



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD,  
ELABORADAS CON PERLITA EXPANDIDA COMO AGREGADO**

**Jorge Francisco Delgado González**

Asesorado por el Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas

Guatemala, noviembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD,  
ELABORADAS CON PERLITA EXPANDIDA COMO AGREGADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JORGE FRANCISCO DELGADO GONZÁLEZ**  
ASESORADO POR EL ING. PLINIO ESTUARDO HERRERA RODAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. María del Mar Girón Cordón
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD,  
ELABORADAS CON PERLITA EXPANDIDA COMO AGREGADO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,  
con fecha 6 de mayo de 2019.



**Jorge Francisco Delgado González**

Ciudad de Guatemala, 26 de mayo 2020

Ingeniero

Wuillian Ricardo Yon Chavarría

Jefe Departamento de Materiales y Construcciones Civiles

Escuela de Ingeniería Civil

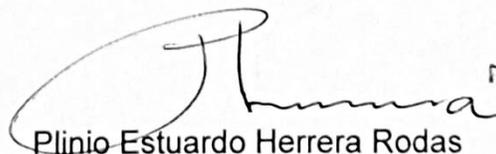
USAC

Ingeniero Yon:

Por este medio me dirijo a usted, para hacer de su conocimiento que como asesor del estudiante **JORGE FRANCISCO DELGADO GONZÁLEZ**, con número de registro estudiantil **201503501** y CUI **2990 86577 0101**, he tenido a la vista el trabajo de graduación titulado **EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD ELABORADAS CON PERLITA EXPANDIDA COMO AGREGADO** por el cual me encuentro satisfecho.

En tal virtud, LO DOY POR APROBADO, solicitándole darle trámite respectivo.

Sin otro particular, me despido.



Plinio Estuardo Herrera Rodas

Plinio Estuardo Herrera Rodas  
Ingeniero Civil  
Colegiado No. 3876

Ingeniero Civil, Colegiado No. 3876

Asesor de Tesis



Guatemala, 27 de mayo de 2020

Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Polanco.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD, ELABORADAS CON PERLITA EXPANDIDA COMO AGREGADO** desarrollado por el estudiante Jorge Francisco Delgado González quien contó con la asesoría del Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas.

Considero que el presente trabajo fue desarrollado adecuadamente y representa un aporte para la comunidad del área y habiéndose cumplido con los objetivos del referente trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Wuillian Ricardo Yon Chavarría  
Coordinador del área de Materiales y  
Construcciones Civiles

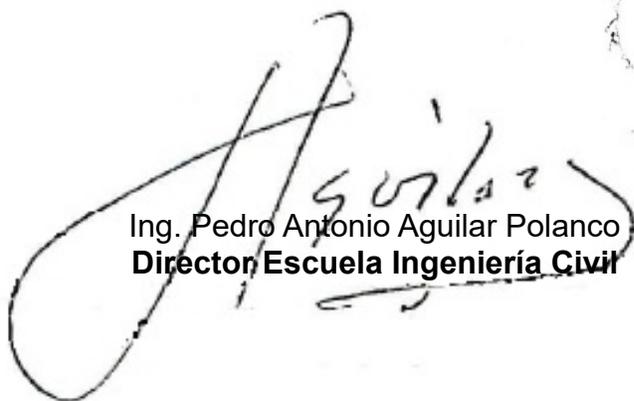




Guatemala, 16 de noviembre de 2020  
DEIC-TG-EIC-016-2020/paap

El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ingeniero Plinio Estuardo Herrera Rodas y del Coordinador del Área de Materiales de Construcción y Obras Civiles, Ingeniero Wuillian Ricardo Yon Chavarría, al trabajo de graduación del estudiante Jorge Francisco Delgado González, **EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD, ELABORADAS CON PERLITA EXPANDIDA COMO AGREGADO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
**Director Escuela Ingeniería Civil**



Interesado  
Asesor  
Coordinador del Área de Materiales de Construcción y Obras Civiles





DTG. 383.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD, ELABORADAS CON PERLITA EXPANDIDA COMO AGREGADO**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Francisco Delgado González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por permitirme alcanzar y culminar esta meta propuesta, pues todo se lo debo a Él.
<b>Virgen María</b>	Por ser ejemplo de virtudes y nunca desampararme en la vida.
<b>Mis padres</b>	Jorge Delgado y Marysol González, por darme la vida, por creer en mí y ser siempre incondicionales; con sus ejemplos de cariño y esfuerzo me orientaron por el camino de la verdad, honradez y amor.
<b>Mi hermano</b>	Luis Pedro Delgado, por su ayuda incondicional.
<b>Mis abuelos</b>	Luis González, Marysol de González, Víctor Delgado (q.d.e.p.) y Antonieta de Delgado, por su amor, apoyo y enseñanzas en mi formación como persona.
<b>Mis tías</b>	María José y Delia González, por ser parte fundamental en mi vida.
<b>Mis primas</b>	María Fernanda y Anasylyvia González, por su amor incondicional cada día de mi vida.

**Clarissa de León**

Por su amor incondicional, paciencia y apoyo todos los días.

**Mi familia**

Por ser parte importante en mi vida y brindarme su cariño y apoyo.

**Amigos**

Por ser parte fundamental en mi vida y contribuir en este logro, y por los valiosos momentos y experiencias compartidas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por guiarme y acompañarme todos los días de mi vida, y haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de realizar mis estudios profesionales.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por formar profesionales de alto nivel, con valores, principios y conocimientos, para contribuir al progreso y desarrollo de nuestro país.
<b>Personal del Centro de Investigaciones de Ingeniería</b>	Por abrir sus puertas y compartir sus instalaciones, equipo y conocimiento para la formación profesional de los estudiantes.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Kevin Anaya, Christopher Ramos, Telma Cermeño, Ruth Sajché, Omar Lantán, Oscar Chacón, Diego Osorio y Valery Lima, por compartir momentos felices, inolvidables y el apoyo mutuo en nuestra formación profesional.

**Ing. Estuardo Herrera e  
Ing. Ariel Osorio**

Por compartir todo su conocimiento, incentivar mi interés a la investigación del concreto, asesorar este trabajo de graduación y por su valiosa amistad.

**Todo el personal de  
CETEC y C&D**

Por su valiosa amistad y apoyarme en el desarrollo de este trabajo de graduación.

**Cementos Progreso**

Por permitirme hacer todas las pruebas en sus instalaciones, hacer uso de su equipo y brindarme los recursos para el desarrollo de esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS .....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Antecedentes del concreto liviano.....	1
1.1.1. Imperio Romano.....	1
1.1.2. Siglo XX .....	2
1.2. Antecedentes del concreto con perlita expandida como agregado .....	3
1.2.1. Siglo XX .....	4
1.2.2. Siglo XXI .....	5
2. PERLITA Y PERLITA EXPANDIDA.....	9
2.1. Mineralogía.....	9
2.2. Distribución de depósitos.....	11
2.2.1. Depósitos de perlita en Guatemala .....	11
2.3. Expansión de la perlita .....	12
2.3.1. Expansión de la perlita en Guatemala .....	14
2.4. Usos de la perlita expandida .....	16
2.4.1. Aplicaciones en la construcción .....	16
2.4.2. Aplicaciones en horticultura.....	18

2.4.3. Aplicaciones en industriales.....	19
2.5. Especificaciones para los agregados livianos según norma ASTM C332.....	19
2.5.1. Clasificación .....	19
2.5.2. Características físicas de los agregados livianos .....	20
2.5.2.1. Granulometría .....	20
2.5.2.2. Propiedades aislantes .....	22
2.5.2.3. Densidad aparente .....	23
3. CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD .....	25
3.1. Definición de concreto liviano de baja densidad .....	25
3.2. Composición del concreto liviano de baja densidad.....	26
3.2.1. Cemento .....	26
3.2.2. Agua .....	26
3.2.3. Agregados.....	27
3.2.4. Aditivos .....	27
3.2.5. Fibras.....	29
3.3. Características físicas del concreto liviano de baja densidad .....	30
3.3.1. Densidad .....	30
3.3.2. Densidad seca al horno.....	30
3.3.3. Contracción por secado .....	31
3.3.4. Expansión térmica.....	31
3.3.5. Conductividad térmica.....	31
3.3.6. Resistencia al fuego .....	32
3.4. Propiedades mecánicas del concreto liviano de baja densidad .....	32
3.4.1. Resistencia a la compresión .....	32
3.5. Mezclado de concreto liviano de baja densidad.....	33
3.6. Colocación del concreto liviano de baja densidad.....	34
3.6.1. Colocación en climas de bajas temperaturas .....	35

3.6.2. Colocación en climas de altas temperaturas.....	35
3.7. Acabado del concreto liviano de baja densidad.....	36
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ENSAYOS REQUERIDOS .....	37
4.1. Caracterización de la perlita.....	37
4.1.1. Granulometría y módulo de finura (COGUANOR NTG 41010 h1 / ASTM C 136).....	38
4.1.1.1. Equipo .....	39
4.1.1.2. Muestra a utilizar.....	39
4.1.1.3. Procedimiento.....	40
4.1.1.4. Cálculos .....	41
4.1.2. Densidad aparente (COGUANOR NTG 41010-h2 / ASTM C29).....	42
4.1.2.1. Equipo .....	42
4.1.2.2. Muestra a utilizar .....	43
4.1.2.3. Procedimiento.....	43
4.1.2.4. Cálculos .....	44
4.1.3. Materia orgánica en los agregados finos (COGUANOR NTG41010 h4 / ASTM C87).....	45
4.1.3.1. Equipo .....	45
4.1.3.2. Reactivos y soluciones.....	46
4.1.3.3. Muestra a utilizar .....	46
4.1.3.4. Procedimiento.....	46
4.1.4. Porcentaje del contenido de humedad (COGUANOR NTG 41010 h19 / ASTM C566-13).....	47
4.1.4.1. Equipo .....	48
4.1.4.2. Muestra a utilizar .....	48
4.1.4.3. Procedimiento.....	49
4.1.4.4. Cálculos .....	50

4.1.5. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (COGUANOR NTG 41010 h9/ ASTM C128-15) .....	50
4.1.5.1. Equipo .....	51
4.1.5.2. Muestra a utilizar .....	52
4.1.5.3. Procedimiento .....	53
4.1.5.4. Cálculos .....	55
4.2. Elaboración de diseños de mezcla .....	56
4.2.1. Definición de las características de la mezcla .....	58
4.2.1.1. Resistencia .....	58
4.2.1.2. Relación agua-cemento .....	58
4.2.1.3. Asentamiento .....	59
4.2.1.4. Agregados .....	60
4.2.2. Proporcionamiento de materiales .....	61
4.3. Evaluación de característica del concreto en estado fresco .....	64
4.3.1. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico (COGUANOR NTG-41017 h4 / ASTM C143) .....	64
4.3.1.1. Equipo .....	64
4.3.1.2. Muestra a utilizar .....	65
4.3.1.3. Procedimiento .....	65
4.3.1.4. Resultados .....	68
4.3.2. Medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado (COGUANOR NTG 4103 / ASTM C 1064) .....	68
4.3.2.1. Equipo .....	68
4.3.2.2. Muestra a utilizar .....	68
4.3.2.3. Procedimiento .....	69
4.3.2.4. Resultados .....	69

4.3.3. Densidad aparente (masa unitaria) y rendimiento (volumen de concreto producido) del concreto (COGUANOR NTG-41017 h5 / ASTM C138) .....	69
4.3.3.1. Equipo .....	70
4.3.3.2. Muestra a utilizar.....	71
4.3.3.3. Procedimiento.....	71
4.3.3.4. Cálculos.....	73
4.3.4. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión (COGUANOR NTG 41017 h7 / ASTM C231-14).....	74
4.3.4.1. Equipo .....	74
4.3.4.2. Muestra a utilizar.....	77
4.3.4.3. Procedimiento.....	77
4.3.4.4. Resultados.....	79
4.4. Evaluación de propiedades mecánicas de concreto en estado endurecido .....	80
4.4.1. Método de ensayo estándar para resistencia a compresión del concreto liviano de baja densidad (ASTM C 495).....	80
4.4.1.1. Equipo .....	80
4.4.1.2. Muestra a utilizar.....	81
4.4.1.3. Procedimiento.....	82
4.4.1.4. Cálculos.....	83
5. RESULTADOS.....	85
5.1 Caracterización de la perlita .....	85
5.2 Diseños de mezcla .....	87
5.2.1. Definición de las características de la mezcla.....	88
5.3. Característica del concreto en estado fresco .....	89

5.3.1. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico (COGUANOR NTG 41017 h4 / ASTM C143) .....	89
5.3.2. Medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado (COGUANOR NTG 41053 / ASTM C1064) .....	91
5.3.3. Densidad aparente (masa unitaria) y rendimiento (volumen de concreto producido) del concreto (COGUANOR NTG-41017h5 / ASTM C138) .....	91
5.3.4. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión (COGUANOR NTG 41017 h7 / ASTM C231-14) .....	93
5.4 Evaluación de propiedades mecánicas de concreto en estado endurecido.....	94
5.4.1. Método de ensayo estándar para resistencia a compresión del concreto ligero aislante (ASTM C 495).....	95
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	99
6.1. Caracterización de la perlita expandida .....	99
6.1.1. Granulometría y módulo de finura .....	99
6.1.2. Densidad aparente .....	101
6.1.3. Materia orgánica en los agregados finos .....	101
6.1.4. Densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino .....	102
6.2. Concreto fresco .....	102
6.2.1. Proceso de elaboración del concreto .....	103
6.2.2. Asentamiento del concreto hidráulico .....	104

6.2.3.	Temperatura del concreto hidráulico recién mezclado.....	104
6.2.4.	Densidad aparente (masa unitaria) y rendimiento (volumen de concreto producido) del concreto .....	104
6.2.5.	Contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado.....	104
6.3.	Concreto endurecido.....	106
6.3.1.	Resistencia a compresión del concreto .....	106
CONCLUSIONES .....		111
RECOMENDACIONES.....		113
BIBLIOGRAFÍA.....		115
ANEXOS .....		119



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Morfología de la perlita en su forma de roca, triturada y expandida.....	10
2.	Imagen de microscopio electrónico de barrido (MEB/SEM) de la perlita expandida.....	13
3.	Recubrimiento de mortero con perlita en estructura metálica para protección contra el fuego .....	17
4.	Cultivo de tomate en perlita expandida.....	18
5.	Diagrama del método de la placa caliente para determinar conductividad térmica (ASTM C177) .....	23
6.	Componentes del concreto liviano de baja densidad (cemento, perlita expandida, aditivos y microfibras) .....	25
7.	Ampliación 16X del concreto liviano (densidad), permite ver los vacíos incorporados al concreto .....	28
8.	Pruebas de impurezas orgánicas .....	45
9.	Especificaciones de matraz para determinación de la densidad relativa por medio del método volumétrico.....	52
10.	Determinación de la densidad relativa de la perlita por medio del método volumétrico. ....	55
11.	Rangos típicos de densidades de concretos elaborados con diferentes agregados livianos. ....	61
12.	Determinación del asentamiento del concreto liviano de baja densidad .....	67
13.	Proceso de llenado del recipiente para determinar densidad aparente del concreto liviano de baja densidad.....	73

14. Detalles de la cámara de aire .....	76
15. Presentación de la perlita expandida utilizada para el desarrollo .....	85
16. Curva granulométrica de la perlita expandida (COGUANOR NTG 41010 h1 / ASTM C136) .....	86
17. Ensayo para la determinación del asentamiento del concreto hidráulico .....	90
18. Comparación de la densidad aparente teórica y práctica de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas .....	92
19. Comparación del contenido de aire teórico y práctico de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas .....	94
20. Ensayo para la determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión.....	94
21. Comparación de la resistencia a compresión a 28 días, teórica y práctica, de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas .....	96
22. Ensayo estándar para resistencia a compresión.....	97
23. Límites granulométricos de la Norma ASTM C332 y curva granulométrica de la perlita analizada.....	100
24. Ampliación 16X de la mezcla No. 5 (35 % de aire).....	105
25. Ampliación 16X de la mezcla No. 6 (50 % de aire).....	106
26. Espécimen dañado durante el proceso de extracción de molde de plástico .....	108
27. Especímenes de la mezcla No. 6 24 horas después de elaboración.....	109

## TABLAS

I. Resultados del análisis químico de la perlita expandida .....	11
II. Solicitudes que incluyen perlita al mes de marzo de 2007 .....	15

III.	Granulometrías requeridas para agregados livianos de concreto aislante (ASTM C332) .....	21
IV.	Requerimientos de la densidad aparente para agregados livianos de concreto aislante (ASTM C332).....	24
V.	Masa de la muestra para ensayo de granulometría del agregado grueso seco.....	40
VI.	Muestra de ensayo del agregado .....	49
VII.	Proporcionamiento de materiales para 1kg de cemento de mezclas de concreto con perlita utilizados en investigaciones anteriores.....	63
VIII.	Resultados de la caracterización de la perlita expandida .....	86
IX.	Granulometría de la perlita expandida (COGUANOR NTG 41010-h1 / ASTM C 136) .....	87
X.	Diseños de mezcla de concreto liviano de baja densidad evaluados.....	88
XI.	Características teóricas de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas .....	89
XII.	Resultado del ensayo de asentamiento a las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas .....	90
XIII.	Resultado de las mediciones de temperatura a las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas y la temperatura ambiente .....	91
XIV.	Resultado de la densidad aparente y rendimiento de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas .....	92
XV.	Resultado del contenido de aire de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas.....	93
XVI.	Resultados promedio de la resistencia a compresión de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas .....	95
XVII.	Resultados promedio de la resistencia a compresión de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas .....	96



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>P</b>	Contenido de humedad total evaporable de la muestra, en porcentaje.
<b><math>\rho</math></b>	Densidad (masa unitaria) del concreto, kg/m <sup>3</sup> .
<b>M</b>	Densidad aparente de los agregados, kg/m <sup>3</sup> .
<b>R2</b>	Lectura final en el matraz, mL.
<b>R1</b>	Lectura inicial del nivel de agua en el matraz, mL.
<b>S</b>	Masa de la muestra de ensayo, saturada de superficie seca (usada en el método gravimétrico), g.
<b>S1</b>	Masa de la muestra de ensayo, saturada de superficie seca (usada en el método volumétrico), g.
<b>A</b>	Masa de la muestra de ensayo seca al horno, g.
<b>W</b>	Masa de la muestra original, g.
<b>D</b>	Masa de la muestra seca, g.
<b>G</b>	Masa de los agregados más el recipiente, kg.
<b>B</b>	Masa del picnómetro lleno con agua hasta la marca de calibración, g.
<b>C</b>	Masa del picnómetro lleno con la muestra de ensayo y agua hasta la marca de calibración, g.
<b>T</b>	Masa del recipiente.
<b>Mm</b>	Masa del recipiente de medida, kg.
<b>Mc</b>	Masa del recipiente de medida llenado con concreto, kg.
<b>Mt</b>	Masa total de todos los materiales de la amasada, kg.

