente se hizo en un molde en ambiente húmedo durante 12 horas, luego se desmoldó la muestra. Los moldes se pueden desmontar con una llave para aflojar las tuercas a las que se instaló el molde, una vez desmontado es importante no realizar movimientos bruscos y evitar colisiones por completo. Los envases de film y plástico estirable, una vez abiertos y empacados, deberán ser colocados en un cuarto húmedo, en un lugar seguro y protegido de cualquier interrupción hasta la fecha de la respectiva prueba.



Ilustración 26. Curado de los especímenes de diferentes edades y tamaños.

Fuente: Propia

3.1.4.2.5 Determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico.

El método de ultrasonido de ingeniería utilizado para cribar materiales es una técnica de cribado no destructivo (CND) y tiene una serie de aplicaciones, en particular para explorar el interior de los materiales o sus componentes. Depende de la ruta de propagación de la onda sonora, cuando se trata de señales de ondas sonoras, se conoce su comportamiento durante la propagación dentro del elemento y depende de la detención del objeto. Si se prueban los datos, esto permite evaluar esta discontinuidad en términos de su forma, tamaño y dirección, porque la discontinuidad se opone a la resistencia (llamada impedancia acústica) para la propagación de la onda.

El análisis de los materiales mediante pulso ultrasónico se basa en el principio físico: El movimiento de una onda acústica, se sabe que la onda acústica es afectada por el medio a través del cual viaja y se distinguen los siguientes tipos: onda longitudinal, transversal y superficial (Rayleigh), debido a ello ocurren los cambios asociados con el paso de una onda sonora de alta frecuencia a través de un material en uno o más de los cuatro parámetros siguientes: tiempo de tránsito, atenuación, reflexión y frecuencia.

Estos parámetros a menudo pueden estar correlacionados con los cambios de las propiedades físicas, dureza, módulo de elasticidad, densidad, homogeneidad, estructura.

La naturaleza del pulso ultrasónico es debido a que tienen frecuencias altas y longitudes de onda cortas, compatibles para el ensayo de los materiales, para inspeccionar el interior de las piezas que ofrecen una trayectoria continua a la propagación de las ondas sonoras. Para generar onda ultrasónica, se utiliza un transductor piezoeléctrico que convierte las señales eléctricas en señales sonoras, y viceversa. El transductor consta de un cristal piezoeléctrico (cuarzo) alojado en una carcasa impermeable, que facilita la conexión eléctrica del generador de impulsos o transceptor; En el modo de transferencia, se aplica un pulso de energía eléctrica de alto voltaje al cristal durante un tiempo breve, lo que hace que el cristal cambie rápidamente su geometría y se distorsione y emita un pulso

(onda) de energía acústica de alta frecuencia. En modo receptor, las ondas de ultrasonido o eco que regresan a través de la ruta del sonido, incluida la abrazadera de acoplamiento y parte de ella, comprimen el cristal y generan una señal eléctrica que se amplifica y procesa en el receptor.

Parámetros a considerar.

- **Velocidad**

La velocidad del sonido es a menudo el parámetro ultrasónico más fácil de medir, en un medio homogéneo está directamente relacionado con el módulo de elasticidad, la densidad del material, la relación de Poisson y el grado de homogeneidad. Dependiendo del tipo de ola, la velocidad también varía. La velocidad está relacionada con la distancia recorrida, el tiempo, la longitud de onda y la longitud de onda de la siguiente manera:

$$V = \frac{S}{t}$$

$$V = \lambda * f$$

Donde:

V= Velocidad

S= Distancia entre transductores

t= tiempo

λ = Longitud de onda

f = Frecuencia

La velocidad de las ondas también está influenciada por las propiedades de los materiales en el cual viajan. De lo mencionado el módulo de elasticidad está relacionado de la siguiente manera

$$E = \frac{V^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

Donde:

E= Modulo de elasticidad dinámico

V= Velocidad

ρ = Densidad

ν = Coeficiente de Poisson.

- **Atenuación.**

Es una disminución del nivel de la señal, a medida que pasa por un elemento; La intensidad de la energía aplicada disminuye con el grosor del material y se amortigua a diferentes velocidades según el material, y la amortiguación se debe a los efectos interactivos de la densidad, la dureza, la viscosidad y la textura. estructura molecular (G Aragón Torre – 2016)

- **Dispersión.**

Las ondas de sonido rebotan dependiendo del material que se esté probando. Los cambios varían según el enfoque, la estructura, la orientación de la fibra, la porosidad, el tamaño de las partículas y otros cambios estructurales sutiles que afectan la amplitud, la dirección y la frecuencia de la señal de onda. Los efectos de dispersión también se pueden observar indirectamente al observar cambios en la amplitud del eco o una señal de transmisión en vivo.

Frecuencia (el Espectro).

Todos los materiales tienden a actuar en cierta medida como filtro del paso de ondas, atenuando o dispersando. Las ondas de sonido vibran a una frecuencia específica, que es el número de oscilaciones o ciclos por segundo. El oído humano percibe un rango de frecuencias (20 Hz a 20 kHz),

mientras que la mayoría de las aplicaciones de ultrasonido usan frecuencias superiores a 20 kHz por segundo.

Equipo utilizado para el ensayo de pulso ultrasónico.

El dispositivo de prueba, que se muestra esquemáticamente en la ilustración 29, consta de un generador de impulsos, un par de sondas (transmisor y receptor), un amplificador, un circuito temporizador, una pantalla de tiempo y otros dispositivos y cable de conexión.

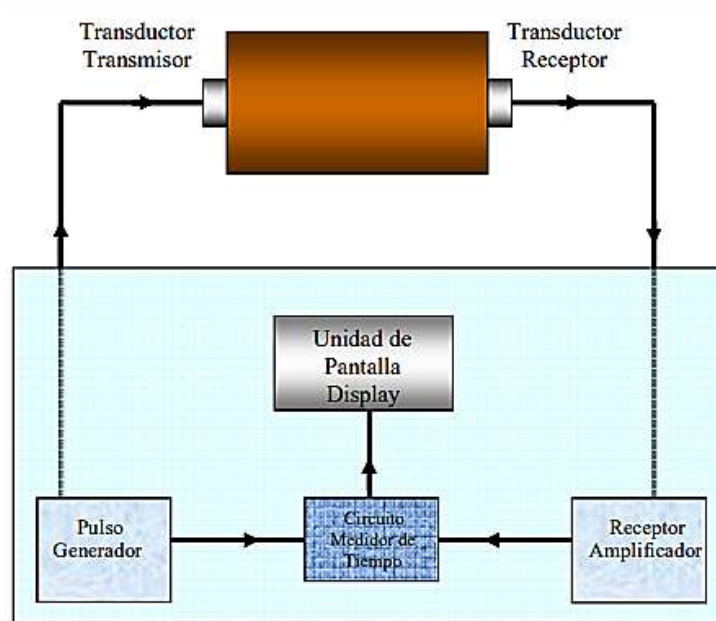


Ilustración 27. Funcionamiento del equipo de pulso ultrasónico.

Fuente: ASTM D597-02

- **Generador de Pulso y Transductor Transmisor:**

El generador de impulsos consta de circuitos para generar impulsos de tensión. El transductor tendría que convertir estos pulsos electrónicos en ondas de energía mecánica explosivas con una frecuencia de 54 kHz. El generador genera impulsos repetitivos a una velocidad de al menos 3 latidos por segundo. La sonda está hecha de piezoeléctrico, impedancia u otro material sensible al voltaje (sal de Rochelle, cuarzo, titanato de bario, titanato de zirconato (PZT) y sólido), aislado para protección. Se generará un pulso de energía para iniciar el circuito del temporizador.

- **Transductor Receptor y Amplificador:**

El transductor receptor será parecido con el transductor transmisor. El voltaje que genera este será amplificado tanto como sea necesario para producir pulsos disparados al circuito medidor de tiempo.

- **Circuito Medidor de Tiempo:**

La medición de temporización debe comenzar con un voltaje generado por el generador de impulsos y el circuito de temporización debe funcionar a la frecuencia del generador de impulsos. El circuito temporizador proporcionará una señal de salida cuando se detecte un pulso recibido y esta salida se utilizará para determinar el tiempo de transmisión reflejado en la pantalla.

- **Unidad de Pantalla:**

Se utilizaron dos tipos de unidades de visualización. Las unidades modernas utilizan un temporizador de intervalos y una pantalla digital que lee directamente el tiempo de tránsito. Los dispositivos más antiguos usaban un tubo de rayos catódicos (CRT) en el que los pulsos transmitidos y recibidos se mostraban como desviaciones de seguimiento de una escala de tiempo específica.

El equipo que se utilizó para el ensayo de pulso ultrasónico es el que se muestra en la fotografía siguiente ilustración 30.



Ilustración 28. *Equipo utilizado en el ensayo de pulso ultrasónico*

Fuente: Propia

Partes del equipo de pulso ultrasónico.

- Teclado para control del equipo e ingreso de datos.
- Pulso generador.
- Transductor emisor de ondas.
- Transductor receptor de ondas.
- Receptor amplificador de pulso.
- Pantalla de emisión de resultados de ensayos.

3.1.4.2.5.1 Ensayo de Pulso Ultrasónico.

Para este ensayo hace referencia a la norma ASTM D597-02 (Método de ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto).

Una vez los especímenes estén curado y cumplida la fecha para su rotura estos son transportado a un sitio donde no haya ruido y se practica el ensayo de pulso ultrasónico y el ensayo de resistencia a la compresión simple.

Para la utilización del equipo de pulso ultrasónico es necesario ingresar el peso volumétrico del espécimen a ser ensayado y la distancia entre transductores que será el alto del espécimen, se procedió a pesar cada uno de los especímenes y a medir sus dimensiones para calcular su volumen.



Ilustración 29. Dimensiones y pesos de los especímenes previo al ensayo de pulso ultrasónico.

Fuente: Propia

Una vez calibrado el aparato se procedió a ingresar el peso volumétrico de los especímenes de ensayo y a ingresar la distancia entre transductores. Se debe garantizar que los transductores tengan un buen acoplamiento sobre la superficie de los especímenes, un material viscoso (tal como aceite, vaselina, gelatina soluble en agua, hule moldeable, grasa o gel para peinar) puede asegurar eficiente transferencia de energía entre el espécimen y los transductores. La función del agente de acoplamiento es eliminar aire entre las superficies de contacto de los transductores y espécimen. Para el caso de la investigación el agente de acoplamiento utilizado fue gel ego darle mejor conductividad a la carga.

Para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico se lo realiza de esta manera:

$$V = \frac{m}{s}$$

$$\rho = \frac{\text{Masa en el Aire}}{\text{Masa en el Aire} - \text{Masa Sumergida}} = \frac{kg}{m^3}$$

$$E = \frac{V^2 \rho * \frac{MPa}{1000000 * \frac{kg}{m * s^2}} (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} = MPa$$

Donde:

V = Velocidad del pulso ultra sónico

ρ = Densidad o peso volumétrico

E = Módulo de elasticidad dinámico

ν = Módulo de elasticidad dinámico = 0,14 (Para suelos granular, Recomendado por Larsen T.J. Nussbaum M. y Collev B.E.)

Tabla 26. Resultados de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros de 150x300 mm.

CENTRO DE INNOVACION HOLCIM								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Laboratorista:		Jr. Antonio	Descripción: Ensayos de pulso ultrasónico en cilindros grandes de (150x300) mm					
Fecha de ensayo		19 de Julio del 2022						
N.º	Edad (días)	Cemento (%)	Propiedades Físicas			Pulso Ultrasónico		Módulo de Elasticidad
			Masa Aire (kg)	Masa sum. (kg)	Peso Vol. (kg/m ³)	Tiempo (Us)	Velocidad (m/s)	Dinámico (Mpa)
1	7	4,0	11,9	6,2	2092,1	124,0	2459	12073,4
2	7	4,0	11,9	6,2	2105,3	115,2	2641	14684,0
3	7	5,0	11,9	6,3	2118,6	103,2	2955	18500,1
4	7	5,0	11,9	6,3	2136,8	116,6	2701	15588,5
5	7	6,0	12,0	6,4	2150,5	110,6	2757	16346,3
6	7	6,0	11,9	6,4	2164,5	111,1	2688	15639,3
7	28	4,0	11,8	6,2	2100,8	110,1	2770	16119,5
8	28	4,0	11,8	6,2	2118,6	109,0	2780	16373,7
9	28	5,0	11,8	6,3	2127,7	98,7	3090	20315,1
10	28	5,0	11,8	6,3	2145,9	101,3	2901	18059,7
11	28	6,0	11,9	6,4	2164,5	105,7	2885	18015,6
12	28	6,0	11,9	6,4	2171,6	103,2	2812	17171,2
13	257	5,5	11,8	6,4	2174,4	124,0	2546	14094,6
14	257	5,5	11,8	6,4	2169,2	103,0	2904	18293,3
15	259	5,5	11,8	6,3	2145,9	107,0	2799	16812,0
16	259	5,5	11,85	6,4	2173,9	104,0	2791	16934,1

*Fuente: Propia***Tabla 27.** Resultados de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros de 100x200 mm.

CENTRO DE INNOVACION HOLCIM								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Laboratorista:		Jr. Antonio	Descripción: Ensayos de pulso ultrasónico en cilindros grandes de (100x200) mm					
Fecha de ensayo		19 de Julio del 2022						
N.º	Edad (Días)	Cemento (%)	Propiedades Físicas			Pulso Ultrasónico		Módulo de Elasticidad
			Masa (kg)	Masa sum. (kg)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Tiempo (Us)	Velocidad (m/s)	Dinámico (Mpa)
1	7	4,0	3,9	2,0	2094,2	75,2	2870	16463,8
2	7	4,0	3,9	2,0	2107,5	78,0	2645	14071,9
3	7	5,0	3,9	2,0	2120,9	73,3	2804	15915,2
4	7	5,0	3,9	2,1	2139,0	74,0	2795	15948,5
5	7	6,0	3,9	2,1	2152,9	74,1	2736	15381,0
6	7	6,0	3,9	2,1	2166,8	73,1	2722	15323,0
7	28	4,0	3,8	2,0	2103,0	77,2	2755	15234,6
8	28	4,0	3,7	2,0	2120,9	80,4	2798	15847,2
9	28	5,0	3,8	2,0	2150,5	72,5	2827	16403,5
10	28	5,0	3,8	2,0	2148,2	84,2	2444	12246,8
11	28	6,0	3,8	2,1	2166,8	72,9	2812	16353,0

12	28	6,0	3,9	2,1	2171,8	83,8	2456	12503,0
13	257	5,5	3,8	2,0	2176,3	77,4	2647	14553,3
14	257	5,5	3,8	2,0	2171,6	74,7	2814	16411,8
15	259	5,5	3,7	2,0	2166,8	75,6	2845	16739,1
16	259	5,5	3,8	2,0	2150,5	81,5	2645	14359,4

Fuente: Propia

Tabla 28. Resultados de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros de 100x115 mm

CENTRO DE INNOVACION HOLCIM								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Laboratorista:		Jr. Antonio	Descripción: Ensayos de Pulso ultrasónico en cilindros grandes de (100x115) mm					
Fecha de ensayo		19 de Julio del 2022						
N.º	Edad (Días)	Cemento (%)	Propiedades Físicas			Pulso Ultrasónico		Módulo de Elasticidad
			Masa (kg)	Masa sum. (kg)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Tiempo (Us)	Velocidad (m/s)	Dinámico (Mpa)
1	7	4,0	2,1	1,1	2093,4	49,0	2583	13330,1
2	7	4,0	2,1	1,1	2106,6	45,9	2648	14097,9
3	7	5,0	2,1	1,1	2120,0	40,2	2791	15761,3
4	7	5,0	2,1	1,1	2138,1	44,4	2814	16159,2
5	7	6,0	2,1	1,1	2151,9	47,0	2601	13894,6
6	7	6,0	2,2	1,2	2165,9	47,1	2544	13378,7
7	28	4,0	2,0	1,0	2102,2	47,1	2961	17590,7
8	28	4,0	2,0	1,1	2120,0	49,5	2654	14252,0
9	28	5,0	2,0	1,1	2141,3	42,3	2981	18161,3
10	28	5,0	2,0	1,1	2147,3	41,5	2741	15397,5
11	28	6,0	2,1	1,1	2165,9	39,0	2926	17698,1
12	28	6,0	2,1	1,1	2171,7	41,5	2757	15754,7
13	257	5,5	2,0	1,1	2175,3	38,2	3036	19136,7
14	257	5,5	2,0	1,1	2170,6	39,0	2879	17171,3
15	259	5,5	2,0	1,1	2143,6	37,1	2948	17780,4
16	259	5,5	2,0	1,1	2148,2	36,8	3074	19374,3

Fuente: Propia

3.1.4.2.6 Determinación de la resistencia a la compresión simple.

Las pruebas de esfuerzo simples determinan el comportamiento de un material sometido a un esfuerzo de presión incrementado, realizado por una máquina adecuada, hasta que el material se rompe. La resistencia a la compresión se mide probando muestras cilíndricas en un probador de presión, y la resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de tracción dividida por el área de la sección transversal del rodamiento y expresada en (kgf/cm² o psi).

Las pruebas de resistencia a la compresión simple se usan principalmente en la determinar que la mezcla de suelo cemento se encuentre dentro con las especificaciones de resistencia recomendadas por nuestro país.

Los requerimientos para la resistencia a la compresión simple en suelo cemento pueden cambiar, en nuestro país se requiere resistencias superiores a las presentadas anteriormente.

El ensayo de compresión simple se desarrollará conforme a la Norma ASTM D 1633 (Métodos de ensayo Estándar para Esfuerzos de Compresión de Cilindros compactados de Suelo-cemento). Esta norma utiliza dos procedimientos para el ensayo de los cuales utilizaremos el método A que corresponde a el procedimiento que usa para el ensayo de especímenes de 4.0 pulgadas. (100 mm) en diámetro y 4.584 pulgadas. (115 mm) en altura, también se usaron cilindros de (150x200) mm y (100x200) mm.

3.1.4.2.6.1 Realización de ensayo de resistencia a compresión.

Luego de la realización del ensayo de pulso ultrasónico los especímenes fueron colocados cuidadosamente a en un lugar seguro, esto con el objeto de cuidar las buenas condiciones de los especímenes.



Ilustración 30.



Ensayo de resistencia a la compresión simple.



Fuente: Propia

3.1.4.2.6.2 Máquina de ensayo a compresión:

Esta máquina puede ser de cualquier tipo que tenga la capacidad suficiente y que se pueda controlar para proporcionar la razón de carga prescrita en la norma utilizada (ASTM D 1633), La razón de carga aplicada debe de oscilar entre el rango de 20 +/-10 psi (140 +/-70 kPa) /s.

Gracias a las Instalaciones de Holcim quien nos brindó usar su máquina de compresión Servo Plus Evolution, con capacidad de carga hasta 2000kN, equipo de ensayos de compresión simple para hormigones y bases estabilizadas.

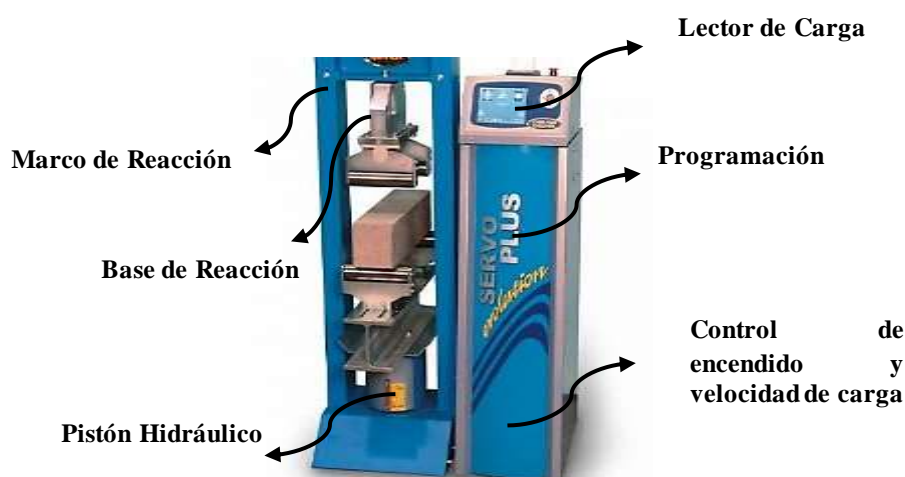


Ilustración 31. Máquina de ensayo a compresión, Servo Plus.

Fuente: (Jet Materials» Concrete Flexural Machine 150 Kn Motorized, Servo-plus Evolution, 2018)

Fue necesario utilizar almohadillas de neopreno del más suave a los especímenes para el cabeceo, debido a que los esfuerzos que soporta la BAEC son inferiores a 106 kg/cm² (ASTM C 1231)

Los especímenes fueron colocados en la máquina de compresión y se obtuvo la carga de falla, esta carga al ser dividida por el área transversal proporciona el esfuerzo de compresión que soporta dicho espécimen

Después de la elaboración de los ensayos de compresión se pudo observar que tipo de falla fue producida, ya que estos tipos de hormigones son de bajas cargas, es muy importante tener una superficie plenamente plana.



Ilustración 32. Fotografías de cilindros de base estabilizada con cemento tipo GU después resistir su máxima carga.

Fuente: Propia

Tabla 29. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión simple en cilindros de 150x300 mm

CENTRO DE INNOVACION HOLCIM								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Laboratorista:		Jr. Antonio	Descripción: Ensayos resistencia a la compresión simple en cilindros grandes de (150x300)mm					
Fecha de ensayo		19 de Julio del 2022						
N.º	Edad (días)	Cemento (%)	Dimensiones			Compresión Simple		
			Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (mm ³)	Carga Máx. (kN)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)
1	7	4,0	150	300	5,30E+06	31,0	1,8	17,9
2	7	4,0	150	300	5,30E+06	35,7	2,0	20,6
3	7	5,0	150	300	5,30E+06	45,0	2,5	26,0
4	7	5,0	150	300	5,30E+06	51,2	2,9	29,6
5	7	6,0	150	300	5,30E+06	40,1	2,3	23,1
6	7	6,0	150	300	5,30E+06	46,5	2,6	26,8
7	28	4,0	150	300	5,30E+06	32,1	1,8	18,5
8	28	4,0	150	300	5,30E+06	36,4	2,1	21,0
9	28	5,0	150	300	5,30E+06	50,8	2,9	29,3
10	28	5,0	150	300	5,30E+06	57,4	3,2	33,1
11	28	6,0	150	300	5,30E+06	50,3	2,8	29,0
12	28	6,0	150	300	5,30E+06	56,2	3,2	32,4
13	257	5,5	150	300	5,30E+06	55,5	3,1	32,0
14	257	5,5	150	300	5,30E+06	65,2	3,7	37,6
15	259	5,5	150	300	5,30E+06	58,0	3,3	33,5
16	259	5,5	150	300	5,30E+06	63,1	3,6	36,4

Fuente: Propia

Tabla 30. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión simple en cilindros de 100x200 mm

CENTRO DE INNOVACION HOLCIM								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Laboratorista:		Jr. Antonio	Descripción: Ensayos resistencia a la compresión simple en cilindros grandes de (100x200) mm					
Fecha de ensayo		19 de Julio del 2022						
N.º	Edad (Días)	Cemento (%)	Dimensiones			Compresión Simple		
			Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (mm ³)	Carga Máx. (kN)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)
1	7	4,0	100	200	1,57E+06	29,4	3,7	38,2
2	7	4,0	100	200	1,57E+06	30,9	2,8	40,1
3	7	5,0	100	200	1,57E+06	32,0	4,1	41,6
4	7	5,0	100	200	1,57E+06	32,4	4,1	42,1
5	7	6,0	100	200	1,57E+06	33,3	4,2	43,2
6	7	6,0	100	200	1,57E+06	34,2	4,4	44,4
7	28	4,0	100	200	1,57E+06	39,0	5,0	50,6
8	28	4,0	100	200	1,57E+06	36,3	4,2	47,1
9	28	5,0	100	200	1,57E+06	54,4	7,4	70,7
10	28	5,0	100	200	1,57E+06	52,5	6,2	68,2
11	28	6,0	100	200	1,57E+06	55,8	7,4	72,5
12	28	6,0	100	200	1,57E+06	53,1	6,3	69,0
13	257	5,5	100	200	1,57E+06	48,2	6,1	62,5
14	257	5,5	100	200	1,57E+06	48,6	5,7	63,0
15	259	5,5	100	200	1,57E+06	56,9	7,2	73,9
16	259	5,5	100	200	1,57E+06	66,0	8,4	85,7

Fuente: Propia

Tabla 31. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión simple en cilindros de 100x115 mm

CENTRO DE INNOVACION HOLCIM								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Laboratorista:		Junior Antonio Zambrano	Descripción: Ensayos resistencia a la compresión simple en cilindros grandes de (100x115) mm					
Fecha de ensayo		19 de Julio del 2022						
N.º	Edad (Días)	Cemento (%)	Dimensiones			Compresión Simple		
			Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (mm ³)	Carga Máx. (kN)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)
1	7	4,0	100	115	9,03E+05	15,0	1,6	19,4
2	7	4,0	100	115	9,03E+05	13,7	1,5	17,8
3	7	5,0	100	115	9,03E+05	28,5	3,2	37,1
4	7	5,0	100	115	9,03E+05	28,8	3,2	37,5
5	7	6,0	100	115	9,03E+05	29,2	3,3	37,9
6	7	6,0	100	115	9,03E+05	27,9	2,8	36,2
7	28	4,0	100	115	9,03E+05	28,8	3,2	37,4
8	28	4,0	100	115	9,03E+05	31,6	3,5	41,1

9	28	5,0	100	115	9,03E+05	36,0	4,0	46,7
10	28	5,0	100	115	9,03E+05	40,8	4,6	52,9
11	28	6,0	100	115	9,03E+05	42,4	4,8	55,0
12	28	6,0	100	115	9,03E+05	39,5	4,4	51,3
13	257	5,5	100	115	9,03E+05	49,6	5,6	64,4
14	257	5,5	100	115	9,03E+05	47,9	5,1	62,2
15	259	5,5	100	115	9,03E+05	47,5	3,5	61,7
16	259	5,5	100	115	9,03E+05	44,1	5,0	57,2

Fuente: Propia

3.1.4.2.7 Determinación del Módulo de Elasticidad Estático.

El módulo de elasticidad estático del hormigón se determina mediante un ensayo de presión estándar especificado en "ASTM C469", preparando muestras cilíndricas con un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm, y sometidas a cargas axiales ascendentes. Columnas de hormigón dañadas. Las deformaciones longitudinales y transversales se miden continuamente mientras se aplican cargas crecientes. Esta unidad describe la dureza relativa de un material. Se mide en el laboratorio y se determina por la pendiente de la región elástica de la curva tensión/deformación.

En un ambiente isotrópico sujeto a cargas axiales, el módulo de Young o elasticidad estática se puede calcular dividiendo el esfuerzo por la unidad de elongación de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F * L_o}{A_o * \delta L}$$

A continuación, se sintetizan los criterios a través de conceptos e hipótesis actualmente aceptados para determinar el valor que caracterice la resistencia de un hormigón en compresión.

Una vez que haya determinado el tipo de muestra que se utilizará para las pruebas; Estandarización de todo el proceso, desde el muestreo hasta la prueba; Etc. Se ensayaron las muestras de sustrato estabilizado de cemento GU y se obtuvieron los resultados correspondientes. En un ambiente isotrópico sujeto a cargas axiales, el módulo de Young o elasticidad estática se puede calcular dividiendo el esfuerzo por la unidad de elongación de la siguiente manera:

Generalmente, se trata de definir un valor de la resistencia, establecido con determinados conceptos, y que representaran a continuación de la base estabilizada (que tiene, como vimos, valores diferentes de resultados de los ensayos). El criterio que se adopta es aceptar los conceptos establecidos en Estadística y Teoría de las Probabilidades

Dado un conjunto de datos, queremos representar la diversidad de observaciones de forma numérica. No es fácil entender el resultado de los datos en la lista de números no estructurados; Hay varias formas de organizar, representar y reducir datos para facilitar la evaluación e interpretación de datos.