<b>Y</b>	Rendimiento, volumen de concreto producido por la amasada, m <sup>3</sup> .
<b>V</b>	Volumen del recipiente.
<b>Vm</b>	Volumen de del recipiente de medida, m <sup>3</sup> .

## GLOSARIO

<b>ACI</b>	Siglas en inglés del Instituto Americano del concreto (American Concrete Institute).
<b>Agregado</b>	Material granular empleado con un medio aglutinante para formar concreto hidráulico o mortero.
<b>ASTM</b>	Siglas de la Sociedad Americana para Ensayo y Materiales (American Society for Testing and Materials).
<b>COGUANOR</b>	Comisión Guatemalteca de Normas.
<b>Concreto</b>	Mezcla dosificada de agregados inertes (arena y grava), cemento, agua, aditivos y aire.
<b>Consistencia</b>	Se define a grandes rasgos como la capacidad de colocación de la mezcla de concreto, en la que se involucran propiedades de cohesión y viscosidad, forma parte de la trabajabilidad.
<b>Control de calidad</b>	Acciones para asegurar un control sobre lo que se está ejecutando y suministrando, para asegurar que se está cumpliendo con las especificaciones y normas de aplicación y con las prácticas correctas de ejecución.

<b>Curado</b>	Mantenimiento de condiciones favorables de humedad y temperatura del concreto a tempranas edades, para que desarrolle resistencia y otras propiedades.
<b>Durabilidad del concreto</b>	Capacidad para resistir las acciones del medio, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso que pueda causar deterioro.
<b>f'c</b>	Resistencia a compresión de diseño del concreto.
<b>Fraguado</b>	Condición alcanzada por una pasta cementicia, mortero u hormigón que ha perdido plasticidad hasta un nivel arbitrario, generalmente medido en términos de la resistencia a la penetración o deformación. Fraguado inicial se refiere a la primera rigidización; fraguado final se refiere a una rigidez significativa.
<b>Geología</b>	Es la ciencia que estudia la forma interior del globo terrestre, la materia que lo compone, su mecanismo de formación, los cambios o alteraciones que ha experimentado desde su origen y la colocación que tiene en su actual estado.
<b>Muestra</b>	Grupo de unidades o porción de material tomados de una cantidad mayor de unidades o de material.

<b>Perlita</b>	Roca volcánica vidriosa que puede ser utilizada como sustrato en cultivos hidropónicos, aislante térmico y agregado para concreto liviano, que tiene un contenido de agua relativamente alto. Es un mineral que aparece en la naturaleza y tiene la propiedad poco común de expandirse muchísimo cuando se la calienta lo suficiente.
<b>Porosidad</b>	Estructura física que presenta numerosos poros perceptibles a simple vista.
<b>Relación a-c</b>	Cociente obtenido al dividir el peso del agua por el peso del cemento en el concreto.
<b>Trabajabilidad</b>	Propiedad del concreto o mortero fresco que determina la facilidad y homogeneidad con que se puede mezclar, colocar, compactar y acabar.



## RESUMEN

La perlita expandida tiene una densidad entre 30 y 150 kg/m<sup>3</sup>. La perlita expandida es inerte, su tamaño permanece inalterable, es capaz de un aislamiento térmico superior a muchos de los productos conocidos, es muy liviana y no absorbe agua, tan solo la retiene en su superficie. Estas son algunas propiedades que permiten que la perlita sea empleada como aglomerante en los morteros aislantes y en el concreto ligero. Ya sea como mortero o como concreto, este material puede utilizarse como aislante en relleno de cámaras, en ladrillos refractarios, como recubrimiento térmico y acústico, para nivelar losas, en prefabricados aislantes y ligeros y como protector frente al fuego en estructuras.

En el presente trabajo se caracterizaron mezclas de concreto que contenían diferentes proporciones de perlita expandida, cemento, aditivos y agua. La perlita expandida en el concreto ha sido motivo de estudio anteriormente, sin embargo, los resultados son diversos debido a la materia prima utilizada y otras fuentes de variación. La variación del proporcionamiento de los diferentes materiales que componen el concreto permite modificar considerablemente las características y propiedades en su estado fresco y endurecido. Es necesario establecer una metodología para elaborar y evaluar el concreto, para que pueda implementarse y replicarse en futuras investigaciones o aplicaciones.

Con base en los resultados deseados, componentes del concreto y bibliografía utilizada, se optó por utilizar el nombre establecido por American Concrete Institute (ACI). ACI denomina a este concreto y sus derivados *low-density concrete*, en español: concreto liviano de baja densidad.

Previo a iniciar el desarrollo de las mezclas de concreto, se caracterizó la perlita expandida a utilizar. A pesar de que la composición mineralógica es similar entre las diferentes muestras de perlita alrededor del mundo, es necesario determinar las características y propiedades del material a utilizar. La perlita expandida es un material procesado, por lo que cualquier variación en los procesos de expansión produce cambios en el producto final, sobre todo en su granulometría, masa unitaria y forma del agregado.

El proceso de diseño de mezcla del concreto con perlita expandida no se realizó por métodos convencionales o métodos de otros concretos ligeros, como el concreto celular. Se hizo necesario realizar mezclas de prueba y determinar proporciones que cumplieran con las características requeridas. Un factor determinante es la proporción de los diferentes aditivos a emplear, ya que son componentes muy importantes en este tipo de concreto. Una vez definidas las proporciones, se realizaron mezclas control para evaluar adecuadamente sus características en estado fresco y endurecido.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar mezclas de concreto elaboradas con perlita expandida como agregado, por medio de procedimientos y especificaciones de las normas ASTM y COGUANOR aplicables.

### **Específicos**

1. Caracterizar la perlita expandida como agregado para concreto, con base en procedimientos y especificaciones de las normas ASTM y COGUANOR aplicables.
2. Evaluar los concretos en estado fresco y endurecido por medio de procedimientos y especificaciones de las normas ASTM y COGUANOR aplicables.
3. Determinar las características físicas y propiedades mecánicas de concreto liviano de baja densidad con perlita expandida.



## INTRODUCCIÓN

Actualmente el producto procesado de mayor consumo humano es el concreto, el cual ha marcado una tendencia de crecimiento a lo largo del tiempo. Guatemala no es la excepción para este indicador, esto se debe a la amplia gama de aplicaciones que se ha encontrado para este producto. Esto ha generado la necesidad de contar con materiales que tengan un adecuado desempeño dentro de las mezclas, especialmente los agregados, que conforman la mayor parte del concreto. Según las características de los agregados se puede modificar las características y propiedades de los concretos, proveyendo nuevos usos y aplicaciones.

Existe un sinnúmero de formas de clasificar los tipos de concreto, una de ellas es con base en sus densidades o pesos volumétricos, para los cuales se identifican los concretos ligeros, normales y pesados. Para cada tipo de concreto existen diferentes aplicaciones y métodos de elaboración, cada tipo de concreto se adapta y cumple con diferentes necesidades. Los concretos ligeros serán el punto de partida para investigar y analizar en el presente trabajo de graduación.

Los concretos ligeros son todos aquellos que poseen una densidad menor a  $1900 \text{ kg/m}^3$ . Los concretos ligeros se clasifican según su uso, propiedades y características principales, estos son: concretos de baja densidad, concreto estructural y concreto con resistencia moderada. El enfoque del trabajo de graduación es el estudio de los concretos ligeros de baja densidad, incluyendo sus características, propiedades y diferentes aplicaciones. El concreto de baja densidad tiene pesos unitarios por debajo de los  $800 \text{ kg/m}^3$ .



# **1. ANTECEDENTES**

## **1.1. Antecedentes del concreto liviano**

La existencia y aplicación de concretos livianos data de hace más de 2 000 años. Se han encontrado estructuras hechas en los inicios del Imperio Romano utilizando concreto liviano, las más destacadas son el Panteón de Roma, el Coliseo y el puerto de Porto Cosa.

### **1.1.1. Imperio Romano**

El Panteón de Roma se terminó de construir en el año 27 d. C.; ahí se encuentra un domo de 43,3 metros de diámetro aproximadamente. Para la construcción del domo del Panteón se utilizaron encofrados de madera para dejar huecos que alivianaran la estructura, así como agregados más ligeros que los utilizados en la época.

El Coliseo fue hecho entre los años 75 y 80 a.C., para el cual se utilizó un concreto con agregados provenientes de roca volcánica. Los agregados volcánicos utilizados poseían la característica de ser porosos y algunos de gran tamaño.

En el puerto de Porto Cosa, en el año 237 d.C., se utilizaron agregados naturales provenientes de material volcánico. Los constructores de la época del Imperio Romano descubrieron que los agregados expandidos provenientes de material volcánico aportaban buenas propiedades mecánicas al concreto y permitían disminuir la densidad del concreto debido a su porosidad.

### **1.1.2. Siglo XX**

En la década de 1910, Stephen J. Hayde desarrolló el proceso de horno rotativo para expansión de yeso, arcilla y esquisto. Con la expansión de diferentes materias primas, se obtuvieron materiales con características similares a las de estos en su estado natural, pero de menor peso. Con el desarrollo de este proceso se logró elaborar un concreto liviano con propiedades similares a las de un concreto con los agregados de peso normal.

En el año de 1918 inició el programa Emergency Fleet Corporation (EFC), que pretendía construir 24 barcos para la Primera Guerra Mundial. El programa buscó materiales alternativos para la elaboración de los barcos debido a la escasez del acero. Finalmente se desarrollaron 12 barcos de concreto armado. Se pretendía elaborar un concreto con una densidad de  $1\ 760\ \text{kg/m}^3$  y una resistencia a la compresión de 4 000 psi. El concreto que se desarrolló alcanzó una resistencia a la compresión de 5 000 psi con una densidad de  $1\ 760\ \text{kg/m}^3$ .

En el año de 1928 inició la comercialización de escoria expandida; sin embargo, hasta 1948 se desarrolló el esquisto expandido a nivel comercial con la capacidad de aportar propiedades aptas para el concreto de uso estructural.

Al final de la década de 1940, en Estados Unidos se impulsó el desarrollo de una intensa investigación del concreto ligero. Se realizaron investigaciones para poder determinar y optimizar las propiedades mecánicas del concreto liviano y poder aplicarlo en vivienda para hacer estructuras más eficientes y de menor costo. Para la década de 1950 se desarrollaron marcos estructurales, losas de puentes y elementos preesforzados utilizando concreto liviano. La investigación permitió hacer concretos que fuesen útiles y se desempeñaran adecuadamente

en marcos estructurales, elementos presforzados y especialmente en losas de puentes. Después del colapso del puente Tacoma, se diseñó un concreto liviano para poder hacer una ampliación sin modificar la cimentación.

En la década de 1950 se continuó con la implementación de concreto liviano, aunque enfocado a uso estructural. Un ejemplo de las aplicaciones realizadas es el edificio Prudential Life Building en Chicago con 42 niveles. Las diversas aplicaciones influyeron en el aumento de investigación acerca de las propiedades del concreto liviano.

Se demostró que era más eficiente utilizar un concreto liviano al momento de elaborar estructuras flotantes, especialmente para la industria petrolera. El concreto liviano permite ahorrar hasta un 25 % de la masa utilizada en un concreto normal. Los datos sobre las propiedades del concreto liviano fueron presentados al público en el año de 1992, después de más de 10 años de investigación. La investigación permitió dar a conocer nuevos usos sobre el concreto liviano, en donde demuestra un gran desempeño y gran durabilidad.

## **1.2. Antecedentes del concreto con perlita expandida como agregado**

Se han elaborado una gran cantidad de estudios acerca de la perlita expandida como agregado y su uso como material de construcción. El objetivo final de la mayoría de estas investigaciones es la utilización de la perlita expandida como aislante térmico, ya sea en ladrillos, muros, losas o recubrimientos.

### 1.2.1. Siglo XX

El primer registro de elaboración de concreto con perlita expandida del American Concrete Institute (ACI) es de 1949. En estados Unidos, la Agencia de Financiamiento de Casas y Hogares solicitó al Registro Nacional de Normas un estudio sobre aplicación de agregados livianos en el concreto. El estudio titulado *Lightweight-Aggregate Concrete*, elaborado por Ralph W. Kluge, Morris M. Sparkst y Edward C. Tuma, fue publicado en el año de 1949 en la revista de ACI. En el estudio evaluaron agregados como la vermiculita, perlita expandida, escoria expandida, pómez, arcilla expandida, entre otros. Se evaluaron características de los agregados como peso específico, absorción, fineza y granulometría. La investigación determinó que en las mezclas con agregado liviano es necesario mantener un porcentaje de aire relativamente alto dentro de la mezcla para mejorar la cohesión entre la pasta y los agregados. Para la investigación se desarrollaron 4 mezclas de concreto con perlita expandida. La perlita expandida se utilizó como agregado fino, cada mezcla contenía diferentes dosificaciones de perlita expandida y agregado grueso y a todas se les agregó un incorporador de aire en pequeñas proporciones. Las densidades en estado fresco estuvieron en un rango de 690 a 930 kg/m<sup>3</sup>, mientras que las resistencias estaban entre 95 y 1 120 psi. Se evaluó la conductividad térmica, y mientras mayor era el contenido de perlita expandida, menor era su conductividad térmica. A pesar de que la investigación no estaba enfocada directamente a la perlita expandida, proporcionó información que se replicó en futuras investigaciones y permitió conocer la factibilidad de utilizar la perlita expandida como agregado.

John Brouk realizó uno de los primeros estudios formales relacionados al concreto con perlita expandida en el año de 1954, titulado *Perlite Insulating Concrete*, en la cual desarrolló tres mezclas de concreto para evaluar su costo y comparar la calidad del concreto con agregados de origen diferente. Brouk

concluyó que toda la perlita expandida comercializada en la época difería en sus características, por lo que era necesario determinar la calidad de esta. El estudio propone un patrón de diseño de mezcla y algunas recomendaciones para el proceso de mezclado. Brouk concluyó que la perlita expandida presenta potencial para el desarrollo de concretos aislantes y livianos; sin embargo, concluye que es necesario el desarrollo de investigaciones para ampliar su aplicación.

En 1991, Manjit Singh y Mridul Garg realizaron una publicación titulada *Perlite-based building materials-a review of current applications*. En la investigación se describen las características básicas de la perlita expandida, usos generales de esta en el mundo y sus aplicaciones en la construcción. El documento destaca las propiedades aislantes del material y su peso ligero en relación con otros agregados. El artículo concluye que la perlita expandida es un buen sustituto de la madera en la construcción por su aislamiento acústico, térmico y por ser un material liviano. Así mismo destacaron que la implementación de la perlita expandida aporta propiedades resistentes al fuego y evita agrietamientos en estructuras de concreto.

### **1.2.2. Siglo XXI**

En el 2010, V. Khonsari, E. Eslami y Ah. Anvari, desarrollaron la investigación *Effects of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete* para la Universidad de Tecnología de Teherán, en Irán. Realizaron una serie de ensayos a 7 mezclas de concreto diferentes, entre ellos ensayos a compresión a diferentes edades y con diferentes condiciones de curado, ensayos de tensión indirecta, presión hidrostática y desgaste por sulfatos. Determinaron que, a mayor cantidad de perlita, menor será la resistencia obtenida tanto en compresión como a tensión. Así mismo evaluaron

diferentes fibras, y determinaron que la más adecuada para mejorar las propiedades mecánicas es la fibra metálica con forma ondulada.

En el 2012, Atila Gurhan, Ahmet Mahmut y Gaye Ozgur realizaron un estudio titulado *Expanded Perlite Aggregate Characterization for use as a Lightweight Construction Raw Material*. El estudio buscaba demostrar la sustentabilidad de la perlita expandida como material de construcción. Fueron determinadas diversas propiedades y características de la perlita expandida. Obtuvieron la composición química de la perlita expandida, así como su estructura por medio de análisis petrográficos. Se obtuvo una pérdida de peso de 1,8 % a 1 000 °C, lo que demostró que puede utilizarse en aplicaciones de alta temperatura. Se realizaron ensayos básicos de agregados como gravedad específica, masa unitaria, absorción y granulometría, para los cuales mostró una alta relación estadística en las diferentes muestras y corridas realizadas. Entre otros análisis realizados para la investigación, se menciona el contenido de materia orgánica, módulo de finura y la pérdida de masa por fuego. El estudio concluyó en que la perlita expandida es apropiada para utilizarla como agregado liviano en la construcción por sus propiedades.

Una investigación fue desarrollada por el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto de Estudios Tecnológicos de Sfax, en Túnez en el 2015, titulada *Effect of Expanded Perlite Aggregate Dosage on Properties of Lightweight Concrete*. El estudio se basó principalmente en la evaluación de las diferentes mezclas de concreto y su capacidad como aislante térmico. Lograron elaborar mezclas de concreto de hasta 560 kg/m<sup>3</sup>, las cuales presentaron desventajas en su resistencia a compresión. En conclusión, la investigación demostró que el concreto liviano con perlita expandida contribuye significativamente en sus propiedades térmicas.

Entre las diversas investigaciones con perlita expandida, se han desarrollado pavimentos que contienen esta como agregado. En el 2015 se publicó una investigación titulada *The Evaluation of Performance Properties of Asphalt Concrete with Expanded Perlite*, desarrollada por la Universidad de Eskisehir Osmangazi de Turquía. Elaboraron mezclas de agregado de betún, perlita expandida y agregado, preparadas en diferentes proporciones, las cuales brindaron resultados para ser utilizadas en la capa de desgaste o la capa aglutinante, se examinaron las propiedades mecánicas, características físicas y el rendimiento de las mezclas. El asfalto aumentaba al doble el costo de producción, aunque reduce su peso en 6 veces y se considera que las muestras con contenido adecuado cumplen las condiciones de acuerdo con los resultados de resistencia de Marshall. Puede reducirse el costo por aspectos estructurales como en puentes y viaductos, reduciendo las dimensiones del elemento de soporte.



## **2. PERLITA Y PERLITA EXPANDIDA**

La perlita en general y la perlita expandida son utilizadas en diversas aplicaciones como la construcción, agricultura, medicina y la química. La perlita expandida es un material importante en los temas de construcción, ya que es utilizada como agregado liviano para concretos y morteros. La perlita expandida brinda aislación térmica, resistencia al fuego y otras características que contribuyen al buen desempeño del concreto.

### **2.1. Mineralogía**

La perlita es considerada una roca riolítica, vidriosa, volcánica, que tiene un lustre perlado. La perlita generalmente presenta numerosas fracturas concéntricas semejantes a la piel de una cebolla. Químicamente la perlita es esencialmente un silicato de aluminio amorfo metaestable. Es químicamente inerte y tiene un pH aproximadamente de 7 cuando se pone en solución acuosa.

La perlita posee un contenido de agua relativamente alto. Debido a que es un vidrio, al calentarse a temperaturas entre 760 y 1 100 °C, la perlita se ablanda y el agua atrapada en la estructura del material se evapora, causando que el material se expanda entre 4 y 20 veces su volumen original. Sin embargo, por medio del control de la temperatura y el tiempo de calcinación, ciertas propiedades y el tamaño pueden ser reguladas según las especificaciones del propósito deseado.

La perlita expandida en cuanto a su color y composición química se asemeja en gran parte a la pómez, por lo que es considerada como una pómez

sintética, aunque con muchas más ventajas que la pómez natural. La perlita cruda tiene una apariencia entre transparente grisácea a un negro brillante, mientras que la perlita expandida posee una apariencia blanca o gris clara.

Figura 1. **Morfología de la perlita en su forma de roca, triturada y expandida**



Fuente: CECILIA, Juan; AUTIR, Miguel; LABADIE, Juan; RODRÍGUEZ, Enrique e INFANTES, Antonia. *Volcanic glass and its uses as adsorbent*. p. 23

La revista internacional llamada *Physicochemical Problems of Mineral Processing* cubre enfoques teóricos y sus aplicaciones prácticas en todos los aspectos del procesamiento de minerales y la metalurgia extractiva. Un artículo publicado en el 2013 se enfocó en la perlita expandida para su aplicación como agregado en el concreto. En dicho artículo se muestra un estudio en el que se realizó un análisis químico a 5 muestras diferentes de perlita. En los resultados obtenidos se observó que está compuesto de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en proporciones de 70,68 % y 13,04 %, respectivamente. En la siguiente tabla se muestra los resultados detallados obtenidos del análisis químico.

Tabla I. **Resultados del análisis químico de la perlita expandida**

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	70,68
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	13,04
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3,54
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4,34
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,04
<b>CaO + MgO</b>	3,78
<b>Pérdida en calentamiento</b>	3,08

*Fuente:* CELIK, Atila; KILIC, Ahmet y CAKAL, Gaye. Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material. En: *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. p. 5

## **2.2. Distribución de depósitos**

La perlita se extrae y expande en todo el mundo. Se estima que Estados Unidos es el mayor consumidor y productor de perlita cruda y expandida. Otros países que encabezan la producción de perlita son China, Grecia, Japón, Hungría, Armenia, Italia, México, Filipinas y Turquía.

### **2.2.1. Depósitos de perlita en Guatemala**

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) tiene información de que se han ubicado yacimientos de perlita en Guatemala. El documento *La perlita de Guatemala*, elaborado por Carlos Alvarado Carías en 1988, y *Exploración, caracterización fisicoquímica y estimación de reservas de los depósitos de perlita de Guatemala*, realizado por Percy Tobar en 1997, proporcionan una descripción detallada de las áreas y su litología de los depósitos de perlita en Guatemala. Se

ha localizado y cuantificado la extensión aproximada de los depósitos de perlita en las siguientes áreas:

- Amatitlán. Situada en el departamento de Guatemala, en el municipio de Amatitlán, al sur del lago del mismo nombre. El área abarca una extensión aproximada de 20 km<sup>2</sup>.
- San Antonio La Paz. Se ubica en el departamento de El Progreso, en el municipio de San Antonio La Paz. El área abarca una extensión de 20 km<sup>2</sup>.
- Esquipulas. El área está situada en el departamento de Chiquimula, con una extensión de 30 km<sup>2</sup>.
- Esquipulas-Ipala. Está situada en el departamento de Chiquimula, con una extensión de 10 km<sup>2</sup>.
- Jocotán. El área se ubica en el departamento de Chiquimula y tiene una extensión de 7 km<sup>2</sup>.

### **2.3. Expansión de la perlita**

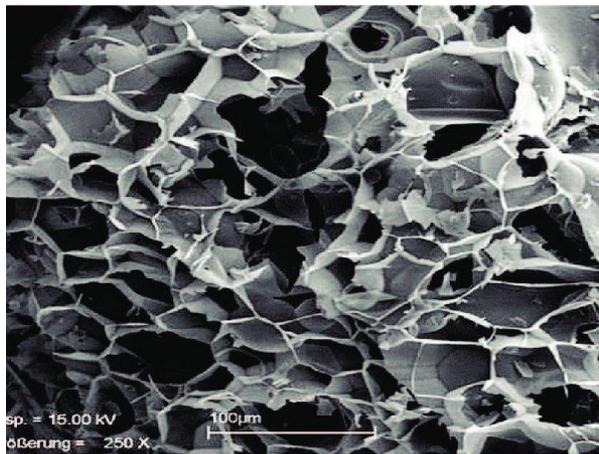
La característica principal de la perlita es su capacidad de expandirse hasta veinte veces su volumen original. Previo al proceso de expansión, el mineral extraído debe someterse a un proceso de limpieza, en el cual se eliminan las impurezas, pasando posteriormente al proceso de trituración.

Para expandir perlita es necesario triturar hasta garantizar la granulometría apropiada y clasificar los diferentes tamaños de partículas dependiendo de los requerimientos de la aplicación. La perlita es calentada a temperaturas superiores a los 400° C para remover la humedad superficial. Las partículas de perlita son evacuadas del horno por medio de un ventilador de succión y luego atraviesan un sistema clasificador tipo ciclón. Dado que la perlita es un vidrio volcánico, puede estar mezclada con partículas no expansibles de obsidiana,

felsita y otros contaminantes, los cuales se deben eliminar en el sistema clasificador por ciclón.

Para el proceso de expansión la perlita se calienta rápidamente hasta temperaturas superiores a los 1 000° C. Esto se logra con hornos rotatorios horizontales o con hornos estacionarios verticales. Se provoca un cambio en su estado fisicoquímico, ya que se evapora bruscamente el agua, estallando la partícula y aumentando de 10 a 20 veces su volumen original. La homogeneidad en la distribución de las partículas es el factor más difícil de conseguir. El aire incorporado se comporta como un aislante de temperatura.

**Figura 2. Imagen de microscopio electrónico de barrido (MEB/SEM) de la perlita expandida**



Fuente: *Fuente:* CELIK, Atila; KILIC, Ahmet y CAKAL, Gaye. Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material. En: *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. p. 8

Finalmente, la perlita expandida es un mineral natural sin ningún tipo de tratamiento químico que requiera la adición de aditivos. Durante el proceso de

expansión, no se generan residuos ni se incorporan elementos contaminantes. Una vez utilizada es por completo reciclable. Tiene una extremada consistencia y elevada durabilidad.

### **2.3.1. Expansión de la perlita en Guatemala**

El MEM ha registrado diferentes eventos en que se ha notificado sobre la extracción y procesamiento de expansión de la perlita en Guatemala. A continuación, se describen los principales eventos relacionados a la extracción y expansión de perlita documentados hasta el año 2007:

- En el Laboratorio de Procesamiento de la Dirección General de Minería se trató de expandir perlita en el año 1997. Por falta de equipo y tecnología apropiadas no se tuvo el éxito deseado.
- En el año 2003 se volvió a estudiar el proyecto. Aún no se contaba con el equipo necesario. Se envió una muestra a Corea con el Dr. Kun Joo Moon, quien fue director del Instituto Coreano de Geología, Minería y Materiales (KIGAM, por sus siglas en inglés). Desafortunadamente, se informó que la muestra recibida no pudo ser expandida, aduciendo que era principalmente obsidiana.
- Continuando con la investigación, se contactó con el Sr. Álvaro González, quien es propietario de un terreno que realizó un proceso de obtención de licencia de explotación denominada Las Cienaguitas, SEXT-566, y que logró realizar exitosamente el proceso de expansión (la licencia fue denegada por traslape total).

El MEM cuenta con registro de las solicitudes realizadas para la extracción de la perlita en el territorio de Guatemala. En la siguiente tabla se muestran las

empresas que han realizado solicitudes hasta el mes de marzo del 2007 para la extracción de perlita:

**Tabla II. Solicitudes que incluyen perlita al mes de marzo 2007**

<b>ID Derecho Minero</b>	<b>Derecho minero</b>	<b>Nombre de la empresa</b>	<b>Municipio(s)</b>
SEXR-037-06	MARCELA I	Lourdes Carola Maldonado Fuentes	Palencia,
SEXR-038-06	MARCELA II	Haudilia Angélica Fuentes Navarro de Maldonado	Palencia y San Antonio La Paz
SEXT-027-06	EL IMPACTO	Peña Rubia, S.A.	San José del Golfo, Palencia, San Antonio La Paz
SEXT-400-R	IMPULGUA	William Dávila Ramos	San Antonio La Paz
SEXT-566-R	LAS CIENAGUITAS II	Álvaro Israel González	San Antonio La Paz y Palencia
SEXT-602-R	EL MONUMENTO I	Herman René Oliva Reyes	Palencia, Guatemala
SEXT-603	ROSA MONICA	Perlita de Guatemala, S.A.	San Antonio La Paz

Fuente: Ministerio de Energía y Minas; Dirección General de Minería; Departamento de Desarrollo Minero. *Solicitudes de perlita.*

## 2.4. Usos de la perlita expandida

Los usos más comunes de la perlita expandida se dan en aplicaciones de aislamiento, la industria petroquímica, la agricultura y en la construcción para elaboración de concreto, repellos y prefabricados.

### 2.4.1. Aplicaciones en la construcción

- Repellos a base de cemento y perlita expandida, ideales para elementos metálicos expuestos a la intemperie que requieren protección para el fuego. Es necesario verificar el proceso adecuado para su aplicación y los aditivos necesarios para garantizar que la adherencia sea la adecuada. Suelen aplicarse en dos o tres capas. En la publicación realizada por Manjit Singh y Mridul Garg titulada *Materiales de construcción basados en perlita: una revisión de la aplicación actual*, describen las proporciones, especificaciones y el curado adecuado para la aplicación de repellos a base de perlita expandida.
- Repellos a base de yeso y perlita expandida, son aplicaciones utilizadas en acabados interiores como en muros, techos, membranas protectoras de fuego y pisos. Los repellos con yeso y perlita expandida son extremadamente livianos, buenos aislantes térmicos y buenas propiedades de absorción acústica. El repello es mezclado únicamente con agua y puede ser aplicado a todo tipo de concreto y mampostería. Pueden aplicarse aditivos para garantizar una buena trabajabilidad.
- Concreto con perlita expandida como agregado es utilizado para temas de aislamiento térmico. Presenta densidades muy bajas entre  $400 \text{ kg/m}^3$  y  $1600 \text{ kg/m}^3$ , según los materiales utilizados y sus proporciones. Existe concreto estructural con perlita expandida con densidades superiores a 1

120 kg/m<sup>3</sup>, la mezcla consiste en sustituir la mitad de la perlita expandida por otro agregado fino de densidades y pesos estándar.

- Mortero liviano para pega de azulejo, en el cual se sustituye la arena por perlita expandida en morteros de pega de azulejo o piso cerámico. Utilizar perlita expandida permite reducir costos y mejores resultados en la instalación de azulejos. El mortero utilizado es liviano aislante de calor y frío, resistente a grietas, de calidad uniforme, aislante acústico, a prueba de humedad y fácil de usar.
- *Clinker* para cemento con perlita. En Japón se patentó la producción de *clinker* para cemento de alta resistencia (6 670 psi a 28 días), dicho *clinker* se produce con la calcinación de la mezcla de piedra caliza, arcilla, perlita y cloruro de calcio a temperaturas relativamente bajas (1 050-1 150°C).

Figura 3. **Recubrimiento de mortero con perlita en estructura metálica para protección contra el fuego**



Fuente: Grupo Prointex. *Mortero de perlita y vermiculita*.

<https://www.grupointex.com/mortero-de-perlita-y-vermiculita/>. Consulta: octubre de 2019.

#### 2.4.2. Aplicaciones en horticultura

La horticultura comprende la producción y comercialización de hortalizas destinadas para consumo. La perlita expandida es usada como un componente en mezclas para crecimiento sin suelo. Permite la aireación y retención óptima de humedad para un crecimiento superior de las plantas. Otros beneficios de la perlita expandida en horticultura son su pH neutro y el hecho de que es estéril y libre de malas hierbas. Su peso liviano hace que sea ideal para hacer crecimiento de vegetales en recipientes. Entre otras aplicaciones, en horticultura es utilizada como extensor o portador para fertilizantes, herbicidas y pesticidas y como semilla o núcleo de peletización.

Figura 4. Cultivo de tomate en perlita expandida



Fuente: *Cultivos en perlita*. <https://www.hortalizas.com/cultivos/cultivos-en-perlita-parte-12/>.

Consulta: octubre de 2019.

### **2.4.3. Aplicaciones en industriales**

Las aplicaciones industriales para perlita expandida son muy diversas. Se puede mencionar que se utiliza desde rellenos de alto rendimiento para plásticos hasta cementos para pozos de petróleo, agua y geotérmicos. Algunas otras aplicaciones incluyen su uso como un medio de filtro para productos farmacéuticos, productos alimenticios, químicos y agua para sistemas municipales y piscinas de natación. Otras aplicaciones incluyen su uso como abrasivo en jabones, limpiador y pulidor y una variedad de aplicaciones en fundición, utilizando las propiedades aislantes de la perlita y alta resistencia al fuego.

## **2.5. Especificaciones para los agregados livianos según norma ASTM C332**

La especificación ASTM C332 se titula *Especificación Estándar de Agregado Liviano para Concreto Aislante*. La norma mencionada especifica ciertos agregados para los cuales aplican las distintas recomendaciones para evaluar la calidad de los agregados, entre ellos la perlita expandida. En la especificación se define la clasificación a utilizar, las características físicas que debe cumplir el agregado y los procesos para evaluar correctamente el agregado.

### **2.5.1. Clasificación**

La norma divide en dos grupos generales los agregados que pueden ser evaluados según las especificaciones descritas. Los grupos de clasificación son los siguientes:

- Grupo I: agregados conformados por productos expandidos como la perlita y la vermiculita.

- Grupo II: agregados preparados por expansión, calcinación o sinterizado. En este grupo se encuentran la escoria de alto horno, arcilla, diatomita, ceniza o esquisto. También incluye agregados preparados por procesos naturales como la pómez, escoria o la toba.

Según el tipo de agregado se pueden realizar concretos de distintas densidades. En el caso de utilizar agregados del grupo I, se pueden producir concretos con densidades entre 240 y 800 kg/m<sup>3</sup> y tendrán un coeficiente térmico de 0,065 a 0,22 W/m\*K. Si se utilizan agregados del grupo II, el concreto resultante tendrá una densidad de 720 a 1 440 kg/m<sup>3</sup> y un coeficiente térmico de 0,15 a 0,43 W/m\*K.

## **2.5.2. Características físicas de los agregados livianos**

La norma ASTM C332 cubre únicamente la evaluación de la granulometría, el aislamiento y la densidad aparente de los agregados.

### **2.5.2.1. Granulometría**

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices. El tamaño de las partículas del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas. Los siete tamices normalizados para el agregado fino tienen aberturas que varían de 150 µm a 9,5 mm, mientras que el agregado grueso se ensaya con 13 tamices estándar, con aberturas que varían de 1,18 mm a 100 mm. La norma ASTM C332 indica que los agregados livianos para los concretos aislantes deberán cumplir con los requerimientos granulométricos de la siguiente tabla.