El número más simple y útil asociado con un conjunto de datos es el valor promedio o la media aritmética, según criterios clásicos. Veremos que este valor no es representativo de la resistencia del hormigón, según los conceptos actualmente aceptados de seguridad.

3.1.4.2.7.1 Realización de ensayo del Módulo de Elasticidad Estático.

Una vez realización del ensayo de pulso ultrasónico y de resistencia a la compresión de los especímenes, varios cilindros selectos de 150x300 mm son colocados cuidadosamente a en un lugar seguro para colocar el equipamiento de expansómetro y compresómetro (Instrumento de medición). Esto con el objeto de cuidar las buenas condiciones de los especímenes.

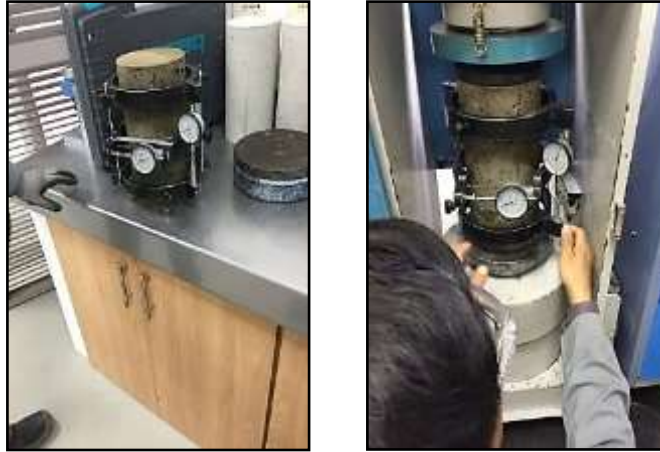


Ilustración 33. *Fotografías de un cilindro de 150x300 mm calibrado para su respectivo ensayo de Módulo de Elasticidad.*

Fuente: Propia

3.1.4.2.7.2 Máquina de ensayo a compresión:

La máquina tiene que tener capacidad suficiente y que se pueda controlar para proporcionar la razón de carga prescrita en la norma utilizada (ASTM D 1633), La razón de carga aplicada debe de oscilar entre el rango de 20 +/-10 psi (140 +/-70 kPa) /s, también tiene que tener un aumento de carga lento para poder medir su deformación exactitud.

Para este caso se usó una máquina de compresión hidráulica manual, gracias a las Instalaciones de Holcim quien nos la brindó usar, con capacidad de carga hasta 1500kN, equipo de ensayos de compresión simple para hormigones y bases estabilizadas.

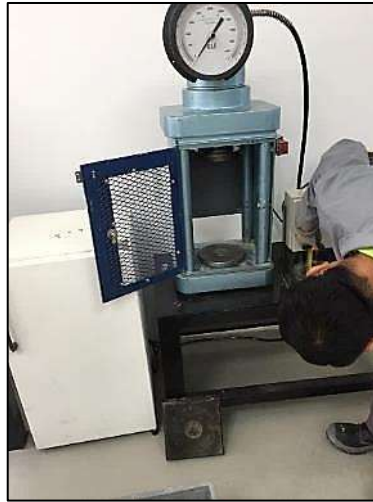


Ilustración 34. *Máquina de ensayo a compresión, Servo Plus.*

Fuente: *Propia*

En este caso no fue necesario utilizar almohadillas de neopreno en las caras de los especímenes para el cabeceo, debido a que las deformaciones de estos interfieren en la deformación real de los cilindros.

Los especímenes fueron colocados en la máquina de compresión manual y se aplicó carga hasta su falla, esta carga al ser dividida por el área transversal proporciona el esfuerzo de compresión que soporta dicho espécimen, también se pudo obtener medición de aplastamiento, esta lectura es dividida por la distancia calibrada y se obtiene la deformación en mm/mm

Tabla 32. Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 4 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad

CENTRO DE INNOVACIÓN HOLCIM ECUADOR							
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil							
Fecha de ensayo		19/7/2022		Fecha de moldeo		12/7/2022	
Descripción: Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 4 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad							
Diámetro =		150,00	mm	Altura =		300,00	mm
Área =		17671,46	mm ²	Volumen =		5301437,60	mm ³
Longitud Calibrada =		300000	mm	Carga Máxima =		30,97	kN
							Límite Elástico de Carga (kN) 40%
							12,39
Carga (kN)	Longitudinal (mm x 10 ³)	Transversal (mm x 10 ³)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Deformación Unitaria (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia Acum. (%)
0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00000		0
2,5	15,0	2,0	0,141	1,44	0,00005	2829	8
5,0	29,0	4,0	0,283	2,89	0,00010	2927	16
7,5	44,0	6,0	0,424	4,33	0,00015	2894	24
10,0	59,0	8,0	0,566	5,77	0,00020	2877	32
12,5	112,0	12,0	0,707	7,21	0,00037	1895	40
15,0	214,0	20,0	0,849	8,66	0,00071	1190	48
17,5	458,0	40,0	0,990	10,10	0,00153	649	57
20,0	714,0	80,0	1,132	11,54	0,00238	476	65
22,5	956,0	145,0	1,273	12,98	0,00319	400	73
25,0	1245,0	214,0	1,415	14,43	0,00415	341	81
27,5	1647,0	389,0	1,556	15,87	0,00549	283	89
30,9	2145,0	555,0	1,753	17,87	0,00715	245	100
Carga Máx.			Resistencia Máx.				
Análisis Gráfico							
ε elástico =					0,0002		
ε rotura =					0,0072		
Ductilidad =					36,4		

Fuente: Propia

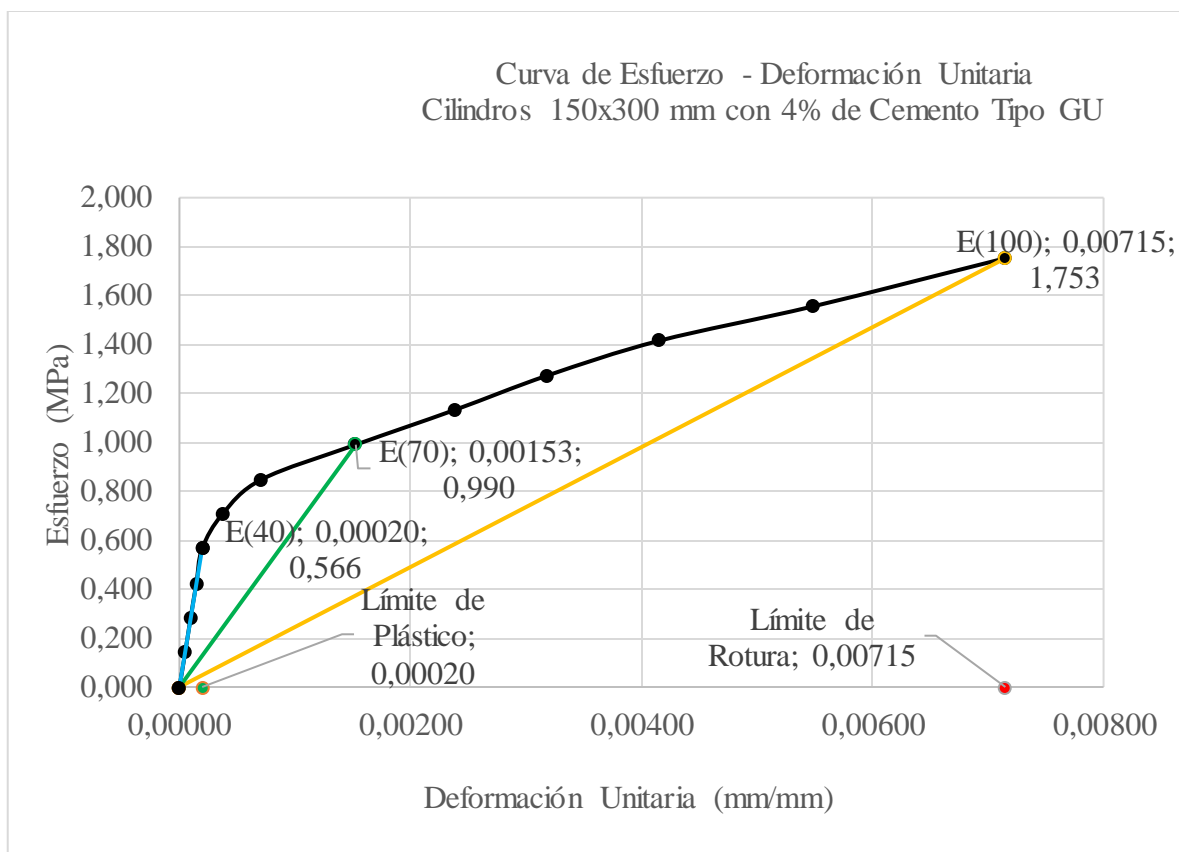


Ilustración 35. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 4% de Cemento Tipo GU con 7 Días.

Fuente: Propia

Tabla 33. Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad

CENTRO DE INNOVACIÓN HOLCIM ECUADOR							
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil							
Fecha de ensayo		19/7/2022		Fecha de moldeo		12/7/2022	
Descripción: Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad							
Diámetro =		150,00	mm	Altura =		300,00	mm
Área =		17671,46	mm ²	Volumen =		5301437,60	mm ³
Longitud Calibrada =		300000	mm	Carga Máxima =		45,03	kN
							Límite Elástico de Carga (kN) 40%
							18,0104
Carga (kN)	Longitudinal (mm x 10 ³)	Transversal (mm x 10 ³)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Deformación Unitaria (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia Acum. (%)
0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00000		0
5,0	38,0	2,0	0,283	2,89	0,00013	2234	11
10,0	93,0	4,0	0,566	5,77	0,00031	1825	22
15,0	140,0	6,0	0,849	8,66	0,00047	1819	33
20,0	184,0	9,0	1,132	11,54	0,00061	1845	44
25,0	242,0	13,0	1,415	14,43	0,00081	1754	56
30,0	356,0	24,0	1,698	17,31	0,00119	1431	67
35,0	641,0	51,0	1,981	20,20	0,00214	927	78
40,0	1436,0	86,0	2,264	23,08	0,00479	473	89
45,0	2245,0	587,0	2,548	25,98	0,00748	340	100
Carga Máx.			Resistencia Máx.				
Análisis Gráfico							
ϵ elástico =					0,00061		
ϵ rotura =					0,00748		
Ductilidad =					12,2		

Fuente: Propia

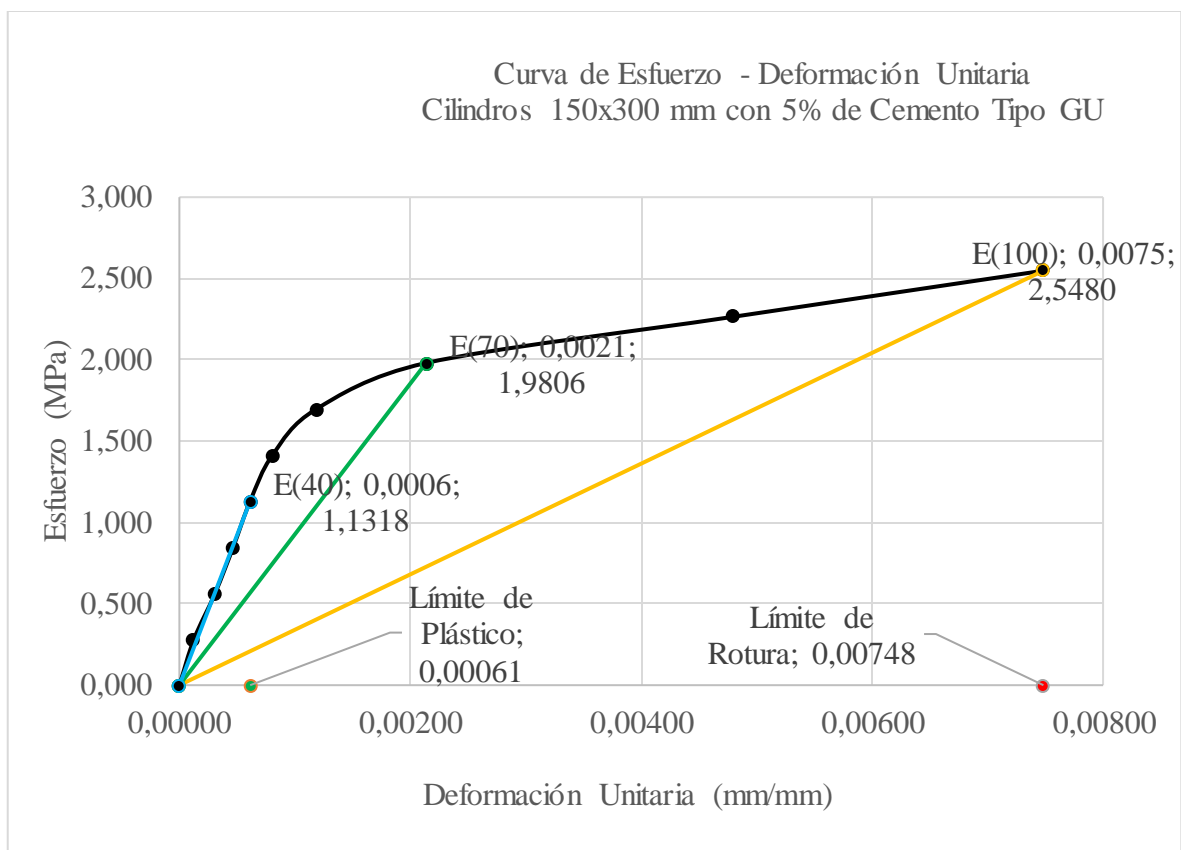


Ilustración 36. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 5% de Cemento Tipo GU con 7 Días.