Tabla III. **Granulometrías requeridas para agregados livianos de concreto aislante (ASTM C332)**

Tamaño nominal	Porcentajes (masa) que pasa los tamices con aberturas cuadradas								
	19,00 mm 3/4 pulg.	12,5 mm 1/2 pulg.	9,5 mm 3/8 pulg.	4,75 mm No.4	2,36 mm No. 8	1,18 mm No. 16	600 $\mu$ m No. 30	300 $\mu$ m No. 50	150 $\mu$ m No. 100
<b>Grupo I</b>									
Perlita	-	-	-	100	85 a 100	40 a 85	20 a 60	5 a 25	0 a 10
Vermiculita (gruesa)	-	-	100	98 a 100	60 a 100	30 a 85	2 a 45	1 a 20	0 a 10
Vermiculita (fina)	-	-	-	-	100	85 a 100	35 a 85	2 a 40	0 a 10
<b>Grupo II</b>									
Agregado fino	-	-	100	85 a 10	-	40 a 80	-	10 a 35	5 a 25
Agregado grueso	100	90 a 100	40 a 80	0 a 20	-	-	-	-	-
9.5 a 2.36 mm	-	100	80 a 100	5 a 40	0 a 20	-	-	-	-
4.75 a 2.36 mm	-	-	100	90 a 100	0 a 20	-	-	-	-

Fuente: Sociedad Americana para Ensayo y Materiales. *ASTM C332-09. Especificación estándar para agregados livianos para concreto aislante.* p. 2

La norma recomienda que se debe mantener continuo control sobre el agregado. En caso el módulo de finura del agregado fino variara por más del 7 % de la muestra patrón, el lote del agregado utilizado debe ser rechazado a menos que sea comprobable que la calidad del concreto no es alterada.

### **2.5.2.2. Propiedades aislantes**

La norma indica que deberá evaluarse la calidad de las propiedades aislantes del concreto resultante, no del agregado. Para evaluar la conductividad térmica del concreto debe aplicarse la norma ASTM C177, exceptuando la preparación de la muestra.

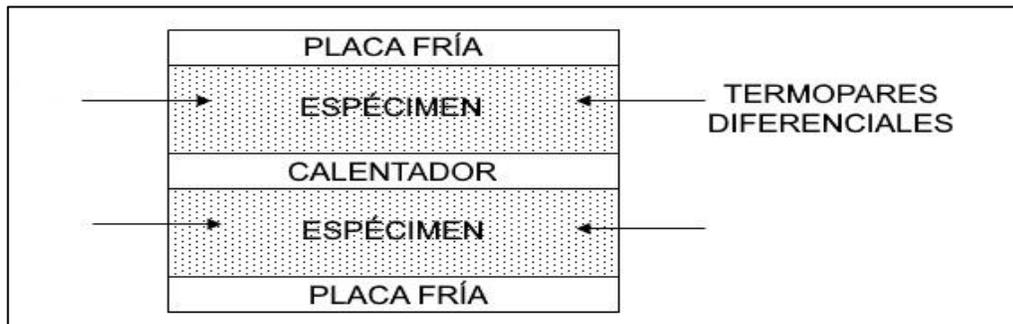
La muestra por evaluar deberá ser curada en un ambiente suficientemente húmedo por 7 días. Una vez cumplidos 7 días de elaboración de la muestra, se deberá mantener en condiciones de  $23 \pm 1,7$  °C y humedad relativa del 50 % hasta el día de la prueba. Cuando la mezcla tenga 28 días, se debe secar en un horno a  $110 \pm 10$  °C en intervalos de 24 horas hasta que la variación de la masa no exceda el 1 %.

La prueba consiste en elevar la temperatura del espécimen a evaluar y se rodea de una guarda, controlada con termopares diferenciales. El ensayo requiere dos muestras previamente curadas y preparadas según las especificaciones. Durante el ensayo se deberá garantizar cumplir con condiciones de estado permanente, flujo de calor unidimensional en la región de medición, evaluar la temperatura de las placas y su espesor, así como conocer cualquier parámetro que pueda afectar el flujo unidireccional del área de medición de la muestra. El método de la placa caliente con guarda descrito en la norma ASTM C177 tiene tres categorías para realizar la evaluación. Los métodos descritos por dicha norma son los siguientes:

- Aparatos que operan alrededor de las condiciones ambientales.
- Aparatos que operan debajo de la temperatura ambiente (aproximadamente  $-180$  °C).

- Aparatos que operan a altas temperatura (aproximadamente 600 °C y superiores).

Figura 5. **Diagrama del método de la placa caliente para determinar conductividad térmica (ASTM C177)**



Fuente: Sociedad Americana para Ensayo y Materiales. *ASTM C177. Diagrama de placa.*  
<https://nptel.ac.in/courses/105103025/module5/lec39/2.html>. Consulta: octubre de 2019.

### 2.5.2.3. Densidad aparente

La densidad aparente es la masa por unidad de volumen ocupado por el conjunto de partículas del agregado a granel, incluyendo el volumen de las partículas individuales y el volumen de los vacíos entre las partículas. Anteriormente era conocida como masa unitaria o masa volumétrica, sin embargo, es un término que ha quedado fuera de uso.

El método para determinar la densidad aparente permite calcular el porcentaje de vacíos entre las partículas. La cantidad de vacíos entre las partículas afecta la demanda de pasta en el diseño de la mezcla. La cantidad de vacíos varía de cerca del 30 % a 45 % para el agregado grueso y de cerca del 40 % a 50 % para el agregado fino. El valor de la densidad aparente del agregado posee diversas aplicaciones para cálculos y control de calidad. La densidad

aparente permite proporcionar los materiales al momento de realizar un diseño de mezcla. También puede utilizarse para determinar las relaciones masa/volumen y realizar conversiones necesarias para evaluar costos y cantidades necesarias de material. La norma ASTM C332 indica que para determinar la densidad aparente para agregados livianos y el contenido de vacíos debe aplicarse la norma ASTM C29. En la norma ASTM C332 se indican los requerimientos que debe cumplir el agregado liviano en cuanto a su densidad aparente, a continuación, se presentan los datos indicados en dicha tabla.

**Tabla IV. Requerimientos de la densidad aparente para agregados livianos de concreto aislante (ASTM C332)**

Designación	Masa Unitaria Seca lb/ft <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	
	Min.	Max.
Grupo I		
Perlita	7,5 (120)	12 (196)
Vermiculita	5,5 (88)	10 (160)
Grupo II		
Agregado fino	-	70 (1120)
Agregado grueso	-	55 (880)
Agregado Fino y Grueso	-	65 (1040)

Fuente: Sociedad Americana para Ensayo y Materiales. *ASTM C332-09. Especificación estándar para agregados livianos para concreto aislante.* p. 2

### 3. CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD

La Asociación de Concreto Portland (PCA) establece que el concreto es una mezcla de agregados y pasta. En el concreto tradicional, la pasta está compuesta por cemento, agua y aire. La pasta une los agregados finos (arena) y agregados gruesos (piedrín). Se han desarrollado concretos con diferentes características que varían en resistencia, densidad y componentes. En los distintos tipos de concreto está el concreto liviano de baja densidad.

#### 3.1. Definición de concreto liviano de baja densidad

La definición dada por American Concrete Institute (ACI) establece que el concreto liviano de baja densidad está compuesto por lo menos con cemento hidráulico, agua, aditivos y aire, debe tener una densidad seca al horno igual o menor a  $800 \text{ kg/m}^3$ . Las mezclas de concreto liviano de baja densidad pueden contener agregados u otros componentes como fibras.

Figura 6. **Componentes del concreto liviano de baja densidad (cemento, perlita expandida, aditivos y microfibras)**



Fuente: elaboración propia.

## **3.2. Composición del concreto liviano de baja densidad**

La composición de este tipo de concreto se describe a continuación.

### **3.2.1. Cemento**

Los cementos hidráulicos se componen principalmente de calcio, sílice, alúmina y hierro. Los cementos al reaccionar con el agua inician un proceso de rigidización y endurecimiento que se conoce como el fraguado. Una vez haya fraguado y endurecido, inicia un desarrollo progresivo de la resistencia.

Los cementos en Guatemala deben cumplir con los requerimientos de la COGUANOR NTG 41095 (ASTM C 1157-Especificaciones de Desempeño para los Cementos Hidráulicos). Los cementos pueden incluir en sus componentes puzolana, escoria, otro tipo de cemento hidráulico o alguna combinación de estos.

Los tipos de cemento hidráulico se clasifican de acuerdo con las propiedades específicas de cada uno. Para elaborar un concreto celular o ligero se utiliza cemento de alta resistencia inicial que permite presentar un desarrollo óptimo a edades tempranas.

### **3.2.2. Agua**

Para la elaboración de mezclas de concreto cualquier agua que sea potable y no tenga olor o presente un fuerte sabor puede ser utilizada. El agua deberá estar libre de aceites, ácidos, álcalis, sales o materia orgánica. La COGUANOR NTG 41073 (ASTM C 94) establece los criterios de aceptación del agua para poder utilizarla en una mezcla de concreto. En dado caso el agua no

sea potable, será necesario evaluar su calidad. Si presenta exceso de impurezas puede verse afectado el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto, y puede haber aparición de eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad de volumen y disminución de durabilidad.

### **3.2.3. Agregados**

El concreto liviano de baja densidad puede o no contener agregados. Los agregados utilizados deben cumplir con las especificaciones de la ASTM C 332, *Especificaciones de Norma para Agregados Livianos para Concreto Aislante*.

Los agregados en el concreto liviano de baja densidad pueden utilizarse cuando se busca alcanzar asentamientos menores y que no se pierda humedad en climas cálidos. Es importante evaluar las propiedades y compatibilidad de los agregados, ya que influyen fuertemente en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido.

Los agregados para concreto liviano deberán estar compuestos primordialmente por material liviano celular y material granular inorgánico. Los agregados deben ser evaluados de sus propiedades para optimizar su uso.

### **3.2.4. Aditivos**

Los aditivos son sustancias que reaccionan con el cemento, los agregados y el agua, modificando las cualidades del concreto. Los aditivos pueden incorporar aire, acelerar o retardar el fraguado, reducir la contracción plástica, añadir color al concreto, aumentar la fluidez e la mezcla, evitar la corrosión en el concreto ya endurecido, mejorar la adherencia, impermeabilizar el concreto al endurecer, entre otras funciones.

El concreto liviano de baja densidad requiere de vacíos en su interior para poder obtener las bajas densidades requeridas. Para poder tener más vacíos en el interior de la mezcla es necesario incorporar aire o agentes espumantes. Existen una gama de aditivos que ofrece el mercado para la incorporación de aire en las mezclas. Al incorporar aire en una mezcla se mejora la durabilidad en ambientes sujetos a congelación y deshielo, sales, sulfatos y ambientes álcalis reactivos, estos aditivos también mejoran la durabilidad del concreto.

**Figura 7. Ampliación 16X del concreto liviano de baja densidad, permite ver los vacíos incorporados al concreto**



Fuente: elaboración propia.

En el concreto liviano de baja densidad se requiere que la relación agua-cemento sea controlada minuciosamente, para prevenir exceso de agua y poder

alcanzar resistencias mayores y obtener mejores propiedades del concreto. Dependiendo el tipo de agregado a utilizar, es necesario adicionar un aditivo que permita usar menos agua y aumentar la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco. Existen diversos tipos de aditivos reductores de agua. Algunos permiten reducir el agua en un 5 % o en hasta un 12 %, así como acelerar o retardar el tiempo de fraguado del concreto en estado fresco.

### **3.2.5. Fibras**

Las fibras para el concreto pueden ser de acero, plástico, vidrio o materiales naturales. Entre las fibras más usadas poseen longitudes de 60 mm a 150 mm y espesores de 0,005 mm a 0,75 mm, con formas cilíndricas, llanas u onduladas. Las fibras aportan al concreto las propiedades físicas de sí mismas y del material de origen.

Las fibras se añaden al concreto durante el proceso de mezclado. Las fibras se deberían mezclar de forma aleatoria en toda la sección del concreto. Se suelen incorporar al concreto en volúmenes bajos, usualmente menores a 1 %, aunque en algunos casos, y dependiendo de la aplicación, este porcentaje puede subir incluso hasta 2 %. Las fibras no optimizan considerablemente la contracción del concreto, sin embargo, al ser utilizadas en las cantidades adecuadas, aumentan la resistencia al agrietamiento y disminuyen la abertura de las fisuras.

La selección de la fibra a utilizar depende de la aplicación deseada del elemento a elaborar. Es necesario añadir fibras en el concreto liviano con baja densidad para mejorar la resistencia a la flexión, tensión, impacto, fatiga, desprendimiento y absorción de energía.

### **3.3. Características físicas del concreto liviano de baja densidad**

Son las siguientes:

#### **3.3.1. Densidad**

Por definición se comprende que la densidad es la cantidad de masa contenida en un volumen conocido. La densidad debe ser determinada en el punto de colocación, es decir su densidad en estado fresco. Para determinar la densidad en estado fresco es necesario utilizar una tara con volumen y peso conocido y realizar el procedimiento descrito en la norma COGUANOR NTG 41017h5 (ASTM C 138).

Es necesario determinar la densidad en estado fresco del concreto liviano de baja densidad, ya que permite tener un control de calidad que garantice uniformidad y adecuado proceso de mezcla. Los procedimientos para muestreo y evaluación del concreto liviano de baja densidad se describen en la norma ASTM C 513.

#### **3.3.2. Densidad seca al horno**

Por densidad seca al horno se comprende que el espécimen ha sido secado por calentamiento en un horno por tiempo suficiente para alcanzar una masa constante. Para la evaluación de la densidad seca al horno se debe realizar los procedimientos descritos en la norma ASTM C 796 y ASTM C 495. Por definición, la densidad seca al horno de un concreto liviano de baja densidad deberá ser igual o menor a 800 kg/m<sup>3</sup>.

### **3.3.3. Contracción por secado**

Diferentes estudios lograron determinar que la contracción es alrededor de 0,30 a 0,60 % en un ambiente con 50 % de humedad relativa durante 6 meses. Para evitar la contracción se adicionan fibras a la mezcla que reduzcan estos efectos. En caso sea necesario determinar el valor de la contracción por secado de concretos ligeros, debe ser determinado con la norma ASTM C 426 o ASTM C 341.

### **3.3.4. Expansión térmica**

En cualquier material, la posición de los átomos cambia con la variación de la energía almacenada. La mayoría de los materiales, al someterse a temperaturas altas, se expanden y se contraen cuando la temperatura disminuye. De igual manera sucede con el concreto. El coeficiente de expansión térmica en los concretos ligeros varía proporcionalmente con la densidad, su valor usual es de 9,0 a 12,6 x 10<sup>-6</sup> por °C (5,0 a 7,0 x 10<sup>-6</sup> por °F).

### **3.3.5. Conductividad térmica**

Debido a la composición del concreto liviano y su gran cantidad de aire y vacíos, permite que sea un material con gran capacidad de aislamiento térmico. El aislamiento térmico es inversamente proporcional a la conductividad térmica. La conductividad térmica es la capacidad de transmitir el calor a través de ellos. Para los concretos ligeros, el valor de la conductividad térmica varía entre 0,11 a 0,20 w/(m x K).

La conductividad térmica de una mezcla de concreto liviano se deberá determinar aplicando la norma ASTM C177 o, como se indica en ASTM C518,

utilizando el Guarded Hot Plate. Si el concreto a evaluar no aplica las normas anteriores, se puede utilizar como referencia general la tabla 3.3 de ACI 523.2R y de ACI 523.1R.

### **3.3.6. Resistencia al fuego**

Para determinar la resistencia al fuego se utiliza la norma ASTM E 119. La norma indica que el concreto es sometido a su carga de diseño y luego a un incremento de temperatura, en donde resiste el contacto con las llamas o gases a altas temperaturas.

Los ensayos de resistencia al fuego han sido aplicados a muros, pisos y uniones de losas elaboradas con concreto liviano de baja densidad. Debido a su baja conductividad térmica, el concreto liviano de baja densidad posee alta resistencia al fuego. Cada mezcla de concreto difiere de su resistencia al fuego según los componentes que contenga.

## **3.4. Propiedades mecánicas del concreto liviano de baja densidad**

Estas propiedades son las siguientes:

### **3.4.1. Resistencia a la compresión**

Es necesario evaluar la resistencia a compresión del concreto para verificar que la mezcla de concreto cumpla con la resistencia especificada y mantener el control de calidad. Es necesario conocer la resistencia a diferentes edades de una mezcla de concreto para estimar la resistencia en estructuras, programar las operaciones de construcción como desmontaje de la formaleta o evaluación de criterios de curado y protección de la estructura.

Una cualidad importante del concreto liviano de baja densidad es la relación de su resistencia a compresión y su densidad en estado fresco. La relación densidad-resistencia a compresión suele estar en un rango de 0,8, sin embargo, este dato varía en función de los componentes de la mezcla.

Para determinar la resistencia a compresión del concreto liviano de baja densidad se debe aplicar la norma ASTM C 796 y ASTM C 495. La norma indica que los especímenes deberán ser secados al horno, previo a ser evaluados a compresión. Según la resistencia obtenida, el concreto liviano de baja densidad puede ser utilizado en aplicaciones geotécnicas, estructurales o aplicaciones especiales como para absorción de energía, mitigación de impacto, recubrimientos aislantes, entre otros.

### **3.5. Mezclado de concreto liviano de baja densidad**

Las proporciones de los materiales utilizados para la elaboración de concreto liviano de baja densidad deben ser pesados en una balanza calibrada en el sitio a realizarse la mezcla. Las cantidades de los diferentes materiales a utilizar son críticas para poder alcanzar la densidad de diseño y poder reproducir continuamente el diseño de mezcla deseado. Todo el equipo calibrado a utilizar debe ser verificado previo a iniciar el proceso de elaboración.

Es necesario realizar el proceso de mezcla del concreto liviano de baja densidad mecánicamente, para poder obtener una mezcla homogénea y la consistencia deseada para su colocación.

En el ACI 523.1R-06, *Guide for Cast-in-place Low-Density Cellular Concrete*, se recomienda iniciar el proceso de mezclado agregando parte del

agua de la mezcla y los materiales secos, iniciando por los agregados y fibras en caso se utilicen y luego el cemento. Una vez mezclado homogéneamente todos los materiales y toda el agua requerida, agregar los aditivos o agentes espumantes. Según las diferentes condiciones que se presenten y los requerimientos de la mezcla, los materiales y aditivos deberán ser añadidos en la secuencia requerida para alcanzar las características requeridas al momento de la colocación.