Fuente: Propia

Tabla 34. Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 6 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad

CENTRO DE INNOVACIÓN HOLCIM ECUADOR							
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil							
Fecha de ensayo		19/7/2022		Fecha de moldeo		12/7/2022	
Descripción: Ensayo de módulo de elasticidad estáticos en cilindros 150x300 mm con 6 % de cemento Holcim GU con 7 Días de Edad							
Diámetro =		150,00	mm	Altura =		300,00	mm
Área =		17671,46	mm ²	Volumen =		5301437,60	mm ³
Longitud Calibrada =		300000	mm	Carga Máxima =		40,08	kN
							Límite Elástico de Carga (kN) 40%
							16,03
Carga (kN)	Longitudinal (mm x 10 ³)	Transversal (mm x 10 ³)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Deformación Unitaria (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia Acum. (%)
0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00000		0
5,0	23,0	2,0	0,283	2,89	0,00008	3691	12
10,0	44,0	4,0	0,566	5,77	0,00015	3858	25
15,0	75,0	6,0	0,849	8,66	0,00025	3395	37
20,0	211,0	9,0	1,132	11,54	0,00070	1609	50
25,0	489,0	16,0	1,415	14,43	0,00163	868	62
30,0	856,0	28,0	1,698	17,31	0,00285	595	75
35,0	1458,0	57,0	1,981	20,20	0,00486	408	87
40,1	2214,0	514,0	2,268	23,13	0,00738	307	100
Carga Máx.			Resistencia Máx.				
Análisis Gráfico							
ε elástico =					0,00025		
ε rotura =					0,00738		
Ductilidad =					29,5		

Fuente: Propia

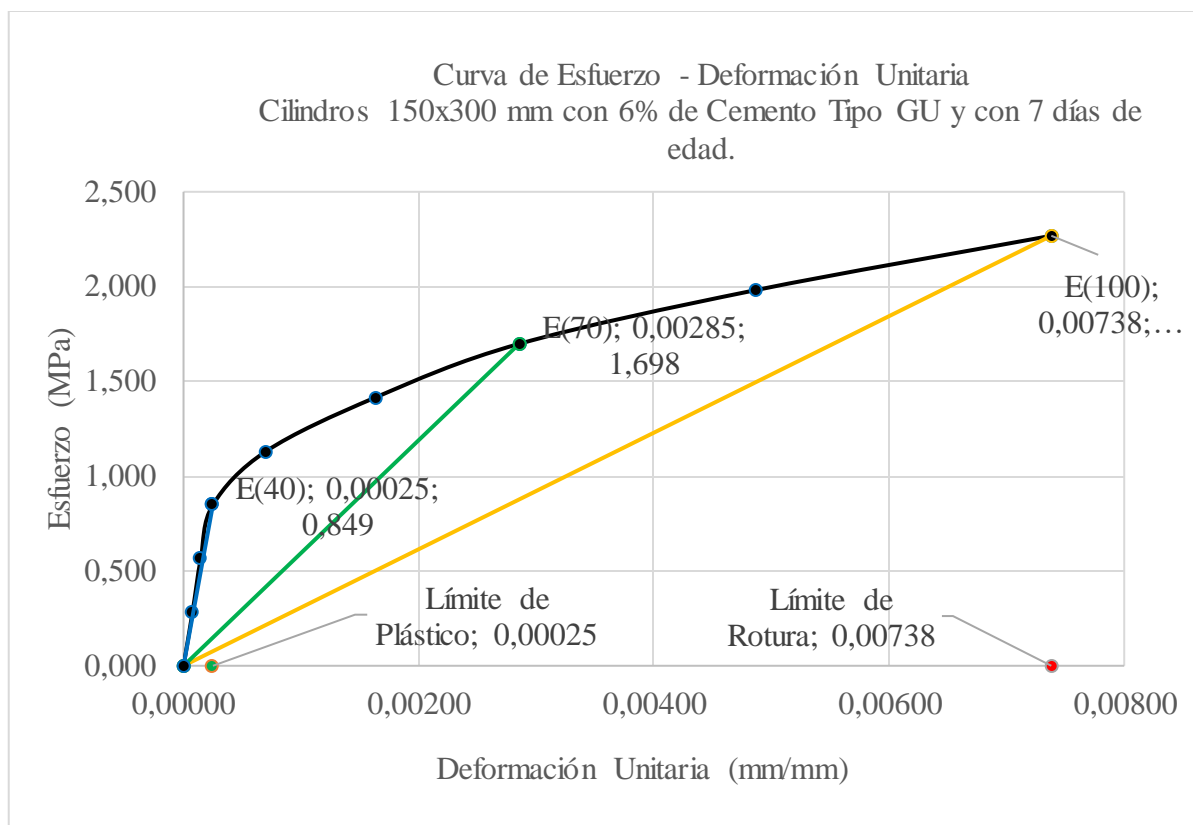


Ilustración 37. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 6% de Cemento Tipo GU con 7 días.

Fuente: Propia

Tabla 35. Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 4 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad

CENTRO DE INNOVACIÓN HOLCIM ECUADOR							
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil							
Fecha de ensayo		19/7/2022		Fecha de moldeo		30/5/2022	
Descripción: Ensayo de módulo de elasticidad estáticos en cilindros 150x300 mm con 4 % de cemento Holcim GU con más 28 Días de Edad							
Diámetro =		150,00	mm	Altura =		300,00	mm
Área =		17671,46	mm ²	Volumen =		5301437,60	mm ³
Longitud Calibrada =		300000	mm	Carga Máxima =		32,13	kN
							Límite Elástico de Carga (kN) 40%
							12,85
Carga (kN)	Longitudinal (mm x 10 ³)	Transversal (mm x 10 ³)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Deformación Unitaria (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia Acum. (%)
0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00000		0
2,5	13,0	2,0	0,141	1,44	0,00004	3265	8
5,0	20,0	4,0	0,283	2,89	0,00007	4244	16
7,5	32,0	6,0	0,424	4,33	0,00011	3979	23
10,0	41,0	9,0	0,566	5,77	0,00014	4141	31
12,5	55,0	15,0	0,707	7,21	0,00018	3858	39
15,0	78,0	27,0	0,849	8,66	0,00026	3265	47
17,5	124,0	56,0	0,990	10,10	0,00041	2396	54
20,0	235,0	89,0	1,132	11,54	0,00078	1445	62
22,5	367,0	124,0	1,273	12,98	0,00122	1041	70
25,0	589,0	198,0	1,415	14,43	0,00196	721	78
27,5	914,0	274,0	1,556	15,87	0,00305	511	86
30,0	1345,0	346,0	1,698	17,31	0,00448	379	93
32,1	1987,0	501,0	1,818	18,54	0,00662	275	100
Carga Máx.			Resistencia Máx.				
Análisis Gráfico							
ϵ elástico =					0,00018		
ϵ rotura =					0,00662		
Ductilidad =					36,7		

Fuente: Propia

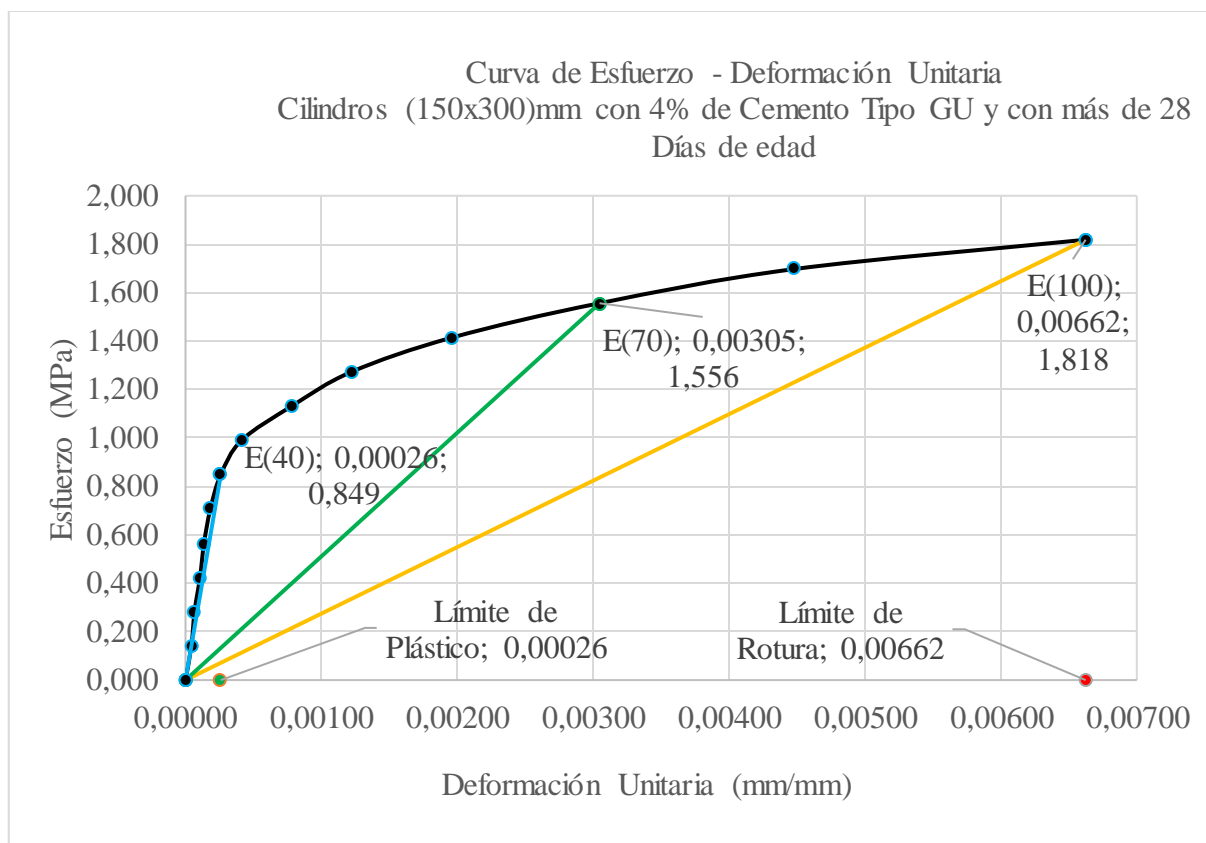


Ilustración 38. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 4% de Cemento Tipo GU con más de 28 días.

Fuente: Propia

Tabla 36. Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5 % de cemento Holcim GU con más de 28 días de Edad

CENTRO DE INNOVACIÓN HOLCIM ECUADOR								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Fecha de ensayo		19/7/2022		Fecha de moldeo		30/5/2022		
Descripción: Ensayo de módulo de elasticidad estáticos en cilindros 150x300 mm con 5 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad								
Diámetro =		150,00	mm	Altura =		300,00	mm	Límite Elástico de Carga (kN) 40%
Área =		17671,46	mm ²	Volumen =		5301437,60	mm ³	
Longitud Calibrada =		300000	mm	Carga Máxima =		50,80	kN	20,32
Carga (kN)	Longitudinal (mm x 10 ³)	Transversal (mm x 10 ³)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Deformación Unitaria (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia Acum. (%)	
0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00000		0	
5,0	15,0	2,0	0,283	2,89	0,00005	5659	10	
10,0	29,0	4,0	0,566	5,77	0,00010	5854	20	
15,0	43,0	6,0	0,849	8,66	0,00014	5922	30	
20,0	55,0	9,0	1,132	11,54	0,00018	6173	39	
25,0	78,0	14,0	1,415	14,43	0,00026	5441	49	
30,0	145,0	25,0	1,698	17,31	0,00048	3512	59	
35,0	248,0	55,0	1,981	20,20	0,00083	2396	69	
40,0	547,0	174,0	2,264	23,08	0,00182	1241	79	
45,0	1245,0	347,0	2,546	25,97	0,00415	614	89	
50,8	2214,0	645,0	2,875	29,31	0,00738	390	100	
Carga Máx.			Resistencia Máx.					
Análisis Gráfico								
ϵ elástico =					0,00018			
ϵ rotura =					0,00738			
Ductilidad =					41,0			

Fuente: Propia

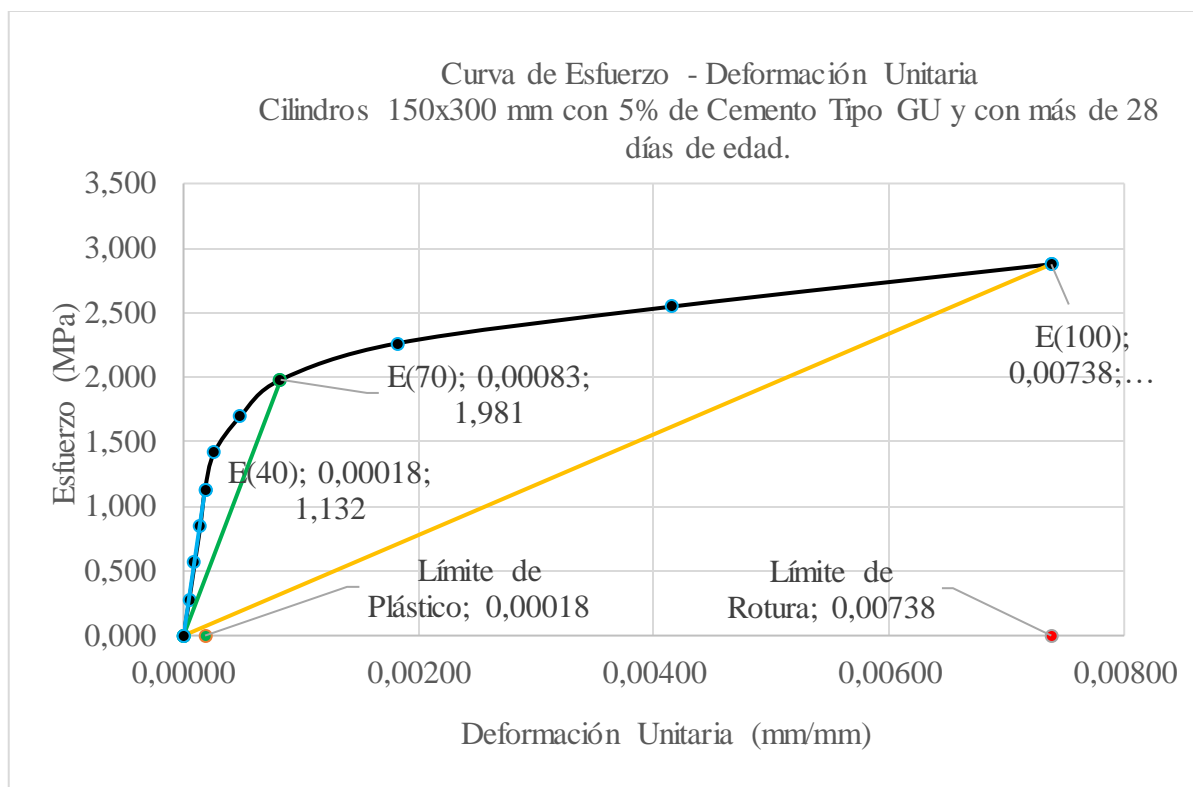


Ilustración 39. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 5% de Cemento Tipo GU con más de 28 días.

Fuente: Propia

Tabla 37. Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 6 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad

CENTRO DE INNOVACIÓN HOLCIM ECUADOR								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Fecha de ensayo		19/7/2022		Fecha de moldeo		30/5/2022		
Descripción: Ensayo de módulo de elasticidad estáticos en cilindros 150x300 mm con 6 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad								
Diámetro =		150,00	mm	Altura =		300,00	mm	Límite Elástico de Carga (kN) 40%
Área =		17671,46	mm ²	Volumen =		5301437,60	mm ³	
Longitud Calibrada =		300000	mm	Carga Máxima =		50,29	kN	20,11
Carga (kN)	Longitudinal (mm x 10 ³)	Transversal (mm x 10 ³)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Deformación Unitaria (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (Mpa)	Resistencia Acum. (%)	
0,00	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00000		0	
5,0	15,0	2,0	0,283	2,89	0,00005	5659	10	
10,0	20,0	4,0	0,566	5,77	0,00007	8488	20	
15,0	30,0	6,0	0,849	8,66	0,00010	8488	30	
20,0	45,0	8,0	1,132	11,54	0,00015	7545	40	
25,0	80,0	12,0	1,415	14,43	0,00027	5305	50	
30,0	160,0	25,0	1,698	17,31	0,00053	3183	60	
35,0	280,0	60,0	1,981	20,20	0,00093	2122	70	
40,0	564,0	180,0	2,264	23,08	0,00188	1204	80	
45,0	1347,0	350,0	2,546	25,97	0,00449	567	89	
50,3	2368,0	650,0	2,846	29,02	0,00789	361	100	
Carga Máx.			Resistencia Máx.					
Análisis Gráfico								
ϵ elástico =					0,00015			
ϵ rotura =					0,00789			
Ductilidad =					52,6			

Fuente: Propia

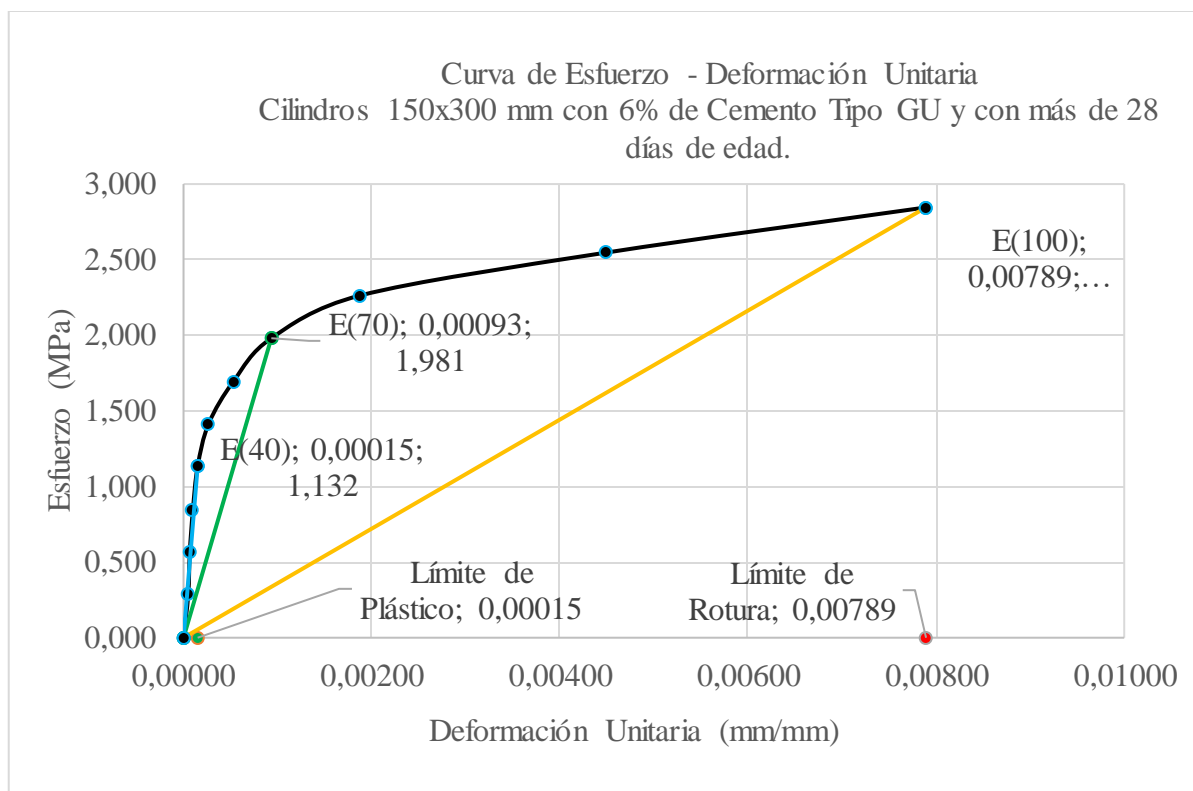


Ilustración 40. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 6% de Cemento Tipo GU con más de 28 días.

Fuente: Propia

Tabla 38. Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5.5 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad

CENTRO DE INNOVACIÓN HOLCIM ECUADOR								
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil								
Fecha de ensayo		19/7/2022		Fecha de moldeo		20/11/2021		
Descripción: Ensayo de módulo de elasticidad estáticos en cilindros 150x300 mm con 5,5 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad								
Diámetro =		150,00	mm	Altura =		300,00	mm	Límite Elástico de Carga (kN) 40%
Área =		17671,46	mm ²	Volumen =		5301437,60	mm ³	
Longitud Calibrada =		300000	mm	Carga Máxima =		55,50	kN	22,20
Carga (kN)	Longitudinal (mm x 10 ³)	Transversal (mm x 10 ³)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Deformación Unitaria (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia Acum. (%)	
0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00000		0	
5,0	15,0	2,0	0,283	2,89	0,00005	5659	9	
10,0	26,0	4,0	0,566	5,77	0,00009	6529	18	
15,0	35,0	6,0	0,849	8,66	0,00012	7276	27	
20,0	45,0	9,0	1,132	11,54	0,00015	7545	36	
25,0	76,0	13,0	1,415	14,43	0,00025	5584	45	
30,0	138,0	23,0	1,698	17,31	0,00046	3691	54	
35,0	248,0	54,0	1,981	20,20	0,00083	2396	63	
40,0	511,0	170,0	2,264	23,08	0,00170	1329	72	
45,0	845,0	245,0	2,546	25,97	0,00282	904	81	
50,0	1345,0	355,0	2,829	28,85	0,00448	631	90	
55,5	2451,0	596,0	3,141	32,03	0,00817	384	100	
Carga Máx.			Resistencia Máx.					
Análisis Gráfico								
ϵ elástico =					0,00020			
ϵ rotura =					0,00817			
Ductilidad =					40,8			

Fuente: Propia

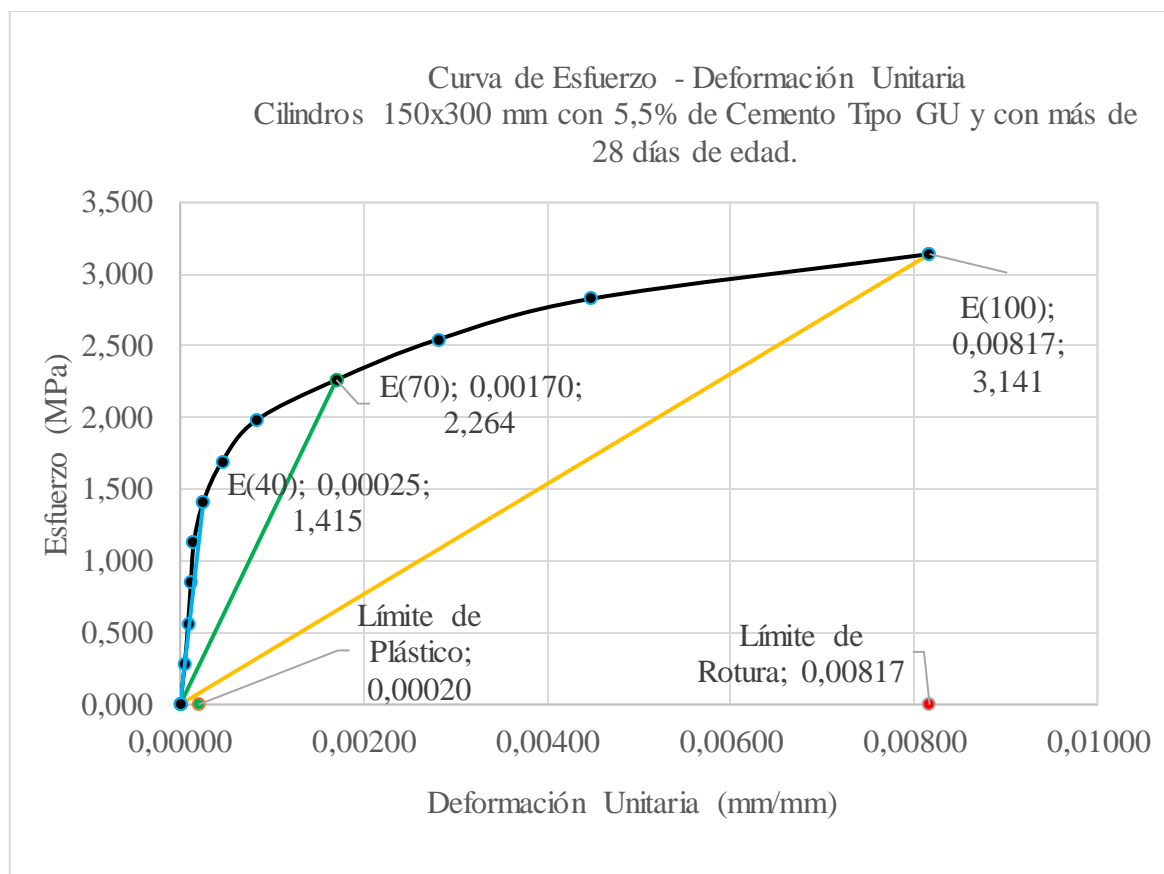


Ilustración 41. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 5.5 % de Cemento Tipo GU con más de 28 días.

Fuente: Propia

Tabla 39. Ensayo de módulo de elasticidad estático en cilindros 150x300 mm con 5.5 % de cemento Holcim GU con más de 28 Días de Edad

CENTRO DE INNOVACIÓN HOLCIM ECUADOR							
Av. Barcelona y Calle José Rodríguez Bonin, Telf. 3709000, Guayaquil							
Fecha de ensayo		19/7/2022		Fecha de moldeo		22/11/2021	
Descripción: Ensayo de módulo de elasticidad estáticos en cilindros 150x300 con 5,5 % de cemento Holcim GU con 28 Días de Edad							
Diámetro =		150,00	mm	Altura =		300,00	mm
Área =		17671,46	mm ²	Volumen =		5301437,60	mm ³
Longitud Calibrada =		300000	mm	Carga Máxima =		65,15	kN
							Límite Elástico de Carga (kN) 40%
							26,0608
Carga (kN)	Longitudinal (mm x 10 ³)	Transversal (mm x 10 ³)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Deformación Unitaria (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia Acum. (%)
0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00000		0
5,0	15,0	2,0	0,28	2,89	0,00005	5659	8
10,0	28,0	4,0	0,57	5,77	0,00009	6063	15
15,0	37,0	6,0	0,85	8,66	0,00012	6882	23
20,0	50,0	10,0	1,132	11,54	0,00017	6791	31
25,0	80,0	14,0	1,415	14,43	0,00027	5305	38
30,0	150,0	25,0	1,698	17,31	0,00050	3395	46
35,0	289,0	60,0	1,981	20,20	0,00096	2056	54
40,0	435,0	180,0	2,264	23,08	0,00145	1561	61
45,0	648,0	210,0	2,546	25,97	0,00216	1179	69
50,0	978,0	350,0	2,829	28,85	0,00326	868	77
55,0	1386,0	498,0	3,112	31,74	0,00462	674	84
60,0	1987,0	612,0	3,395	34,62	0,00662	513	92
65,2	2874,0	752,0	3,687	37,60	0,00958	385	100
Carga Máx.			Resistencia Máx.				
Análisis Gráfico							
ε elástico =					0,00027		
ε rotura =					0,00958		
Ductilidad =					35,5		

Fuente: Propia

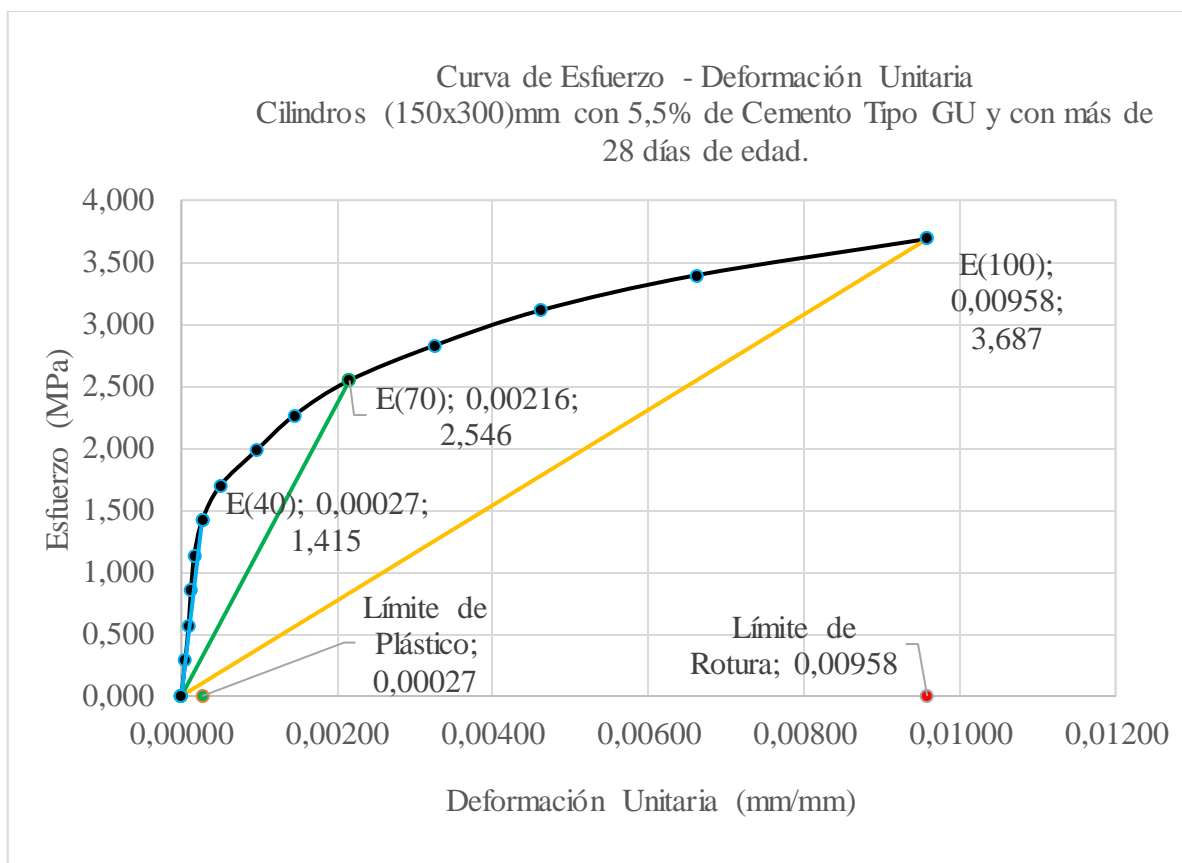


Ilustración 42. Curva de Esfuerzo - Deformación Unitaria Cilindros 150x300 mm con 5.5 % de Cemento Tipo GU con más de 28 días.