Es recomendable utilizar una mezcladora de alta velocidad. Las mezcladoras de concreto normales no mezclan los materiales correctamente por su velocidad y acción de mezclado. Las mezcladoras de alta velocidad permiten que los aditivos reaccionen en tiempos más cortos y se alcance la consistencia requerida. En caso se utilice una mezcladora de concreto normal, se deberá evitar el exceso de mezclado, ya que puede producir cambios en la consistencia y la densidad.

### **3.6. Colocación del concreto liviano de baja densidad**

Para la colocación del concreto liviano de baja densidad se debe asegurar que sea colocado en capas uniformes. Las diferentes capas de concreto deberán ser colocadas progresivamente. El concreto liviano de baja densidad permite la utilización de bombas para su colocación. En caso se utilicen bombas, deberán ser una bomba de cavidad progresiva o una bomba peristáltica. La abertura de la bomba deberá ser de 2 a 2,5 pulgadas. El concreto liviano de baja densidad permite ser bombeado en distancias de hasta 460 metros de longitud.

### **3.6.1. Colocación en climas de bajas temperaturas**

Se consideran climas de bajas temperaturas cuando el ambiente se encuentre a 4 °C o menos. Se debe tomar en consideración la temperatura al momento de colocación del concreto y ocho horas después. Es necesario tomar las precauciones pertinentes según las condiciones de colocación. El alto contenido de cemento en las mezclas puede afectar las características térmicas del concreto endurecido si las condiciones climáticas no son las adecuadas.

En el ACI 523.1R-06 se recomienda que se evite la colocación del cemento en caso las condiciones climáticas presenten lluvias o nieve. El lugar de colocación no deberá tener un exceso de agua o escarcha provocado por el clima frío. En caso sea inevitable, en algunas de las condiciones climáticas que se describen anteriormente se deberán utilizar aditivos o espumantes que sean adecuados para condiciones climáticas frías.

### **3.6.2. Colocación en climas de altas temperaturas**

Se consideran climas de altas temperaturas cuando el ambiente se encuentre a 38 °C o más. En el ACI 523.1R-06 se describen las siguientes recomendaciones cuando las condiciones climáticas sean consideradas altas temperaturas:

- Colocación del concreto antes del amanecer.
- Agregar agregados como vermiculita o perlita para mantener la consistencia de la mezcla.
- Añadir fibras a la mezcla para contrarrestar efectos de la contracción plástica.

- Una vez colocado, se recomienda humedecer la superficie una vez alcanzado el punto de fraguado.
- Utilizar aditivos o espumantes que sean adecuados para condiciones climáticas de alta temperatura.

### **3.7. Acabado del concreto liviano de baja densidad**

Para brindar un acabado adecuado es suficiente con utilizar un flotador para concreto o una llana, dependiendo del área a realizar respectivamente. Según el uso y la aplicación, se determina el espesor para aplicar, así como la pendiente mínima que se deberá utilizar.

En el caso de que se utilice para losas o recubrimiento de cubiertas, se deberá utilizar una pendiente del 2 %; sin embargo, es posible realizar pendientes más pronunciadas por las características del concreto liviano de baja densidad en estado fresco. Se debe procurar evitar zonas con desniveles, ya sea mayores o menores en la superficie, para evitar dañar la planicidad de la membrana del techo.

En caso el concreto liviano de baja densidad sea aplicado en obras geotécnicas, el ACI 523.1R-06 recomienda espesores de 0,6 a 1,2 metros. Se puede emplear en mayores o menores espesores si las especificaciones lo indican según las condiciones de la obra. Se considera una tolerancia de hasta 3 cm en cuanto a la variación de espesores, debido a la cantidad de cemento que contiene la mezcla, por lo que puede existir una considerable contracción plástica en superficies grandes.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ENSAYOS REQUERIDOS

Es necesario establecer la metodología a utilizar para evaluar las mezclas de concreto liviano de baja densidad, para que pueda replicarse en futuras investigaciones o aplicaciones. El siguiente capítulo establece las normas de American Society for Testing and Materials (ASTM), Normas Técnicas Guatemaltecas COGUANOR (NTG) y guías establecidas por American Concrete Institute (ACI) aplicables y utilizadas para muestreo, caracterización y evaluación de los materiales utilizados en el concreto elaborado. Se debe garantizar las condiciones establecidas en las normas y cumplir con los procedimientos requeridos.

### 4.1. Caracterización de la perlita

Debido a la importancia y la presencia que poseen los agregados en el concreto, es necesario el adecuado control de calidad en los mismos. Los agregados poseen una gran cantidad de características y propiedades que deben ser evaluadas. En el libro de *Control de Mezclas de Concreto* publicado por PCA se indican las características más importantes a evaluar de los agregados para el concreto. Las características descritas por este documento son:

- Resistencia a la abrasión y degradación; índice de la calidad del agregado por su resistencia al desgaste para pisos y pavimentos.
- Resistencia a congelación-deshielo; evaluar el descascaramiento superficial, aspereza, pérdida de sección y estética.

- Resistencia a desintegración por sulfatos; evaluar la resistencia del agregado ante la intemperie.
- Forma y textura superficial de las partículas; permite predecir la trabajabilidad del concreto en estado fresco.
- Granulometría; puede definir de igual forma la trabajabilidad del concreto y evaluar el aspecto económico al momento de realizar una mezcla.
- Degradación del agregado fino, evaluar esta característica ayuda a prevenir utilizar agregados que presenten degradación en el proceso de mezclado.
- Contenido de vacíos no compactados del agregado fino; de igual forma permite predecir la trabajabilidad del concreto en estado fresco.
- Densidad aparente; es necesario determinarla para realizar el diseño de mezcla.
- Masa específica relativa; dato necesario para realizar un diseño de mezcla y clasificar el agregado.
- Absorción y humedad superficial; utilizado para control de calidad de los agregados y mantener una adecuada relación agua-cemento.

La perlita expandida no es un agregado de peso normal, por lo que no son aplicables todos los ensayos para su caracterización. Sin embargo, es necesario el minucioso control del agregado para su uso en el concreto.

#### **4.1.1. Granulometría y módulo de finura (COGUANOR NTG 41010 h1 / ASTM C 136)**

En la norma se describe el método de ensayo para determinar la distribución por tamaño de partículas de agregados finos y gruesos por medio del método de tamizado. El ensayo consiste en utilizar una muestra de agregado seca de masa conocida y separar por medio de mallas con aberturas progresivamente más pequeñas para determinar la distribución por tamaño de

partículas. Es necesario que el equipo a utilizar cumpla con las exactitudes requeridas por la norma, así como las lecturas necesarias para la validación de los datos.

#### **4.1.1.1. Equipo**

- Balanzas. Para agregado fino, legible a 0,1 g y exactitud de 0,1 g o 0,1 % de la masa de ensayo. Para agregado grueso, o mezcla de agregado grueso y fino, legible y exactitud de 0,5 g o 0,1 % de la masa de ensayo.
- Tamices. Cada tamiz utilizado deberá estar elaborado con un marco sólido al cual deberá estar anclado el cedazo o malla y garantizar que se impida la pérdida de material en la unión del marco y la malla. El cedazo y los marcos de tamices deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM E11.
- Agitador mecánico de tamices. Debe garantizar que las partículas reboten, caigan o giren de manera que presenten diferentes orientaciones a la superficie de tamizado.
- Horno. El horno debe mantener una temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.1.1.2. Muestra a utilizar**

- Agregado fino. La muestra de ensayo después de haber sido secada debe ser de 300 g como mínimo.
- Agregado grueso. La muestra de ensayo para el agregado grueso es en función del tamaño máximo nominal del agregado. La siguiente tabla indica la masa de muestra requerida según su tamaño máximo nominal.

Tabla V. **Masa de la muestra para ensayo de granulometría del agregado grueso seco**

Tamaño nominal máximo de aberturas cuadradas			
mm	pulg	kg	lb
9,5	0,375	1	2
12,5	0,500	2	4
19,0	0,750	5	11
25,0	1,000	10	22
37,5	1,500	15	33
50,0	2,000	20	44
63,0	2,500	35	77
75,0	3,000	60	130
90,0	3,500	100	220
100,0	4,000	150	330
125,0	5,000	300	660

Fuente: Sociedad Americana para Ensayo y Materiales. *ASTM C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. p. 8

#### **4.1.1.3. Procedimiento**

- Secar la muestra según la masa requerida hasta alcanzar masa constante en un horno a temperatura constante a  $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Seleccionar los tamices con las aberturas adecuadas. Ordenar los tamices en orden de tamaño decreciente de arriba hacia abajo y colocar la muestra en el tamiz superior.
- La cantidad de material retenida en cada tamiz una vez terminado el proceso debe ser controlada. Se debe evitar el exceso de material en cada tamiz para garantizar que las partículas tengan contacto con las aberturas de los tamices repetidas veces durante el proceso. En el caso de los tamices con aberturas más pequeñas que 4,75 mm, la cantidad retenida en

cualquier tamiz al completar la operación de tamizado no debe exceder 7 kg/m<sup>2</sup> del área superficial de tamizado. Para tamices con aberturas de 4,75 mm y mayores, la cantidad retenida en kg no debe exceder el producto de 2,5 x (abertura del tamiz, en mm) x (área efectiva de tamizado, en m<sup>2</sup>).

- Realizar el proceso de tamizado utilizando el agitador mecánico. Debe agitarse mecánicamente en un periodo razonable de tiempo, el criterio de aceptación es que después de terminar el tamizado, no más del 1 % en masa del material retenido en cualquier tamiz individual, pueda pasar ese tamiz, durante un minuto adicional de tamizado manual continuo.
- Determinar la masa retenida en cada tamiz mediante la balanza que cumpla los requisitos de la norma. La suma de la masa total retenida en los tamices una vez finalizado el proceso no debe diferir por más del 0,3 % de la masa de la muestra original.

#### **4.1.1.4. Cálculos**

Calcular los porcentajes que pasan, retenidos totales o los porcentajes de las varias fracciones por tamaño. Se debe informar los porcentajes al número entero más cercano, excepto si el porcentaje del material que pasa la malla de 75 µm (No. 200) es menor al 10 %, en cuyo caso debe reportarse al 0,1 % más cercano.

En caso sea requerido, se debe calcular el módulo de finura. Para determinar el módulo de finura se debe sumar los porcentajes totales de material de la muestra (porcentajes retenidos acumulados), que sean más gruesos que cada uno de los siguientes tamices: 150 µm (No. 100), 300 µm (No.50), 600 µm (No. 30), 1,18 mm (No.16), 2,36 mm (No. 8), 4,75 mm (No. 4), 9,5 mm ( $\frac{3}{8}$  pulg.), 19,0 mm ( $\frac{3}{4}$  pulg), 37,5 mm (1  $\frac{1}{2}$  pulg.) y mayores; y dividir esta suma entre 100. Se debe informar el módulo de finura, cuando se requiera, al 0,01 más cercano.

#### **4.1.2. Densidad aparente (COGUANOR NTG 41010-h2 / ASTM C29)**

La norma establece los métodos para determinar la densidad aparente (peso unitario) de los agregados en condición compactada y suelta.

##### **4.1.2.1. Equipo**

- Balanzas. Legible a 0,05 kg y exactitud de 0,1 % de la carga del ensayo. Considerar el rango del uso se extiende desde la masa del recipiente vacío a la masa del recipiente más su contenido a 190 kg/m<sup>3</sup>.
- Varilla apisonadora. Varilla de acero, lisa de sección circular de 16mm de diámetro y aproximadamente 600mm de longitud. Ambos extremos deben tener punta semiesférica, con diámetro de 16mm.
- Recipiente. Recipiente cilíndrico de metal, hermético, suficientemente rígido para mantener su forma después de manipulaciones bruscas. La pared interior del recipiente debe tener una superficie lisa y continua. La altura del recipiente debe ser aproximadamente igual al diámetro de la base, pero no menor al 80 % o mayor al 150 % del diámetro. La capacidad del recipiente debe adecuarse a los requisitos y límites establecidos por la norma. El borde superior debe ser liso y plano, dentro de los 0,25 mm; también debe ser paralelo al fondo con una desviación máxima de 0,5°.
- Pala o cucharón. Deberán ser del tamaño adecuado para llenar el recipiente con agregados.
- Horno. El horno debe mantener una temperatura uniforme de 110 °C±5 °C.

#### **4.1.2.2. Muestra a utilizar**

Se deberá tomar una muestra mayor a la que sea necesaria para el ensayo. Debe ser alrededor del 125 % a 200 % de la capacidad del recipiente. Su manipulación debe ser con el debido cuidado para evitar la segregación. Se debe secar previamente hasta alcanzar una masa constante en un horno a  $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.1.2.3. Procedimiento**

Se debe definir el procedimiento a utilizar, ya sea determinar la densidad en masa suelta si se requiere o masa compactada por procedimiento de varillado.

- Procedimiento de densidad aparente suelta
  - Secar la muestra según la masa requerida hasta alcanzar masa constante en un horno a temperatura constante a  $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ .
  - Llenar el recipiente hasta rebosarlo con una pala o cucharón. El material se debe descargar a una altura no mayor a 50 mm por encima del tope del recipiente.
  - Nivelar la superficie del agregado con los dedos o una regla enrasadora.
  - Determinar la masa del recipiente, más su contenido y por separado la masa del recipiente, y registrar los valores al 0,05 kg más cercano.
  
- Procedimiento de varillado
  - Secar la muestra según la masa requerida hasta alcanzar masa constante en un horno a temperatura constante a  $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

- Llenar el recipiente a un tercio y nivelar superficialmente con los dedos. Varillar la capa de agregados con 25 golpes con la varilla de apisonado, distribuyéndolos uniformemente sobre la superficie. No permitir que la varilla toque con fuerza el fondo del recipiente.
- Llenar el recipiente a dos tercios y nivelar superficialmente con los dedos. Varillar la capa de agregados como se realizó con la primera capa. Aplicar bastante fuerza, pero no más de la necesaria como para ocasionar que la varilla penetre en la capa previa de agregados.
- Finalmente llenar el recipiente hasta rebosarlo y varillar nuevamente como se realizó en las capas anteriores. Nuevamente aplicar bastante fuerza, pero no más de la necesaria como para ocasionar que la varilla penetre en la capa previa de agregados.
- Determinar la masa del recipiente, más su contenido y por separado la masa del recipiente, y registrar los valores al 0,05 kg más cercano.

#### **4.1.2.4. Cálculos**

Se debe determinar la densidad aparente, para ambos procesos suelta y compactada. Los cálculos por realizar son los siguientes:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

En donde:

M = densidad aparente de los agregados, kg/m<sup>3</sup>

G = masa de los agregados más el recipiente, kg

T = masa del recipiente

V = volumen del recipiente

### 4.1.3. Materia orgánica en los agregados finos (COGUANOR NTG41010 h4 / ASTM C87)

El valor del ensayo es brindar información sobre materia orgánica perjudicial presente en los agregados finos. La norma brinda los procedimientos para validar los resultados y determinar la cantidad aproximada presente de contaminantes perjudiciales para el concreto.

#### 4.1.3.1. Equipo

- Botellas de vidrio. Se requiere botellas graduadas de vidrio sin color con una capacidad nominal de 240-470 ml. Deben poseer tapones herméticos no solubles con los reactivos a utilizar. Las botellas no deben tener un ancho o diámetro menor a 38,1 mm, ni mayor a 63,5 mm a lo largo de la línea de vista para comparación de color.
- Vidrios de colores estándar. Consiste en 5 vidrios de colores estándar montados en un soporte plástico.

Figura 8. Pruebas de impurezas orgánicas



Fuente: Departamento de Mecánica Estructural, Laboratorio de Materiales de Construcción, Universidad Centroamericana de San Salvador. *Pruebas de impurezas*. p. 2.

#### **4.1.3.2. Reactivos y soluciones**

- Hidróxido de sodio reactivo (3 %). Disolver 3 partes de hidróxido de sodio grado reactivo en 97 partes de agua.
- Solución estándar de color. Disolver dicromato de potasio de grado reactivo en ácido sulfúrico concentrado a una tasa de 0,250 g/100mL del ácido, la solución debe ser recién hecha para la comparación de color. Puede usarse calentamiento suave si fuera necesario para lograr la solución.

#### **4.1.3.3. Muestra a utilizar**

La muestra del agregado a evaluar debe tener una masa no menor a 450 gramos.

#### **4.1.3.4. Procedimiento**

- Llenar una botella de vidrio graduada o previamente medida hasta con aproximadamente 130 mL con una muestra de agregado fino a ser ensayado.
- Agregar la solución de hidróxido de sodio en la botella de vidrio que contiene el agregado hasta los 200 mL.
- Taponar la botella, agitar vigorosamente hasta saturar la muestra de material y luego dejarla reposar por 24 horas.
- Al finalizar el periodo de 24 horas, se deberá definir cuál procedimiento seguir, si el procedimiento de la solución de color estándar o el de los vidrios de color estándar.

- Procedimiento de la solución de color estándar

Llenar una botella de vidrio hasta aproximadamente la marca de 75 mL con una solución fresca, de color estándar preparada no más de 2 horas. Poner la botella con la muestra de ensayo y la botella con la solución de color estándar, lado a lado y comparar el color de luz transmitida a través del líquido que está sobre la muestra, con el color de la luz transmitida por la solución de color estándar. Registrar si el color del líquido que está sobre la muestra es más claro, más oscuro o igual al color de la solución de color estándar. Cuando una muestra sometida a este procedimiento da un color más oscuro que el color estándar debe considerarse que el agregado fino bajo ensayo posiblemente contiene materia orgánica perjudicial.

- Procedimiento de los vidrios de color estándar

Para definir con mayor precisión el color del líquido de la muestra de ensayo se deben usar cinco vidrios de colores estándar. Se debe usar la comparación con el color de la placa orgánica más parecida al color del líquido sobrenadante sobre la muestra de ensayo. Cuando una muestra sometida a este procedimiento da un color más oscuro que la placa orgánica No. 3 (Gardner, estándar de color No. 11) debe considerarse que el agregado fino evaluado contiene materia orgánica perjudicial.