Fuente: Propia

3.1.4.3 FASE C. Análisis y resultados de los ensayos.

Es de gran importancia analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados, como se describe en el capítulo anterior, fue necesario realizar un análisis estadístico, por lo que para determinar la relación existente entre las variables analizadas se utilizó el método estadístico más idóneo. Para poder entender lo realizado en este análisis, a continuación, tratamos de describir brevemente la lógica estadística utilizada.

3.1.4.3.1 Análisis estadístico

Durante la investigación fue necesario hacer ensayos y procesos de laboratorio de suelo, existen una serie de variables en el proceso que afectan los resultados esperando.

Existen técnicas estadísticas que permiten disminuir el impacto de estas discrepancias atribuidas a variables no controladas, mediante un “ajuste” de datos o regresión.

Esto representa una serie de datos o de resultados, por medio de un modelo matemático que describa con exactitud su comportamiento respecto a determinadas variables.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto:

Tabla 40. Análisis de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros de 7 días.

RESULTADOS OBTENIDO CON LOS ENSAYOS DE PULSO ULTRASÓNICO.										
CILINDROS A 7 DÍAS DE SU DOSIFICACIÓN										
DATOS INICIALES		Módulo de Elasticidad Dinámico								
Espécimen	N.º	4 % de Cemento Holcim Tipo GU			5 % de Cemento Holcim Tipo GU			6 % de Cemento Holcim Tipo GU		
		Módulo Dinámico (Mpa)	Promedio (Mpa)	DS	Módulo Dinámico (Mpa)	Promedio (Mpa)	DS	Módulo Dinámico (Mpa)	Promedio (Mpa)	DS
150x300	1	12073	13379	1305,30	18500	17044	2058,8	16346	15993	353,53
	2	14684			15588			15639		
100x200	1	16464	15268	1195,91	15915	15932	23,5	15381	15352	29,02
	2	14072			15949			15323		
100x115	1	13330	13714	383,93	15761	15960	281,3	13895	13637	257,97
	2	14098			16159			13379		

Fuente: Propia

Tabla 41. Análisis de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros con más de 28 días.

RESULTADOS OBTENIDO CON LOS ENSAYOS DE PULSO ULTRASÓNICO.										
CILINDROS A MÁS DE 28 DÍAS DE SU DOSIFICACIÓN										
DATOS INICIALES		Módulo de Elasticidad Dinámico								
Espécimen	N.º	4 % de Cemento Holcim Tipo GU			5 % de Cemento Holcim Tipo GU			6 % de Cemento Holcim Tipo GU		
		Módulo Dinámico (Mpa)	Promedio (Mpa)	DS	Módulo Dinámico (Mpa)	Promedio (Mpa)	DS	Módulo Dinámico (Mpa)	Promedio (Mpa)	DS
150x300	1	16120	16247	127,10	20315	19187	1127,72	18016	17593	422,21
	2	16374			18060			17171		
100x200	1	15235	15541	306,29	16404	14325	2078,38	16353	14428	1925,02
	2	15847			12247			12503		
100x115	1	17591	15921	1669,35	18161	16779	1381,87	17698	16726	971,70
	2	14252			15398			15755		

Fuente: Propia

Tabla 42. Análisis de los ensayos de pulso ultrasónico en cilindros con más de 28 días.

RESULTADOS OBTENIDO CON LOS ENSAYOS DE PULSO ULTRASÓNICO.										
CILINDROS A MÁS DE 28 DÍAS DE SU DOSIFICACIÓN										
DATOS INICIALES		Módulo de Elasticidad Dinámico								
Especimen	N.º	5,5 % de Cemento Holcim Tipo GU			5,5 % de Cemento Holcim Tipo GU					
		Módulo Dinámico (Mpa)	Promedio (Mpa)	DS	Módulo Dinámico (Mpa)	Promedio (Mpa)	DS			
150x300	1	14095	16194	2099,34	16812	16873	61,03			
	2	18293			16934					
100x200	1	14553	15483	929,28	16739	15549	1189,83			
	2	16412			14359					
100x115	1	19137	18154	982,70	17780	18577	796,96			
	2	17171			19374					

Fuente: Propia

Tabla 43. Resumen de valores del módulo de elasticidad dinámico obtenidos del análisis del ensayo de pulso ultrasónico en cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.

RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS						
CEMENTO (%)	MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (MPa)					
	7 días			> 28 días		
	150x300	100x200	100x115	150x300	100x200	100x115
4,00	13379	15268	13714	16247	15541	15921
5,00	17044	15932	15960	19187	14325	16779
5,50	-	-	-	16534	15516	18366
6,00	15993	15352	13637	16873	14428	16726

Fuente: Propia

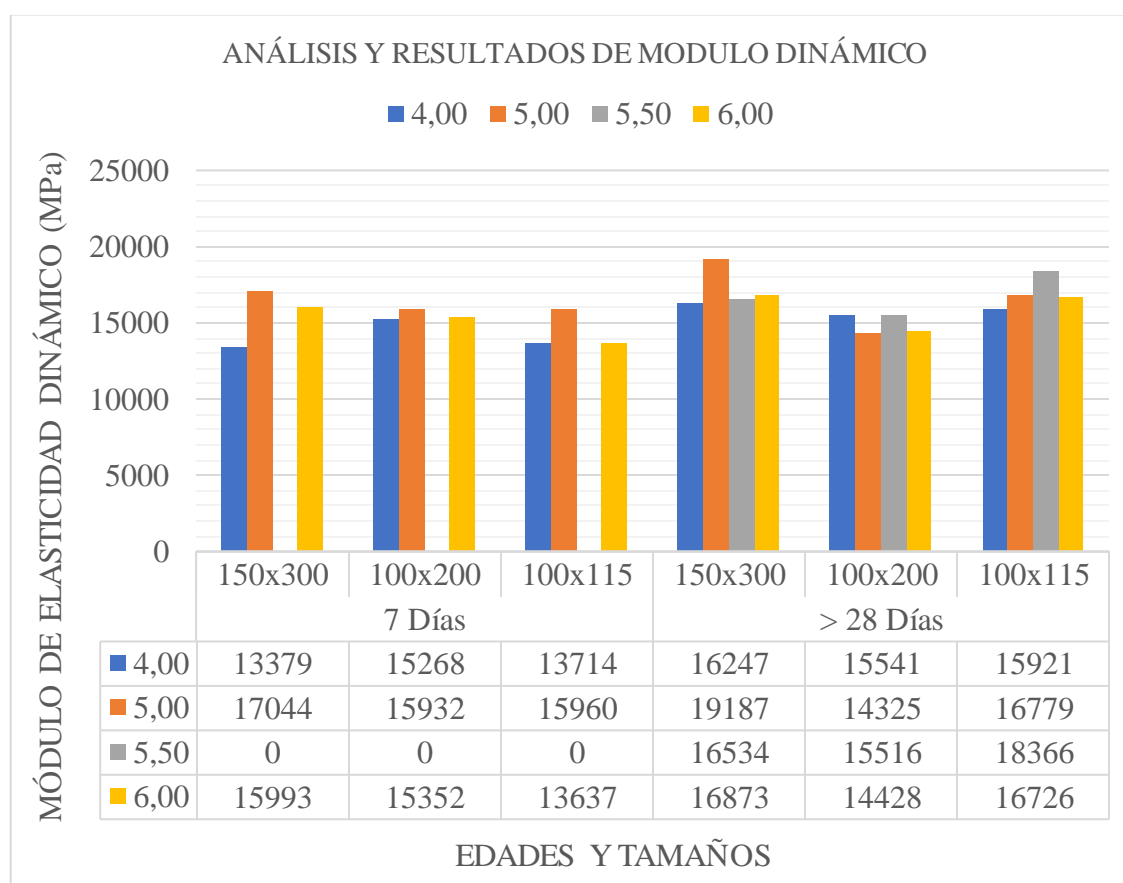


Ilustración 43. Gráficas de los resultados del módulo de elasticidad dinámico de cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.

Fuente: Propia

Tabla 44. Resumen de desviaciones estándar del módulo de elasticidad dinámico

RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS						
CEMENTO (%)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL MÓDULO DINÁMICO					
	7 Días			> 28 Días		
	150x300	100x200	100x115	150x300	100x200	100x115
4,00	1305,3	1195,9	383,9	127,1	306,3	1669,4
5,00	2058,8	23,5	281,3	1127,7	2078,4	1381,9
5,50	-	-	-	1080,2	1059,6	889,8
6,00	353,5	29,0	971,7	422,2	1925,0	971,7

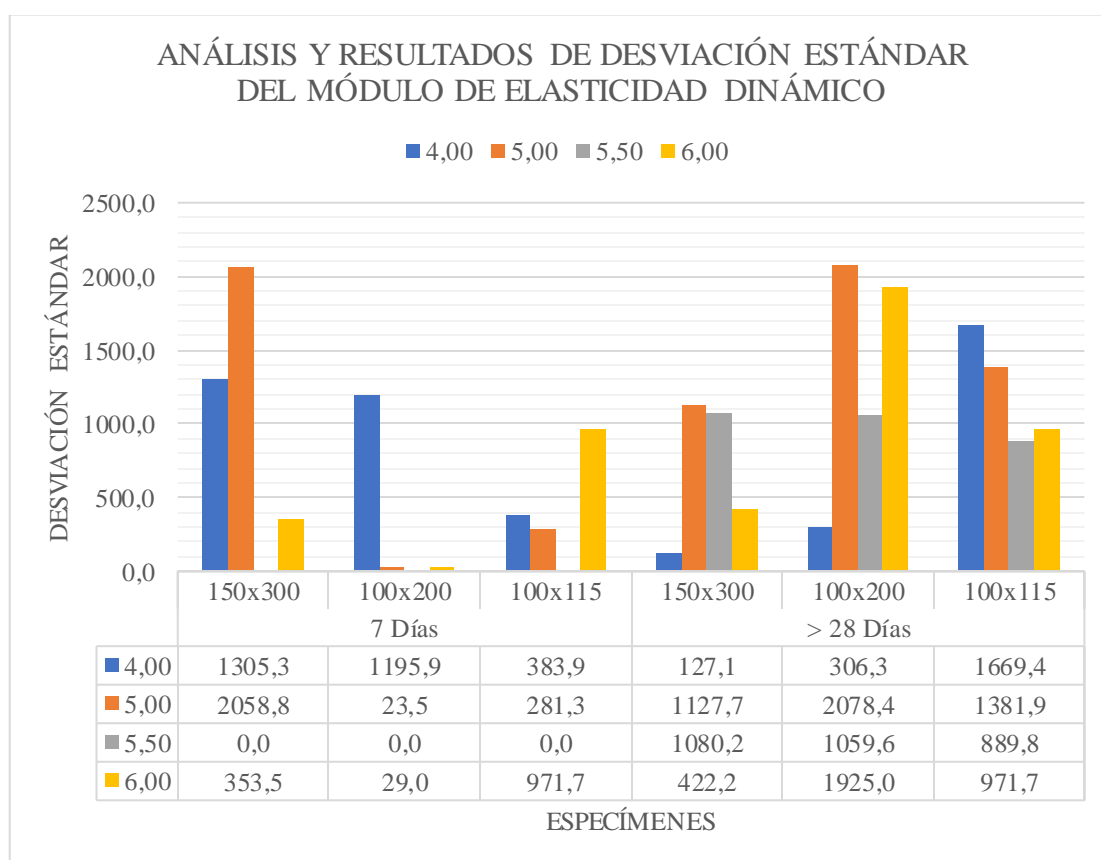
Fuente: Propia**Ilustración 44.** Gráficas de las desviaciones estándar del módulo de elasticidad dinámico.*Fuente: Propia*

Tabla 45. Análisis de los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con 7 días.