#### **4.1.4. Porcentaje del contenido de humedad (COGUANOR NTG 41010 h19 / ASTM C566-13)**

La finalidad de la norma es cubrir el procedimiento estándar para determinar el porcentaje de humedad evaporable de una muestra de agregado. El proceso para extraer la humedad superficial y la humedad dentro de los poros

es por medio de secado de la muestra. Este método de ensayo es suficientemente exacto para usos habituales, tal como el ajuste de cantidades de ingredientes para una mezcla de concreto. Algunos agregados pueden contener agua que está químicamente combinada en los minerales en el agregado. Esta agua no es evaporable y no está incluida en el porcentaje determinado por este método.

#### **4.1.4.1. Equipo**

- Balanzas. Para agregado fino, legible a 0,1 g y exactitud de 0,1 g o 0,1 % de la masa de ensayo. Para agregado grueso, o mezcla de agregado grueso y fino, legible y exactitud de 0,5 g o 0,1 % de la masa de ensayo.
- Fuente de calor. Se recomienda un horno que pueda mantener una temperatura uniforme de  $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pueden ser usadas otras fuentes adecuadas de calor, tales como una placa de calentamiento eléctrica o de gas, lámparas de calor eléctricas o un horno de microondas ventilado (cuando se usa un horno de microondas el recipiente debe ser no metálico), no se requiere un minucioso control de temperatura.
- Recipiente para la muestra. Utilizar un recipiente que no sea afectado por el calor. Deberá poseer suficiente volumen para contener la muestra requerida sin derramarla y que la profundidad de la muestra no exceda 1/5 de la dimensión lateral menor.
- Agitador. Una cuchara metálica o una espátula de tamaño adecuado.

#### **4.1.4.2. Muestra a utilizar**

La muestra por utilizar debe ser representativa del lote evaluado. Se debe proteger la muestra previa a la determinación de la masa de pérdidas de humedad. Las cantidades mínimas por utilizar se indican en la siguiente tabla:

Tabla VI. **Muestra de ensayo del agregado**

Tamaño nominal máximo del agregado (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
4,75	0,5
9,5	1.5
12,5	2
19	3
25	4
37,5	6
50	8
63	10
75	13
90	16
100	25
150	50

Fuente: Sociedad Americana para Ensayo y Materiales. *ASTM C566. Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. p. 10

En caso se utilice agregado liviano, como es el caso de la perlita expandida, la masa mínima de la muestra se obtiene multiplicando el valor listado, por la masa unitaria suelta del agregado en kg/m<sup>3</sup> y dividiendo por 1 600.

#### **4.1.4.3. Procedimiento**

- Determinar la masa de la muestra al 0,1 % más cercano.
- Secar completamente la muestra en el recipiente con la fuente de calor a utilizar. Se considera que está seca completamente cuando la pérdida adicional sea menor al 0,1 % de la masa de la muestra.

- Determinar la masa de la muestra seca al 0,1 % más cercano una vez haya bajado lo suficiente su temperatura para no dañar la balanza.

#### **4.1.4.4. Cálculos**

Una vez obtenidos los datos de la masa de la muestra antes del proceso de sacado y después, se determina el porcentaje de humedad del agregado. La ecuación para determinar el contenido de humedad total evaporable es la siguiente:

$$P = \frac{W - D}{D} * 100$$

En donde:

P = contenido de humedad total evaporable de la muestra, en porcentaje

W = masa de la muestra original, g.

D = masa de la muestra seca, g.

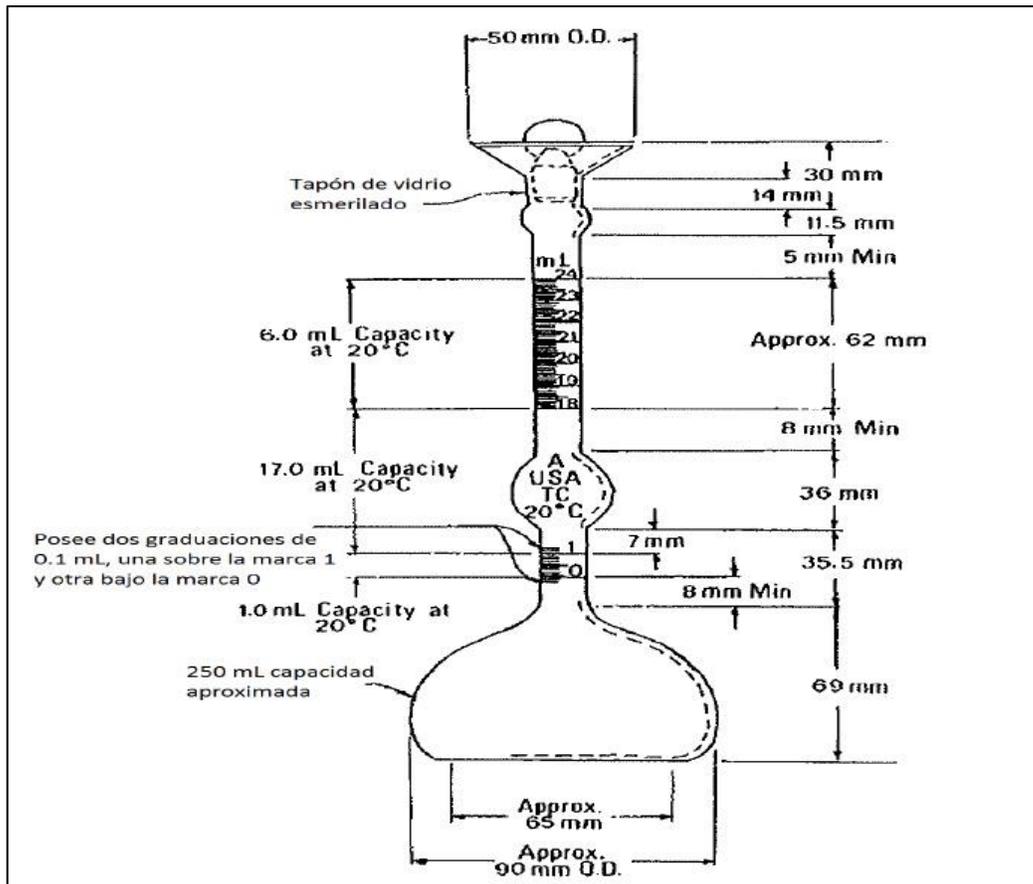
#### **4.1.5. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (COGUANOR NTG 41010 h9/ ASTM C128-15)**

El porcentaje de absorción es un factor determinante en el diseño de mezcla, la cantidad de agua por utilizar se ve influida directamente por la absorción y la humedad del agregado. La densidad relativa es la relación entre la densidad del agregado y la densidad de agua destilada a una temperatura dada. La densidad relativa se utiliza para calcular el volumen que ocupa el agregado en mezclas de concreto.

#### 4.1.5.1. Equipo

- Balanzas. Legible a 0,05 kg y exactitud de 0,1 % de la carga del ensayo. Considerar el rango del uso se extiende desde la masa del recipiente vacío a la masa del recipiente más su contenido a 190 kg/m<sup>3</sup>.
- Picnómetro. Se utiliza el picnómetro en caso se realice el método gravimétrico. Este debe ser un recipiente adecuado en el que pueda introducirse la muestra de agregado fino. La lectura del volumen del contenido debe leerse al 0,1cm<sup>3</sup> más cercano.
- Matraz. Se utiliza el matraz en caso se realice el método volumétrico. El matraz debe ser de sección transversal circular y cumplir con las formas y dimensiones detalladas en la figura 8. Debe haber un espacio de por lo menos 10mm entre la marca de graduación más alta y el punto inferior de la parte esmerilada del tapón de vidrio.
- Molde y apisonador para ensayo de humedad superficial. El molde de metal debe tener la forma de un cono truncado con las siguientes dimensiones: diámetro interno superior:  $40 \pm 3$  mm; diámetro interno inferior:  $90 \pm 3$  mm; altura:  $75 \pm 3$  mm; espesor del metal del cono: mínimo de 0,8 mm. El apisonador de metal debe tener una masa de  $340 \pm 15$  g y una cara apisonadora circular y plana con un diámetro de  $25 \pm 3$  mm.
- Horno. El horno debe mantener una temperatura uniforme de  $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Figura 9. Especificaciones de matraz para determinación de la densidad relativa por medio del método volumétrico



Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas. *COGUANOR NTG 41003 h2. Método de ensayo. Determinación de la densidad del cemento hidráulico.* p. 8

#### 4.1.5.2. Muestra a utilizar

Se debe secar la muestra a utilizar hasta alcanzar masa constante y dejarla enfriar hasta que esté confortable para su manejo. Cubrir la muestra con agua por inmersión y dejar el agregado en ese estado por 24 horas  $\pm 4h$ .

Se debe evacuar el exceso de agua de material cuidadosamente para evitar la pérdida de finos. Esparcir la muestra sobre una superficie plana no absorbente expuesta a una corriente de aire caliente y agitar la muestra frecuentemente para garantizar un secado homogéneo.

Se debe garantizar que se alcanzó la condición saturada de una superficie seca del agregado, para ello se evalúa la muestra con el molde cónico. Para ello se debe sostener el molde cónico en su diámetro mayor abajo, firmemente sobre una superficie lisa no absorbente. Luego colocar una porción del agregado fino parcialmente seco en forma suelta en el molde hasta rebalsarlo y amontonar material adicional sobre el borde del molde. Apisonar ligeramente el agregado entre el molde con 25 golpes leves del apisonador. Iniciar cada golpe con una caída de aproximadamente 5 mm arriba de la superficie superior del agregado. Permitir que el apisonador caiga libremente por atracción gravitacional en cada golpe. Remover la arena suelta de la base del molde y levantarlo verticalmente si hay humedad superficial presente, el agregado fino mantendrá la forma del molde cónico. Un ligero asentamiento del agregado fino ya es una indicación que se ha llegado a la condición de superficie seca.

#### **4.1.5.3. Procedimiento**

- Método gravimétrico
  - Llenar parcialmente el picnómetro con agua. Introducir en el picnómetro  $500 \pm 10$  g de agregado saturado de superficie seca preparado como se describe anteriormente.
  - Llenar con agua adicional hasta aproximadamente un 90 % de la capacidad. Agitar el picnómetro manualmente, combinando

movimientos para hacerlo rotar, invertir y agitar hasta desaparecer burbujas de aire visibles.

- Ajustar la temperatura del picnómetro a  $23,0 \pm 2,0$  °C, de ser necesario por medio de inmersión parcial en agua circulante y llevar el nivel de agua en el picnómetro a su capacidad calibrada. Determinar la masa total del picnómetro, de la muestra de ensayo y del agua.
  - Extraer el agregado fino del picnómetro y secarlo en un horno a temperatura de  $110 \pm 5$  °C hasta masa constante. Enfriarlo al aire a temperatura del cuarto y determinar su masa.
  - Determinar la masa del picnómetro llenado hasta su capacidad calibrada, con agua a  $23,0$  °C  $\pm$   $2,0$  °C.
- Método volumétrico
    - Llenar el matraz con agua hasta un punto entre las marcas de 0 y 1 mL. Registrar esta lectura con el matraz y su contenido dentro del rango de temperatura de  $23 \pm 2$  °C.
    - Agregar  $55 \pm 5$  g de agregado fino en condición saturada de superficie seca. Colocar el tapón en el frasco y rodar el frasco en posición inclinada o bien girarlo suavemente en un círculo horizontal, a modo de desalojar el aire atrapado, continuando el movimiento hasta que ya no salgan más burbujas a la superficie. Tomar una lectura final con el frasco y su contenido dentro de 1 °C de la temperatura original.
    - Para la determinación de la absorción, usar una porción separada de  $500 \pm 10$  g de agregado en condición saturada de superficie seca, secarla a masa constante y determinar su masa seca.

Figura 10. **Determinación de la densidad relativa de la perlita por medio del método volumétrico**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.1.5.4. Cálculos**

Se debe determinar la densidad relativa (gravedad específica y saturada de superficie seca – sss). Para calcular la densidad relativa del agregado saturado de superficie seca se hace lo siguiente:

- Método gravimétrico

$$\text{Densidad relativa (sss)} = \frac{S}{B + S - C}$$

- Método gravimétrico

$$\text{Densidad relativa (sss)} = \frac{S_1}{[0.9975(R_2 - R_1)]}$$

En donde:

B = masa del picnómetro lleno con agua hasta la marca de calibración, g.

C = masa del picnómetro lleno con la muestra de ensayo y agua hasta la marca de calibración, g.

R<sub>1</sub> = lectura inicial del nivel de agua en el matraz, mL.

R<sub>2</sub> = lectura final en el matraz, mL.

S = masa de la muestra de ensayo, saturada de superficie seca (usada en el método gravimétrico), g.

S<sub>1</sub> = masa de la muestra de ensayo, saturada de superficie seca (usada en el método volumétrico), g.

El cálculo para el porcentaje de absorción es el siguiente:

$$\text{Absorción, \%} = \frac{S - A}{A} \times 100$$

En donde:

S = masa de la muestra de ensayo, saturada de superficie seca, g.

A = masa de la muestra de ensayo seca al horno, g.

#### 4.2. Elaboración de diseños de mezcla

Se conoce como diseño de mezcla a la determinación de las características requeridas del concreto y los materiales a utilizar para su

elaboración. Entre las características que se definen previamente están las propiedades del concreto fresco y las propiedades mecánicas del concreto endurecido.

El diseño de mezcla incluye el proporcionamiento de los materiales a emplear. El proporcionamiento es la determinación de las cantidades de los componentes del concreto. Cuando el concreto ha sido debidamente proporcionado, debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Economía

No se define un método estándar para definir las proporciones del concreto liviano de baja densidad. Para realizar concretos livianos y celulares se recomienda acudir a las especificaciones del proveedor del aditivo espumante o incorporador de aire, para lograr las propiedades deseadas en el concreto.

Existe la guía de ACI para realizar mezclas de concreto con agregado liviano, se titula *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98)*. La guía brinda métodos aplicables para seleccionar y ajustar las proporciones de un concreto estructural con agregados livianos. La finalidad de la investigación no es elaborar un concreto estructural, sin embargo, la guía menciona aspectos importantes a considerar en cuanto agregados y la relación agua-cemento para un concreto con propiedades adecuadas en estado fresco, utilizando agregados livianos.

#### **4.2.1. Definición de las características de la mezcla**

Las características de la mezcla están en función del uso que vaya a tener el concreto por elaborar. Para ello se debe definir y establecer las condiciones a las que estará sometido, dimensiones y forma del elemento a construir y las características físicas del concreto requerido.

##### **4.2.1.1. Resistencia**

La resistencia a compresión  $f'_c$  es una propiedad mecánica que se debe definir desde el inicio del diseño de mezcla. Se especifica en el diseño de mezcla la resistencia a compresión que alcanzará teóricamente a los 28 días. Una vez transcurridos los 28 días y realizado el procedimiento correcto de curado, se debe realizar el ensayo a compresión según las especificaciones, para verificar la calidad del concreto.

La resistencia obtenida en los ensayos a compresión debe ser igual a la resistencia especificada más una tolerancia que lleva en consideración las variaciones de los materiales, de los métodos de mezclado, del transporte y colocación del concreto y variaciones en la producción, curado y ensayo de probetas cilíndricas de concreto.

##### **4.2.1.2. Relación agua-cemento**

Este término indic, la relación agua-cemento, es la división de la masa del agua, sobre la masa del cemento utilizada. La relación agua-cemento de un diseño de mezcla debe ser la menor posible, siempre y cuando se obtenga la trabajabilidad requerida en la mezcla. Utilizar la menor cantidad de agua

garantiza mayor resistencia a las condiciones de exposición que se pueda enfrentar.

La manera común de determinar la relación agua-cemento es por medio de tablas y gráficas que relacionan la cantidad de agua-cemento con la resistencia a la compresión deseada a 28 días. Sin embargo, cuando se utiliza agregado liviano se deben utilizar otros métodos.

El ACI 211.2-98 recomienda algunas consideraciones para determinar la relación agua-cemento. En el caso de mezclas de concreto con agregados livianos, la relación agua-cemento se debe determinar por medio de mezclas de prueba, proporcionando diferente contenido de aire con base en la consistencia requerida o evaluando la resistencia a la compresión alcanzada. En caso se utilicen agentes espumantes o incorporadores de aire, se debe utilizar la relación agua-cemento recomendada por el proveedor del aditivo. Es necesario cumplir los requisitos del proveedor para que los aditivos empleados se desempeñen en el concreto de la manera esperada.

#### **4.2.1.3. Asentamiento**

El asentamiento o revenimiento es el indicador de trabajabilidad más comúnmente utilizado cuando se evalúan mezclas similares. El ensayo de asentamiento se usa para medir la consistencia del concreto. Sin embargo, no es recomendable utilizarlo para comparar mezclas de proporciones totalmente diferentes. La trabajabilidad en el concreto liviano debe ser evaluada constantemente para mantener la calidad y verificar su certeza con los datos teóricos. Al igual que el concreto de peso normal, con un menor asentamiento del concreto fresco y un menor factor de compactación, será más trabajoso el procedimiento de colocación y debe ser minucioso para cuestiones de acabados.

Por otro lado, con un asentamiento muy alto, es decir con una trabajabilidad mayor, el concreto puede tener mayor tendencia a la segregación.

En el concreto liviano, a diferencia del concreto tradicional, un concreto con trabajabilidad alta y un exceso de vibrado, la pasta tiende asentarse mientras que el agregado flota. El proceso de colocación y acabados puede ser complicado si no se definen las características adecuadas en el diseño de mezcla para el concreto fresco.

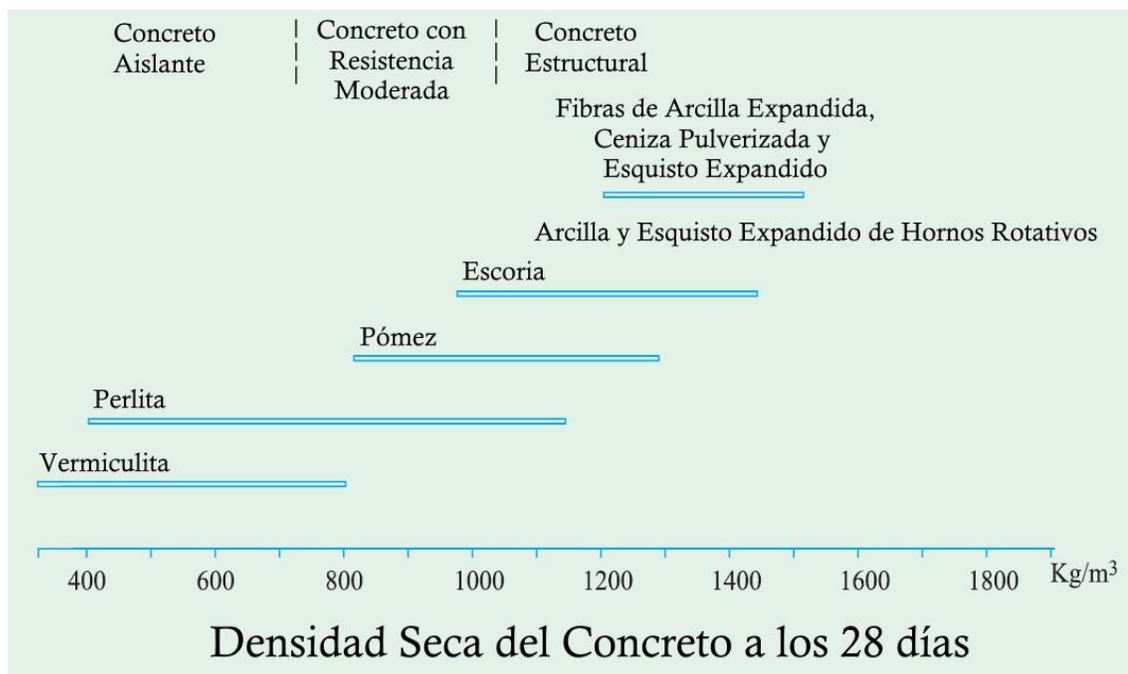
#### **4.2.1.4. Agregados**

Los agregados influyen en las características físicas del concreto en estado fresco y las propiedades mecánicas en estado endurecido. Para determinar la proporción del agregado en las mezclas, se debe considerar todas las características de los agregados.

La diferencia de utilizar agregado liviano en lugar de agregado de peso normal consiste en que los porcentajes de absorción suelen ser mayores en aquellos, por lo que la humedad contenida en el agregado y su porcentaje de absorción son factores importantes para determinar la cantidad de agua en la mezcla. Los agregados livianos suelen ser porosos, razón por la cual poseen un mayor porcentaje de absorción. En caso de que el agregado posea un alto porcentaje de absorción y tenga poca humedad, al momento de elaborar la mezcla el agregado consumirá gran parte del agua de la mezcla y contribuirá a que la misma pierda trabajabilidad rápidamente. Para revertir estos efectos se debe mezclar previamente el agregado con por lo menos la mitad del agua de mezcla, sin embargo, aumentará la densidad del concreto y disminuirá el aislamiento térmico en estado endurecido.

Según el agregado que se utilice, se pueden elaborar concretos livianos de diferentes rangos de densidad y para diferentes aplicaciones. La siguiente ilustración muestra diferentes rangos de densidad del concreto liviano con diferentes agregados.

**Figura 11. Rangos típicos de densidades de concretos elaborados con diferentes agregados livianos**



Fuente: SHETTY, Muddu. *Concrete Technology, Theory and Practice*. p. 511.

#### 4.2.2. Proporcionamiento de materiales

Aplicar los métodos de proporcionamiento de materiales para concretos convencionales en concretos livianos suele ser muy difícil. Las características físicas de los agregados livianos como absorción, gravedad específica y

humedad provocan que la determinación de la relación agua-cemento sea incierta.

La estimación de las proporciones en los concretos livianos suele establecerse por medio de pruebas con base en datos teóricos obtenidos por métodos de diseños de mezcla de concreto convencional. Las proporciones de los agregados para elaborar las mezclas, así como las cantidades de cemento y agua requerida, deben basarse en experiencias previas con el agregado particular a utilizar. La perlita expandida ha sido razón para diferentes estudios como material de construcción. A continuación, se presentan diferentes proporciones de materiales para concreto liviano con perlita expandida utilizados en diversas investigaciones.

**Tabla VII. Proporcionamiento de materiales para 1kg de cemento de mezclas de concreto con perlita utilizados en investigaciones anteriores**

		Cemento (kg)	Perlita (kg)	Agua (lt)	Arena Natural (kg)	Otro Agregado	Aditivos (ml)	Densidad Concreto Fresco (kg/m3)
Lightweight aggregate concrete. Ralph W. Kluge, Morris M. Sparks, and Edward C. Tuma. Mayo 1949		1	1,06	3,15	-	-	4	689
		1	0,55	1,50	-	-	4	705
		1	0,34	0,82	-	-	4	881
		1	0,29	0,76	-	-	4	929
Perlite Insulating Concrete. John Brouk. Junio 1954		1	0,52	1,07	-	-	17	561
		1	0,53	1,07	-	-	17	641
		1	0,53	1,69	-	-	17	897
Concreto Aislante con perlita, arena y mármol triturado. Rayed Alyousef , Omrane Benjeddou , Chokri Soussi, Mohamed Amine Khadimallah, and Malek Jedidi. Marzo 2019						Mármol Triturado (kg)		
		1	0,11	0,70	2,60	-	10	1 065
		1	0,11	0,70	2,08	0,52	10	1 085
		1	0,11	0,70	1,56	1,04	10	1 104
		1	0,11	0,70	1,04	1,56	10	1 124
		1	0,11	0,70	0,52	2,08	10	1 144
		1	0,11	0,70	0,00	2,60	10	1 164
Expanded Perlite Construction   ECP - The Egyptian Company	Concreto ultra ligero, recubrimiento de techos	1	0,79	1,35	-	-	21	600
		1	0,63	1,08	-	-	16	650
		1	0,53	0,98	-	-	14	650
		1	0,40	0,78	-	-	10	850
	Concreto con Perlita y Arena para relleno de suelos	1	0,15	0,48	1,08	-	1	1 312
		1	0,15	0,34	0,98	-	1	1 280
		1	0,08	0,39	1,23	-	1	1 568
		1	0,06	0,33	1,03	-	1	1 680
		1	0,15	0,36	0,56	-	1	1 760
	Mortero con Perlita					Cal Hidratada (kg)		
		1	1,00	0,77	-	-	11	650
		1	0,53	0,97	-	0,25	-	800
		1	0,63	1,24	-	0,54	-	850
	Mortero con Perlita resistente al fuego					Fibra de Vidrio (g)		
1		0,32	0,66	-	1,20	8	1 300	

Fuente: elaboración propia.

### **4.3. Evaluación de característica del concreto en estado fresco**

La evaluación de las características del concreto es la revisión de la aptitud del concreto para satisfacer las necesidades definidas según especificaciones estandarizadas. Se conoce como estado fresco del concreto cuando está recién mezclado, es plástico, semifluido y apto para ser moldeado. Existen diversos ensayos aplicables para definir características del concreto en estado fresco.

#### **4.3.1. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico (COGUANOR NTG-41017 h4 / ASTM C143)**

El método de ensayo descrito en la norma es aplicable a concretos cohesivos y plásticos, elaborados con agregado grueso de hasta 37,5 mm (1 ½ pulg) de tamaño. Los concretos que tienen asentamientos menores de 13 mm (½ pulg) no son suficientemente plásticos y los concretos que tienen asentamientos mayores de 230 mm (9 pulg) no son lo suficientemente cohesivos para que este ensayo sea significativo.

##### **4.3.1.1. Equipo**

- Molde. Debe ser metálico y que no reaccione fácilmente a la pasta de cemento y agua. Debe estar elaborado con una lámina con espesor mayor a 1,5 mm. La forma de la superficie lateral del molde debe ser de cono truncado, con la base de 200 mm de diámetro, la parte superior de 100 mm de diámetro y una altura de 300 mm. Los diámetros y alturas individuales deben tener una tolerancia de  $\pm 3$  mm. La base y la parte superior deben estar abiertas y ser paralelas entre sí y formar ángulo recto con el eje longitudinal del cono. El molde debe tener estribos para apoyar los pies y

asas para manipulación del molde. El interior del molde debe estar liso, libre de imperfecciones, abolladuras, deformaciones o mortero adherido.

- Varilla apisonadora. Varilla de acero, lisa de sección circular de 16mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud. Ambos extremos deben tener punta semiesférica, con diámetro de 16mm.
- Dispositivo de medición. Regla, cinta métrica o instrumento similar de medición marcado en incrementos de 6mm (1/4 pulg) o más pequeño. La longitud del instrumento debe ser de por lo menos 300 mm (12 pulg).
- Cucharón. Deberá ser del tamaño adecuado para que cada cantidad de concreto sea representativa del recipiente obtenido y de un tamaño que evite derrames durante la colocación en el molde.

#### **4.3.1.2. Muestra a utilizar**

La muestra de concreto para elaborar los especímenes de prueba debe ser representativa de toda la amasada preparada.

#### **4.3.1.3. Procedimiento**

- Humedecer todo el equipo a utilizar. Colocar el molde sobre una superficie plana, rígida, no absorbente y húmeda. Asegurar que el molde esté firme durante el llenado, para ello se debe parar el laboratorista sobre los estribos del molde.
- Llenar el molde con el cucharón con la primera capa, aproximadamente 1/3 del volumen total del molde. Al verter el concreto en el molde, se debe mover el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde para asegurar una distribución pareja del concreto y evitar la segregación.
- En cada capa de llenado se debe apisonar 25 veces uniformemente en toda la sección transversal de cada capa. Para la capa del fondo es necesario

inclinarse la varilla ligeramente y dar aproximadamente la mitad de los golpes cerca del perímetro, continuando con golpes verticales en forma de espiral hacia el centro. Varillar la capa del fondo en todo su espesor.

- Agregar 1/3 del volumen total del molde nuevamente, girando el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde. Consolidar la segunda capa en todo su espesor, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa inferior en aproximadamente 25 mm (1pulg).
- Agregar la última capa con un volumen mayor a 1/3 del volumen total del molde, girando el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde, hacer que el concreto exceda la capacidad del molde antes de empezar a varillar. Consolidar la última capa en todo su espesor, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa inferior en aproximadamente 25 mm (1pulg). Si durante el varillado la superficie del concreto queda abajo del borde superior del molde, agregar más concreto para mantener en todo momento un exceso de concreto sobre la superficie del molde.
- Continuar sosteniendo el molde firmemente hacia abajo. Emparejar la superficie del concreto mediante el enrase y rodamiento de la varilla de apisonamiento. Remover el concreto del área que rodea la base del molde para evitar la interferencia con el movimiento del concreto del molde.
- Retirar el molde, levantándolo cuidadosamente en dirección vertical. Levantar el molde una altura de 300 mm (12 pulg) en  $5 \pm 2$  segundos, con un movimiento ascendente uniforme sin movimientos laterales o de torsión.
- De inmediato medir el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la superficie superior del espécimen.
- El ensayo se debe realizar sin interrupción desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde, en un periodo de 2,5 minutos.

Figura 12. **Determinación del asentamiento del concreto liviano de baja densidad**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en CETEC.

#### **4.3.1.4. Resultados**

Registrar el asentamiento de la muestra evaluada. En caso se reporte en milímetros, utilizar aproximación de 5 mm o si se utilizan pulgadas, al ¼ pulg más cercano.

#### **4.3.2. Medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado (COGUANOR NTG 4103 / ASTM C 1064)**

La temperatura del concreto es un indicador para verificar requisitos específicos al momento de su aplicación. El ensayo permite medir la temperatura de las mezclas de concreto recién mezclado. La temperatura que se obtiene en el ensayo corresponde al concreto recién mezclado, puede no ser indicativa de la temperatura del concreto a un tiempo posterior.

##### **4.3.2.1. Equipo**

- Recipiente. Debe tener la capacidad para que por lo menos el concreto cubra 75 mm (3 pulg) en todas direcciones el sensor del dispositivo medidor de temperatura.
- Dispositivo medidor de temperatura. Debe tener un rango de 0°C a 50°C y una aproximación de +/- 0.5°C. El sensor del dispositivo medidor de temperatura debe ser tal que permita una inmersión de 75 mm (3 pulg) o más, durante la operación.

##### **4.3.2.2. Muestra a utilizar**

Se debe obtener una muestra representativa de concreto recién mezclado. El recipiente por utilizar debe haber sido humedecido previamente al ensayo. Es

aceptable medir la temperatura del concreto recién mezclado bien sea en el equipo de transporte o en las formaletas

#### **4.3.2.3. Procedimiento**

- Colocar el dispositivo medidor de temperatura en el concreto recién mezclado. Asegurar que el sensor de temperatura esté sumergido al menos 75 mm (3 pulg).
- Cerrar los vacíos provocados por la inmersión presionando suavemente la superficie del concreto alrededor del dispositivo medidor. Se debe realizar esto para que la temperatura del aire circundante no afecte la medición.
- El dispositivo medidor de temperatura debe permanecer por lo menos 2 minutos en el concreto recién mezclado, pero no más de 5 minutos.
- Registrar la temperatura. No retirar del concreto el dispositivo cuando se haga la lectura.

#### **4.3.2.4. Resultados**

Registrar la temperatura con una aproximación de 0,5 °C.

#### **4.3.3. Densidad aparente (masa unitaria) y rendimiento (volumen de concreto producido) del concreto (COGUANOR NTG-41017 h5 / ASTM C138)**

La norma cubre la determinación de la densidad aparente del concreto recién mezclado y ecuaciones para calcular su rendimiento. El rendimiento se calcula para evaluar el volumen del concreto producido con una mezcla de cantidades conocidas de los materiales que la componen.

#### 4.3.3.1. Equipo

- Balanza. Exactitud de 45 gramos al 0,3 % o de la carga del ensayo. Considerar el rango del uso se extiende desde la masa del recipiente vacío a la masa del recipiente más su contenido a 2 600 kg/m<sup>3</sup>.
- Varilla apisonadora. Varilla de acero, lisa, de sección circular de 16mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud. Ambos extremos deben tener punta semiesférica, con diámetro de 16mm.
- Recipiente de medida. Recipiente cilíndrico de metal, hermético, suficientemente rígido para mantener su forma después de manipulaciones bruscas. La pared interior del recipiente debe tener una superficie lisa y continua. La altura del recipiente debe ser aproximadamente igual al diámetro de la base, pero no menor al 80 % o mayor al 150 % del diámetro. La capacidad del recipiente debe adecuarse a los requisitos y límites establecidos por la norma. Para el desarrollo de la investigación, un recipiente de 7 litros cumple con la capacidad mínima requerida. El borde superior debe ser liso y plano, dentro a 0,3 mm.
- Placa de enrase. Placa de acero rectangular, de al menos 6mm (1/4 pulg) de espesor. Las dimensiones de ancho y largo deberán ser por lo menos 50 mm (2 pulg) mayor que el diámetro de recipiente de medida a utilizar. Los extremos de la placa deben ser rectos y lisos, con una tolerancia de 2 mm (1/16 pulg).
- Mazo. El mazo debe tener cabeza de hule o cuero crudo. Su peso debe ser de 600 + 200 g (1,25 + 0,50 lb).
- Cucharón. Deberá ser del tamaño adecuado para que cada cantidad de concreto sea representativa del recipiente obtenido y de un tamaño que evite derrames durante la colocación en el molde.

#### **4.3.3.2. Muestra a utilizar**

Se debe obtener una muestra representativa de concreto recién mezclado. El recipiente, la varilla y la placa enrasadora por utilizar deberá haber sido humedecida previamente a utilizarse.

#### **4.3.3.3. Procedimiento**

- Humedecer todo el equipo a utilizar. Colocar el recipiente sobre una superficie plana, rígida, no absorbente y húmeda. Hay que asegurar que el molde esté firme durante el llenado.
- Llenar el recipiente con el cucharón con la primera capa, aproximadamente 1/3 del volumen total del recipiente de medida. Al verter el concreto en el molde, se debe mover el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde para asegurar una distribución pareja del concreto y evitar la segregación.
- En cada capa de llenado se debe apisonar 25 veces uniformemente en toda la sección transversal de cada capa. Para la capa del fondo es necesario tener cuidado de no dañar el fondo del recipiente. Varillar la capa del fondo en todo su espesor.
- Después de varillar cada capa, se debe golpear suavemente los lados del recipiente con el mazo de cabeza de hule usando la fuerza requerida para cerrar los vacíos dejados por la varilla apisonadora y para liberar las burbujas grandes de aire que hayan sido atrapadas.
- Agregar 1/3 del volumen total del molde nuevamente, girando el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del recipiente. Consolidar la segunda capa en todo su espesor, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa inferior en aproximadamente 25 mm (1pulg). Golpear nuevamente

con el mazo de cabeza de hule el recipiente para cerrar vacíos y expulsar burbujas de aire.