RESULTADOS OBTENIDO CON LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE										
CILINDROS A 7 DÍAS DE SU DOSIFICACIÓN										
DATOS INICIALES		Resistencia a la Compresión Simple								
Espécimen	N.º	4 % de Cemento Holcim Tipo GU			5 % de Cemento Holcim Tipo GU			6 % de Cemento Holcim Tipo GU		
		Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esf. Promedio (kgf/cm ²)	DS	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esf. Promedio (kgf/cm ²)	DS	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esf. Promedio (kgf/cm ²)	DS
150x300	1	17,9	19,2	1,35	26,0	27,8	1,79	23,1	25,0	1,86
	2	20,6			29,6			26,8		
100x200	1	38,2	39,2	0,93	41,6	41,8	0,26	41,6	41,8	0,26
	2	40,1			42,1			42,1		
100x115	1	19,4	18,6	0,81	37,1	37,3	0,19	37,9	37,0	0,84
	2	17,8			37,5			36,2		

*Fuente: Propia***Tabla 46.** Análisis de los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con más de 28 días.

RESULTADOS OBTENIDO CON LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE										
CILINDROS A MÁS DE 28 DÍAS DE SU DOSIFICACIÓN										
DATOS INICIALES		Resistencia a la Compresión Simple								
Espécimen	N.º	4 % de Cemento Holcim Tipo GU			5 % de Cemento Holcim Tipo GU			6 % de Cemento Holcim Tipo GU		
		Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esf. Promedio (kgf/cm ²)	DS	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esf. Promedio (kgf/cm ²)	DS	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esf. Promedio (kgf/cm ²)	DS
150x300	1	18,54	19,78	1,24	29,31	31,22	1,91	29,02	30,73	1,71
	2	21,03			33,13			32,45		
100x200	1	50,64	48,85	1,78	70,68	69,43	1,25	72,51	70,75	1,76
	2	47,07			68,18			69,00		
100x115	1	37,44	39,25	1,81	46,73	49,82	3,09	54,99	53,17	1,82
	2	41,06			52,91			51,34		

Fuente: Propia

Tabla 47. Análisis de los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con más de 28 días.

RESULTADOS OBTENIDO CON LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN.										
CILINDROS A MÁS DE 28 DÍAS DE SU DOSIFICACIÓN										
DATOS INICIALES		Resistencia a la Compresión Simple								
Especimen	N.º	5,5% de Cemento Holcim Tipo GU			5,5 % de Cemento Holcim Tipo GU					
		Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esf. Promedio (kgf/cm ²)	DS	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Esf. Promedio (kgf/cm ²)	DS			
150x300	1	32,03	34,81	2,78	33,47	34,94	1,47			
	2	37,60			36,41					
100x200	1	62,54	62,79	0,26	73,90	79,79	5,90			
	2	63,05			85,69					
100x115	1	64,43	63,29	1,14	61,68	59,45	2,22			
	2	62,15			57,23					

Fuente: Propia

Tabla 48. Resumen de valores de esfuerzos obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.

RESUMEN DE VALORES OBTENIDOS						
CEMENTO (%)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (kgf/cm ²)					
	7 días			> 28 días		
	150x300	100x200	100x115	150x300	100x200	100x115
4,00	19,2	39,2	18,6	19,8	48,9	39,2
5,00	27,8	41,8	37,3	31,2	69,4	49,8
5,50	-	-	-	34,8	71,3	61,4
6,00	25,0	41,8	37,0	30,7	70,8	53,2

Fuente: Propia

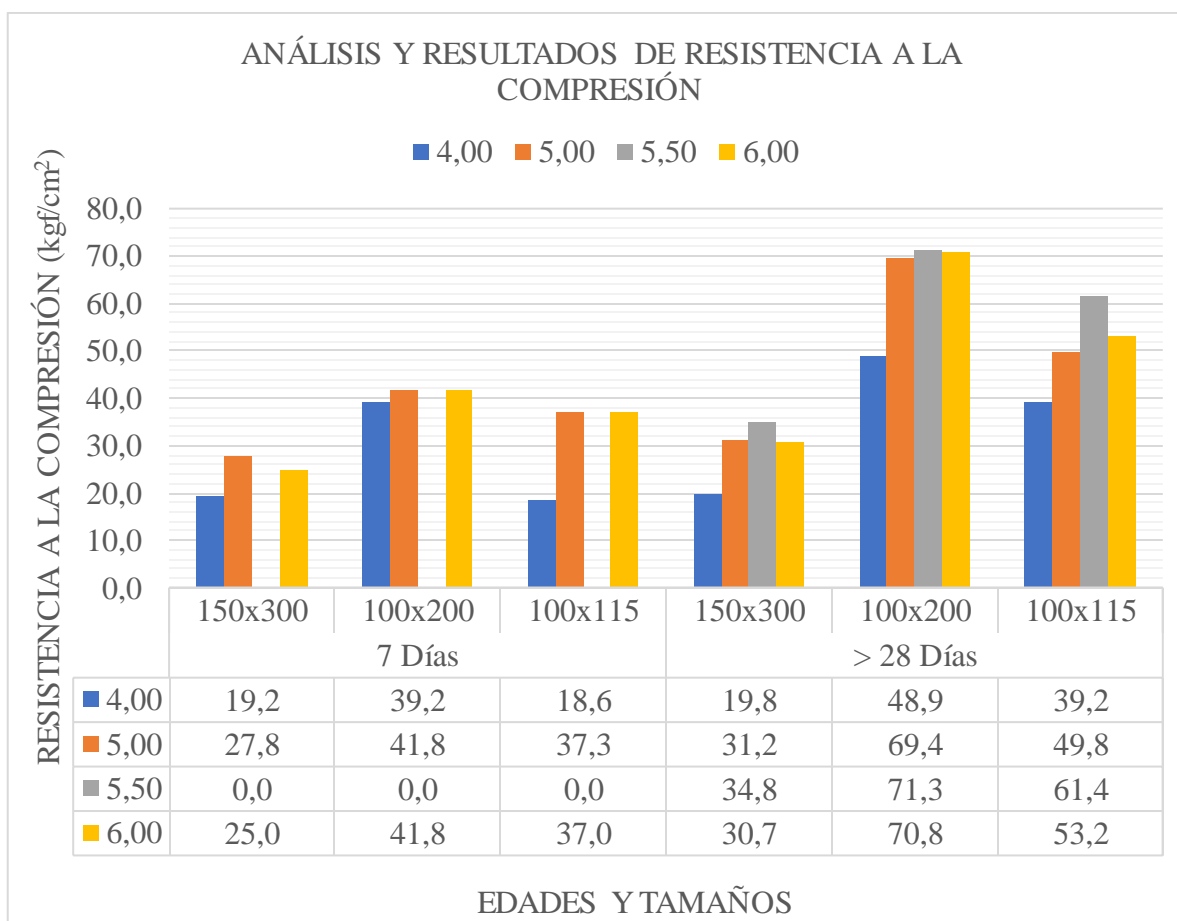


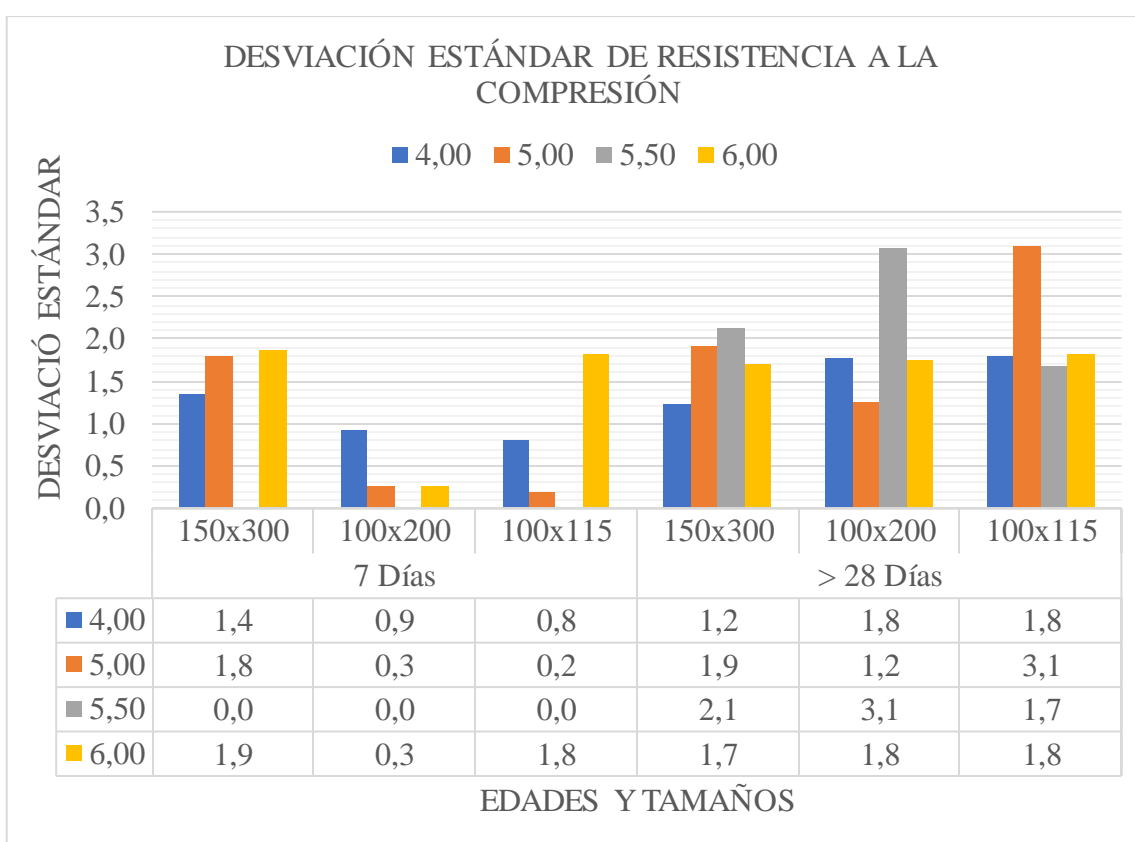
Ilustración 45. Gráficas de los resultados de la resistencia a la compresión de cilindros con diferentes edades y tamaños.

Fuente: Propia

Tabla 49. Resumen de desviaciones estándar de la resistencia a compresión simple.

RESUMEN DE VALORES OBTENIDOS						
CEMENTO (%)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE ESFUERZO COMPRESIÓN					
	7 días			> 28 días		
	150x300	100x200	100x115	150x300	100x200	100x115
4,00	1,9	1,3	1,2	1,8	2,5	2,6
5,00	2,5	0,4	0,3	2,7	1,8	4,4
5,50	-	-	-	3,9	4,4	2,4
6,00	2,6	0,4	2,6	2,4	2,5	2,6

Fuente: Propia

**Ilustración 46.** Gráficas de las desviaciones estándar del módulo de elasticidad dinámico.

Fuente: Propia

Tabla 50. Resumen de resultados obtenidos de los ensayos del módulo de elasticidad estático en cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.

RESUMEN DE VALORES OBTENIDOS		
DUCTIBILIDAD		
	7 días	> 28 días
	150x300	150x300
4,00	36	36
5,00	12	40
5,50	-	38
6,00	30	53

Fuente: Propia

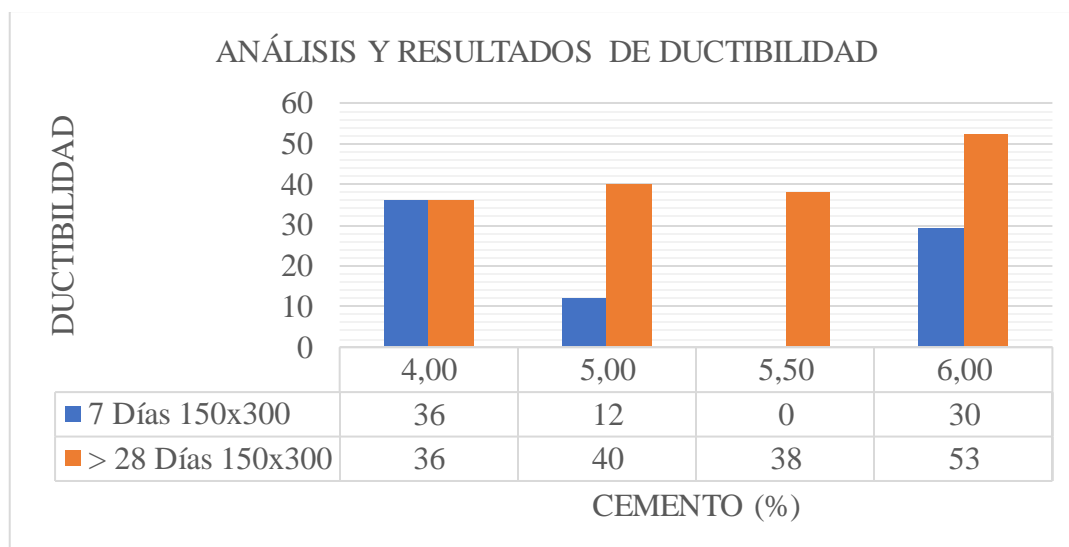


Ilustración 47. *Análisis de los resultados de Ductilidad de cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.*

Fuente: Propia

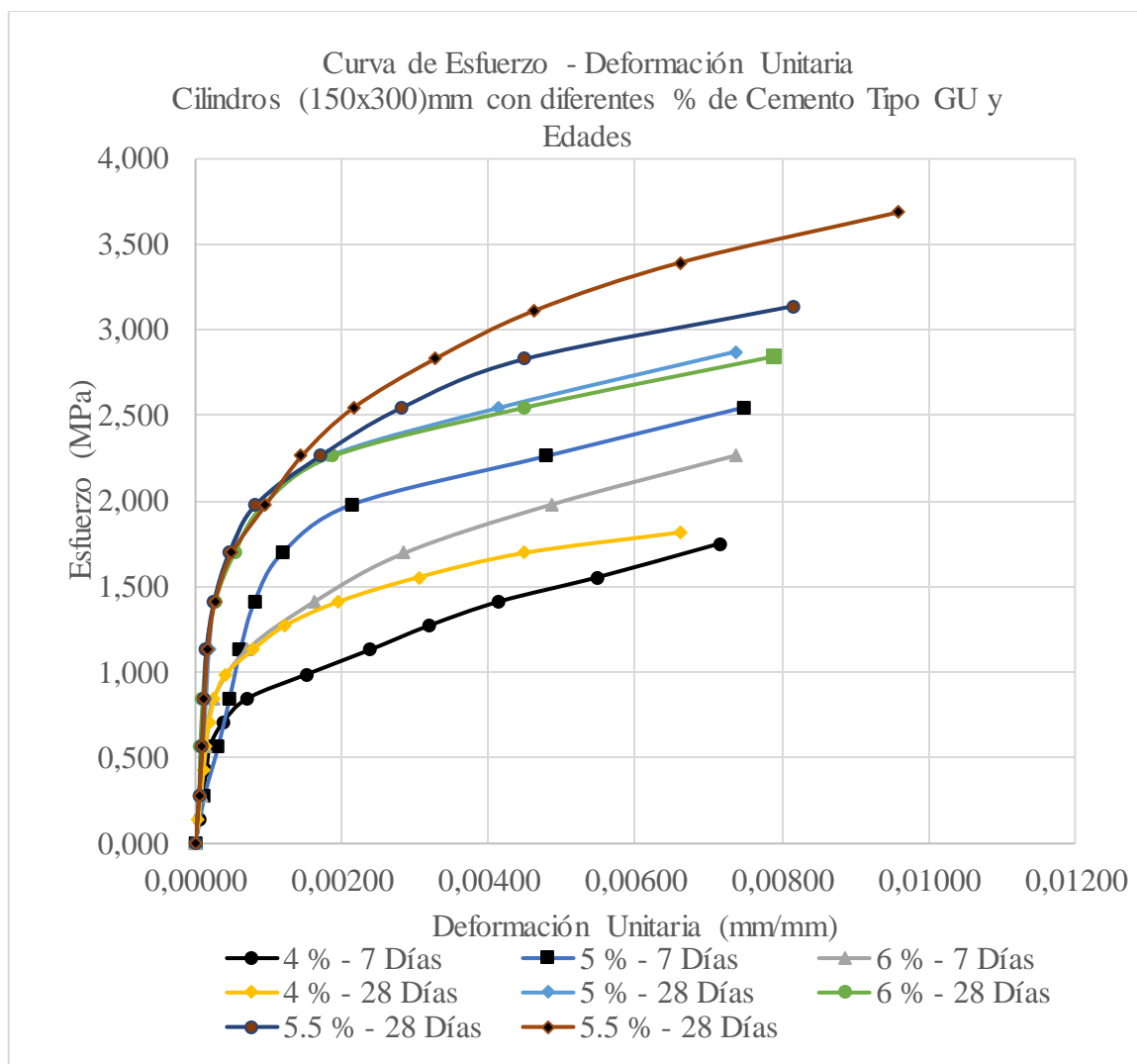


Ilustración 48. Gráficas de Esfuerzo – Deformación de los datos obtenidos con los ensayos de módulo de elasticidad estático de cilindros con diferentes porcentajes de cemento, edades y tamaños.

Fuente: Propia

4 CAPÍTULO IV

4.1 CONCLUSIONES

- A través de las investigaciones bibliográficas se pudo conocer las propiedades de la base estabilizada con cemento y con ello la composición de esta, así como también los tipos de estabilización y los métodos que se usa en los ensayos para la obtención de la resistencia de la misma.
- Se realizó diferentes ensayos en la caracterización del material granular base clase 1A teniendo como resultados una humedad natural de 8.65 % con un índice de plasticidad de 2.82%, Densidad seca máxima de 1982 kg/cm³, humedad óptima de 13.08 % y con un valor aproximado de CBR de 84.66 % también se determinó las proporciones adecuadas de los componentes de la BAEC usando en la mezcla 55 kg de base clase 1A, 5 % de agua y 4, 5, 5.5 y 6 % de cemento Holcim tipo GU, NTE INEN 2380, con relación a peso seco total de la mezcla.
- Se ejecutaron varios ensayos en la determinación de las propiedades mecánicas de la BAEC, los mejores resultados se obtuvieron en los cilindros de 100x200 mm, la resistencia promedio a la compresión más alta se la obtuvo con 5.5 % de cemento Holcim tipo GU que es de aproximadamente de 71.30 kgf/cm² a más de 28 días de edad, el módulo de elasticidad dinámico promedio fue de 16805 MPa usando 5.5 % de cemento Holcim tipo GU, para el módulo de elasticidad estático se obtuvo buenos resultados con un 5.5 % de cemento con más de 28 días de edad en cilindros de 150x300 mm de hasta aproximadamente 6882 Mpa con una Ductilidad de 36.
- Se determinó que el porcentaje de cemento adecuado tiene que estar en un rango de 5 y 6 % para obtener buenas propiedades físicas de la BAEC.
- Se propone utilizar los especímenes de 100x200 mm para la obtención de la resistencia a la compresión en comparación simple en los diseños de pavimentos, en comparación con

cilindros de 150x300 mm los cilindros de 100x200 mm su resistencia tiende a ser mayor 2,26 veces y 1,28 veces en comparación con los de 100x115 mm. Además, los resultados son más consistentes especialmente a los 7 días.

- Para obtener el módulo de elasticidad de la BAEC se usaron especímenes de 150x300 mm ya que estos son fáciles de manipularlos con los medidores de deformación.

4.2 RECOMENDACIONES

- Utilizar material de calidad para la obtención de la base estabilizada con cemento y buen equipamiento calibrados para corroborar los resultados obtenidos en laboratorio de suelo.
- Realizar nuevas investigaciones sobre la BAEC para corroborar los resultados de este proyecto de investigación y así mejorar la información que corresponde a la conceptualización de la BAEC
- Utilizar equipos que estén en buen estado y calibrados, ya que de no ser así los resultados se dispersarán demasiado, también se debe tener cuidado a la hora de poder transportar los especímenes, en esta investigación se transportaron los cilindros dentro de las gavetas llenas con arena fina para mejor estabilización.
- Se sugiere utilizar específicamente especímenes de 100x200 mm y con 5.5 % de cemento tipo GU para obtener buenos resultados de propiedades físicas y químicas, como su resistencia, elasticidad y Ductilidad.

5 CAPÍTULO V

5.1 ANEXOS



Ilustración 49. Planta de explotación de materiales de construcción, cantera Megarok S.A.

Fuente: Propia



Ilustración 50. Toma de muestra de material Base clase 1A de la planta de trituración y almacenamiento del material granular y cemento Holcim tipo GU.

Fuente: Propia



Ilustración 51. Proceso de ensayos de granulometría del material granular.

Fuente: Propia

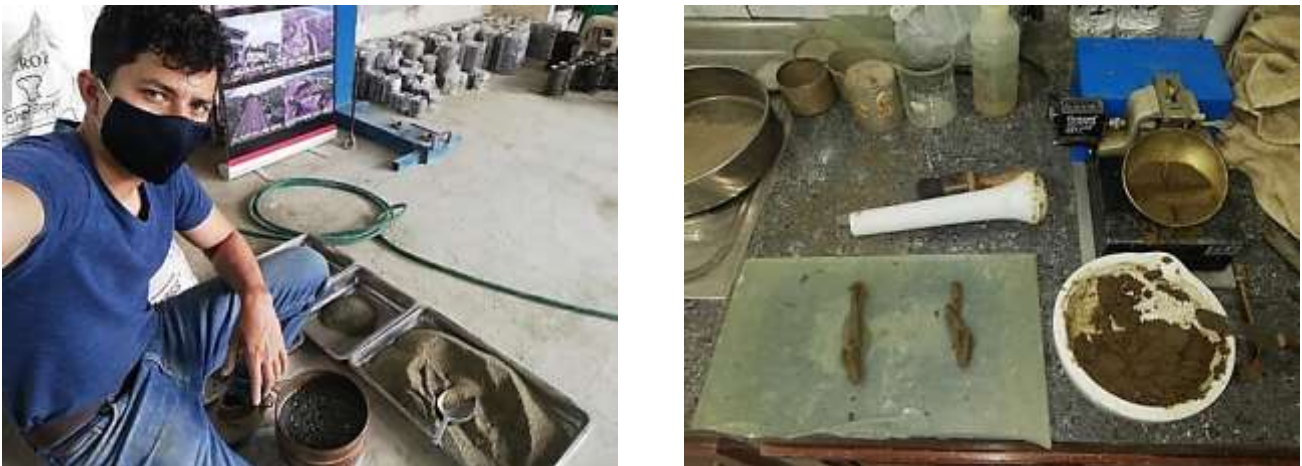


Ilustración 52. Ensayos de granulometría fina y límites de Atterberg.

Fuente: Propia



Ilustración 53. *Ensayo de Proctor modificado y CBR.*

Fuente: *Propia*



Ilustración 54. *Componentes y mezcla de la BAEC.*

Fuente: *Propia*

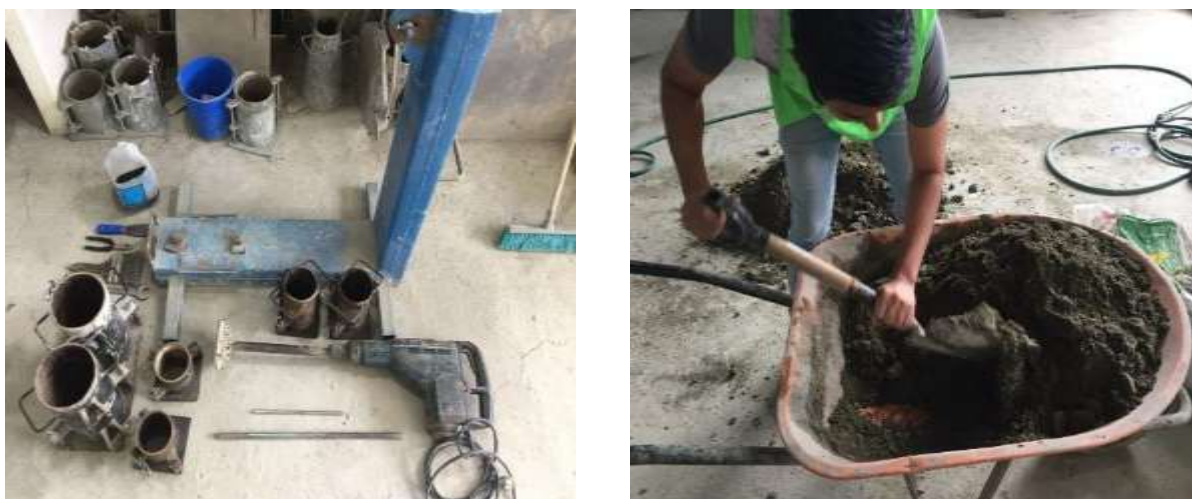


Ilustración 55. *Preparación de la mezcla de BAEC e instrumentos para el ensayo de compactación.*

Fuente: Propia



Ilustración 56. *Compactación y enrasado de la BAEC en sus respectivos especímenes.*

Fuente: Propia



Ilustración 57. *Cilindros compactados en los especímenes para su posterior curado.*

Fuente: Propia



Ilustración 58. Transporte de los especímenes a Holcim Ecuador en Guayaquil.

Fuente: Propia



Ilustración 59. Ensayo pulso ultrasónico y resistencia a la compresión simple.

Fuente: Propia



Ilustración 60. Ensayo de módulo de elasticidad en cilindros de 150x300 mm.

Fuente: Propia



Ilustración 61. Cilindros de 150x300 mm en su primer día de curado y después de su rotura.

Fuente: Propia



Ilustración 62. Fotografía del personal de las empresas Megarok. S.A. y Holcim Ecuador Guayaquil.

Fuente: Propia

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ortíz, C., Díaz, P. (2019). Diseño y análisis de bases estabilizadas con cementos tipo UG (uso general) y MCH (moderado calor de hidratación) [tesis de pregrado]. Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia.

Montejo, A., Montejo, A., Montejo, A. (1era Ed.) (2018). Estabilización de Suelos. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.

Inglés, O., Metcalf, J. (Vol. II) (1972). Estabilización de suelos: principios y fundamentos. Sydney, Australia: Butterworths.

Lavalle, E. d. (2013). Suelo-Cemento. Sus usos, propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C, México. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/364918842/Suelo-Cemento>

ASTM D1633 - 17 Métodos de prueba estándar para resistencia a la compresión de cilindros de suelo-cemento moldeados, 2014.

Informe sobre Suelo Cemento. Reportado por el Comité 230 del Instituto Americano del Concreto (ACI), 2009

Ensayos de dureza Rockwell | Struers.com. (2021).

ACI. (2001). Instituto Americano del Concreto (ACI). Obtenido del Comité 308R. Guía para el curado del hormigón.

ACI. (julio de 2009). Reportado por el Comité ACI 230. Obtenido del informe sobre Suelo-Cemento.

Ávila-Esquivel, T., Garro-Mora, José Francisco, Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2012). EVALUACIÓN DE LAS LOSAS CORTAS DE CONCRETO EN LA AUTOPISTA FLORENCIO DEL CASTILLO RUTA 2. Ucr.ac.cr.

Miranda Fonseca, Jorge. Bases estabilizadas para pavimentos semirrígidos. Informe de proyecto final de graduación, 1986, UCR

Matute, A. (2016). Comparación técnico económica del uso de bases granulares y bases estabilizadas con cemento, para diversos casos de tráfico, con y sin capa de rodadura, para nuestro medio [Tesis de pregrado]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.

Holcim. Soluciones en Pavimentos Estabilizaciones Base Vial. (2022). Recuperado de <https://www.holcim.com.ec/base-vial>.

Holcim. Cemento Holcim Fuerte. (2022). Recuperado de <https://www.holcim.com.ec/cemento-holcim-fuerte>

Guerrero, L., Miranda, H., Ramirez, J. (2008, Julio). Correlación del módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y coeficiente de capa en bases de suelo cemento. [Tesis de pregrado]. Universidad de El Salvador, Argentina.

Baños, M., Flores, T., Santos, E. (2012, Enero). Evaluación y comparación de la resistencia a la compresión de una mezcla de concreto compactado con rodillo, utilizando para la elaboración de especímenes la mesa vibratoria de acuerdo a la norma ASTM C 1176 y el martillo vibrocompactador de acuerdo a la norma ASTM C 1435. [Tesis de pregrado]. Universidad de El Salvador, Argentina.

SUELO – CEMENTO. (s.f.). Recuperado de <https://www.imcyc.com/ct2008/mar08/ingenieria.htm#:~:text=El%20suelo%2Dcemento%20se%20usa,o%20bien%20ejecutarse%20in%20situ>.