- Agregar la última capa con un volumen aproximado a 1/3 del volumen total del recipiente evitando sobrellenar, girando el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del recipiente. Consolidar la última capa en todo su espesor, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa inferior en aproximadamente 25 mm (1 pulg). Golpear nuevamente con el mazo de cabeza de hule el recipiente para cerrar vacíos y expulsar burbujas de aire.
- Una vez finalizado el varillado y consolidación del concreto en el recipiente, el exceso o carencia de concreto no debe ser mayor a 3 mm (1/8 pulg.) por encima o debajo de la superficie del recipiente. Se puede agregar una cantidad pequeña de concreto si es necesario corregir alguna deficiencia. Si el recipiente contiene un excedente grande de concreto después de la consolidación, quitar lo necesario con una cuchara de albañil o cucharón inmediatamente después de terminar la consolidación y antes de enrasar el recipiente.
- Realizar el enrasado del recipiente, se inicia presionando la placa de enrasado sobre la superficie superior del recipiente cubriendo aproximadamente dos terceras partes de esta y retirando la placa con un movimiento a manera de aserrado sobre el área cubierta. Luego colocar la placa en la parte superior del recipiente cubriendo los dos tercios originales de la superficie y avanzarla con una presión vertical y movimiento de aserrado sobre toda la superficie y continuar empujándola hasta que se deslice completamente fuera del recipiente. Varias pasadas con el borde de la placa inclinada producirán una superficie de acabado liso.
- Limpiar el exterior del recipiente de todo excedente de concreto. Determinar la masa del concreto.

**Figura 13. Proceso de llenado del recipiente para determinar densidad aparente del concreto liviano de baja densidad**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en CETEC.

#### **4.3.3.4. Cálculos**

Se debe calcular la masa neta del concreto, restando la masa del recipiente de medición. Luego se divide dentro del volumen conocido del recipiente de medición para obtener la densidad aparente (masa unitaria). La siguiente ecuación expresa el cálculo de la densidad aparente:

$$\rho = \frac{M_c - M_m}{V_m}$$

En donde:

$\rho$  = densidad (masa unitaria) del concreto, kg/m<sup>3</sup>

$M_c$  = masa del recipiente de medida llenado con concreto, kg

$M_m$  = masa del recipiente de medida, kg

$V_m$  = volumen de del recipiente de medida, m<sup>3</sup>

Para evaluar el rendimiento del concreto producido, se determina con la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{M_t}{\rho}$$

En donde:

$Y$  = rendimiento, volumen de concreto producido por la amasada, m<sup>3</sup>

$M_t$  = masa total de todos los materiales de la amasada, kg

$\rho$  = densidad (masa unitaria) del concreto, kg/m<sup>3</sup>

#### **4.3.4. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión (COGUANOR NTG 41017 h7 / ASTM C231-14)**

El principio de la prueba del método de presión, para determinar el porcentaje de aire en la mezcla, se basa en el cambio de volumen del concreto producido por un cambio de presión. El ensayo tiene como fin determinar el contenido de aire en mezclas de concreto fresco, excluyendo cualquier aire que se encuentre dentro de los vacíos internos de las partículas de los agregados.

##### **4.3.4.1. Equipo**

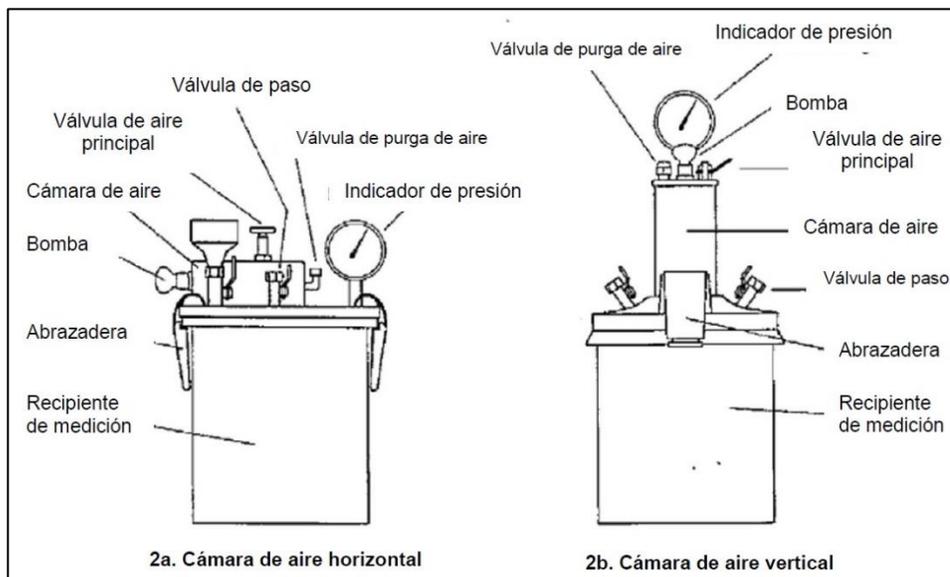
- Medidor de aire. Consiste en un recipiente de medición y una tapa ensamblada. Su funcionamiento se basa en igualar un volumen conocido

de aire a una presión conocida en una cámara de aire sellada con un volumen desconocido de aire en la muestra de concreto. El manómetro indica la presión en términos de porcentaje de aire.

- Recipiente de medición. Debe ser de un recipiente cilíndrico de metal, hermético, suficientemente rígido para mantener su forma después de manipulaciones bruscas, evitar ser desgastado por la pasta de cemento y limitar el factor de expansión a 0,1% de contenido de aire, en la escala del indicador cuando se esté bajo presión normal de operación. La pared interior del recipiente debe tener una superficie lisa y continua. La altura del recipiente debe ser aproximadamente igual al diámetro de la base, pero no menor al 75 % o mayor al 125 % del diámetro. La capacidad del recipiente debe ser de por lo menos 5,7 L (0,20 pies cúbicos). El borde superior debe ser liso y plano para que sea una unión hermética y firme entre el recipiente y la tapa ensamblada.
- Cubierta de ensamble. Debe estar hecha de metal que no sea afectado por la pasta de cemento y sea suficientemente rígida para limitar el factor de expansión del aparato ensamblado. Debe garantizar una unión hermética y firme a presión entre el recipiente y la cubierta ensamblada. Se deben proporcionar los medios convenientes para sujetar la cubierta al recipiente a fin de lograr un sellado hermético sin atrapar aire en la unión entre ambas pestañas de la tapa y el recipiente. Debe tener sus superficies interiores maquinadas con acabado liso. Debe estar provista de dispositivos de lectura directa del contenido de aire. La carátula del indicador de presión debe calibrarse para indicar el porcentaje de aire. Debe contar con graduaciones para un intervalo del contenido de aire de por lo menos 8 %, legibles al 0,1 % determinado con el ensayo de calibración con la presión de aire apropiada. La cubierta ensamblada debe estar provista con válvulas para aire, válvulas de purga de aire y llaves de paso, para que a través de ellas se pueda introducir agua de acuerdo con el diseño específico del medidor.

Se debe incluir una bomba de aire manual que forme parte de la cubierta de ensamble o que sea un accesorio de ella.

Figura 14. **Detalles de la cámara de aire**



Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas. *NTG 41017 h7. Método de ensayo. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión.* p. 8.

- Una cuchara normal de albañil.
- Varilla apisonadora. Varilla de acero, lisa, de sección circular de 16mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud. Ambos extremos deben tener punta semiesférica, con diámetro de 16mm.
- Mazo. El mazo debe tener cabeza de hule o cuero crudo. Su peso debe ser de 600 + 200 g (1,25 + 0,50 lb).
- Cucharón. Deberá ser del tamaño adecuado para que cada cantidad de concreto sea representativa del recipiente obtenido y de un tamaño que evite derrames durante la colocación en el recipiente.

- Regla de enrase. Una barra recta plana de acero u otro metal conveniente, de por lo menos 3 mm (1/8 de pulg) de espesor, 20 mm ( $\frac{3}{4}$  de pulg) de ancho y 300 mm (12 pulg) de longitud.
- Placa de enrase. Placa de acero rectangular, de al menos 6mm (1/4 pulg) de espesor. Las dimensiones de ancho y largo deberán ser de por lo menos 50 mm (2 pulg) mayor que el diámetro de recipiente de medida a utilizar. Los extremos de la placa deben ser rectos y lisos, con una tolerancia de 2 mm (1/16 pulg).

#### **4.3.4.2. Muestra a utilizar**

Se debe obtener una muestra representativa de concreto recién mezclado.

#### **4.3.4.3. Procedimiento**

- Humedecer todo el equipo a utilizar. Colocar el recipiente sobre una superficie plana, rígida, no absorbente y húmeda. Hay que asegurar que el molde esté firme durante el llenado.
- Llenar el recipiente con el cucharón con la primera capa, aproximadamente 1/3 del volumen total del recipiente de medida. Al verter el concreto en el molde, se debe mover el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde para asegurar una distribución pareja del concreto y evitar la segregación.
- En cada capa de llenado se debe apisonar 25 veces uniformemente en toda la sección transversal de cada capa. Para la capa del fondo es necesario tener cuidado de no dañar el fondo del recipiente. Varillar la capa del fondo en todo su espesor.
- Después de varillar cada capa, golpear suavemente los lados del recipiente con el mazo de cabeza de hule usando la fuerza requerida para cerrar los

vacíos dejados por la varilla apisonadora y para liberar las burbujas grandes de aire que hayan sido atrapadas.

- Agregar  $\frac{1}{3}$  del volumen total del molde nuevamente, girando el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del recipiente. Consolidar la segunda capa en todo su espesor, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa inferior en aproximadamente 25 mm (1 pulg). Golpear nuevamente con el mazo de cabeza de hule el recipiente para cerrar vacíos y expulsar burbujas de aire.
- Agregar la última capa con un volumen aproximado a  $\frac{1}{3}$  del volumen total del recipiente evitando sobrellenar, girando el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del recipiente. Consolidar la última capa en todo su espesor, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa inferior en aproximadamente 25 mm (1 pulg). Golpear nuevamente con el mazo de cabeza de hule el recipiente para cerrar vacíos y expulsar burbujas de aire.
- Una vez finalizado el varillado y consolidación del concreto en el recipiente, el exceso o carencia de concreto no debe ser mayor a 3 mm ( $\frac{1}{8}$  pulg.) por encima o debajo de la superficie del recipiente. Se puede agregar una cantidad pequeña de concreto si es necesario corregir alguna deficiencia. Si el recipiente contiene un excedente grande de concreto después de la consolidación, quitar lo necesario con una cuchara de albañil o cucharón inmediatamente después de terminar la consolidación y antes de enrasar el recipiente.
- Realizar el enrasado del recipiente, se inicia presionando la placa de enrasado sobre la superficie superior del recipiente cubriendo aproximadamente dos terceras partes de esta y retirando la placa con un movimiento a manera de aserrado sobre el área cubierta. Luego colocar la placa en la parte superior del recipiente cubriendo los dos tercios originales de la superficie y avanzarla con una presión vertical y movimiento de aserrado sobre toda la superficie y continuar empujándola hasta que se

deslice completamente fuera del recipiente. Varias pasadas con el borde de la placa inclinada producirán una superficie de acabado liso.

- Limpiar totalmente el borde del recipiente para garantizar un sello hermético entre el recipiente y la cubierta. Limpiar el exterior del recipiente de todo excedente de concreto.
- Ensamblar el aparato. Cerrar la válvula principal de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medición, y abrir ambas válvulas de paso situadas en la tapa.
- Inyectar agua con una jeringa de látex, a través de una de las válvulas hasta que el agua misma surja en la válvula opuesta. Sacudir el medidor suavemente hasta que salga todo el aire por la misma llave de purga.
- Cerrar la válvula de purga de aire de la cámara de aire. Bombear aire en la cámara hasta que la aguja del medidor de presión esté en la línea de presión inicial. Dejar pasar unos pocos segundos para que el aire comprimido se enfríe a temperatura normal.
- Cerrar ambas válvulas de paso colocadas en la cubierta. Abrir la válvula principal de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medición. Golpear los lados del recipiente de medición ligeramente con el mazo para eliminar restricciones locales.
- Leer el porcentaje de aire de la carátula del indicador de presión.

#### **4.3.4.4. Resultados**

El contenido de aire obtenido de la muestra de concreto se deberá informar al 0,1 % más cercano, a menos que la lectura del indicador del medidor exceda el 8 %, en cuyo caso la lectura corregida debe ser reportada a 1/2 de la división más cercana de la escala del medidor.

#### **4.4. Evaluación de propiedades mecánicas de concreto en estado endurecido**

La evaluación del desempeño satisfactorio del concreto requiere que se evalúen las propiedades que indiquen o determinen la calidad del concreto. El concreto liviano puede ser evaluado de diversas propiedades mecánicas como resistencia a compresión, flexión, desgaste, entre muchos otros ensayos aplicables para un concreto convencional.

Sin embargo, la propiedad de interés para la presente investigación es la resistencia a compresión del concreto en diferentes edades. En los concretos livianos y celulares, la relación entre la resistencia a compresión y la densidad en estado fresco son indicadores importantes para definir la calidad del desempeño de un concreto liviano.

##### **4.4.1. Método de ensayo estándar para resistencia a compresión del concreto liviano de baja densidad (ASTM C 495)**

El método de ensayo cubre la preparación de las muestras y la determinación de resistencia a compresión del concreto ligero aislante. La norma cubre todos los concretos con densidades menores a 800 kg/m<sup>3</sup> y recomienda realizar especímenes de 75 mm por 150 mm (3 por 6 pulg.).

##### **4.4.1.1. Equipo**

- Máquina de ensayo. La máquina debe ser motorizada y debe aplicar la carga continuamente sin impacto. El porcentaje de error de las cargas

dentro del rango de uso propuesto para la máquina de ensayo no debe exceder  $\pm 1,0$  % de la carga indicada.

- Bloques de apoyo. Deben ser de acero con caras endurecidas. Las caras de apoyo de los bloques deben tener una dimensión mínima de al menos 3 % mayor que el diámetro del espécimen que será ensayado.
- Separadores. Deben ser de acero sólido. Se permite una abertura vertical situada en el centro de los separadores. El diámetro máximo de la abertura vertical es de 19 mm (0,75 pulg). Las superficies superior e inferior de los separadores deberán ser paralelas entre sí.
- Indicación de la carga. La máquina de ensayo deberá estar equipada con un indicador de carga de marcación con agujas o digital. El rango de carga verificado no debe incluir cargas menores de 100 veces el cambio de carga más pequeño que se puede leer en la escala.
- Constancia de calibración y mantenimiento de la máquina. Toda la documentación que garantice la calidad y confiabilidad de los resultados deberá ser acorde a la norma COGUANOR NTG 41045 (ASTM C 1077).

#### **4.4.1.2. Muestra a utilizar**

Las muestras por utilizar en los ensayos a compresión son conocidas como especímenes. Los especímenes recomendados deberán ser de  $75 \pm 2$  mm ( $3 \pm 1/16$  pulg.) de diámetro y  $150 \pm 3$  mm ( $6 \pm 1/8$  pulg) de altura. Sin embargo, para que sea válido el ensayo a compresión, la norma COGUANOR NTG 41017 h1 (ASTM C 39) indica que los especímenes deben tener una relación longitud a diámetro de 2. En caso la relación longitud-diámetro sea menor a 1,75, deberá realizarse una corrección de relación longitud a diámetro al esfuerzo obtenido.

La elaboración de los especímenes se debe realizar en dos capas aproximadamente iguales. Una vez colocada cada capa de concreto, deberá

golpearse suavemente con la palma de la mano de 10 a 15 veces en toda la superficie exterior del molde para evacuar el aire atrapado. Realizar un acabado de alisado en la superficie libre del molde.

Una vez terminados los especímenes, se deben colocar en el lugar donde permanecerán para su curado. Los especímenes deben ser cubiertos de tal manera que no se pierda humedad de la mezcla por evaporación. Los especímenes deben permanecer en los moldes los días necesarios, hasta que pueden desmoldarse sin lastimar o dañar las superficies del espécimen, la norma ASTM C 495 recomienda que sean desmoldados hasta los 7 días o posterior.

Previo al ensayo en las diferentes edades estipuladas, se deberá verificar las superficies, los diámetros y el peso de cada espécimen. La superficie en contacto con la máquina debe estar dentro de 0,05 mm (0,002 pulg.), en caso no cumpla se deberán nivelar según los procedimientos de la norma COGUANOR NTG 41064 (ASTM C 617). Se deberá medir el diámetro en diferentes secciones del cilindro. Los especímenes no deben ser ensayados si cualquier diámetro individual difiere por más del 2 % de cualquier otro diámetro del mismo cilindro. Se deberán anotar las medidas de los diámetros, altura y peso; si se solicita, se deberá calcular la densidad del concreto en la fecha del ensayo.

#### **4.4.1.3. Procedimiento**

- Se deberá limpiar la superficie de los bloques de apoyo. Se debe colocar el espécimen en el bloque de apoyo inferior cuidadosamente.
- Alinear el espécimen al centro de los bloques de apoyo para garantizar que la carga aplicada se ejerza al centro del espécimen.
- La carga debe ser aplicada continuamente a velocidad constante. La carga máxima debe ser aplicada a  $65 \pm 15$  segundos.

- Anotar la carga máxima registrada y el tipo de falla del espécimen.

#### 4.4.1.4. Cálculos

Calcular la resistencia máxima a la compresión del concreto dividiendo la carga máxima registrada dentro del promedio del área del espécimen ensayado al 0,1 MPa (10 PSI).

$$f_{cm} = \frac{4000 P_{MAX}}{\pi * D^2}$$

En donde:

fcm = resistencia a la compresión, MPa

P<sub>MAX</sub> = carga máxima, kN

D = medida del diámetro promedio, mm



## 5. RESULTADOS

### 5.1 Caracterización de la perlita

Se evaluaron las características y propiedades de la perlita expandida en el Centro Tecnológico de Cementos Progreso (CETEC). Todos los ensayos fueron realizados bajo las normas COGUANOR y ASTM aplicables que se describen en el capítulo 4. Se evaluó una muestra de perlita expandida para el desarrollo experimental. La perlita expandida era proporcionada en bolsa sellada por el proveedor en presentaciones de 4 pies cúbicos. La perlita utilizada es expandida y empacada en Massachusetts, Estados Unidos; sin embargo, es comercializada por otro proveedor en Guatemala.

Figura 15. **Presentación de la perlita expandida utilizada para el desarrollo**



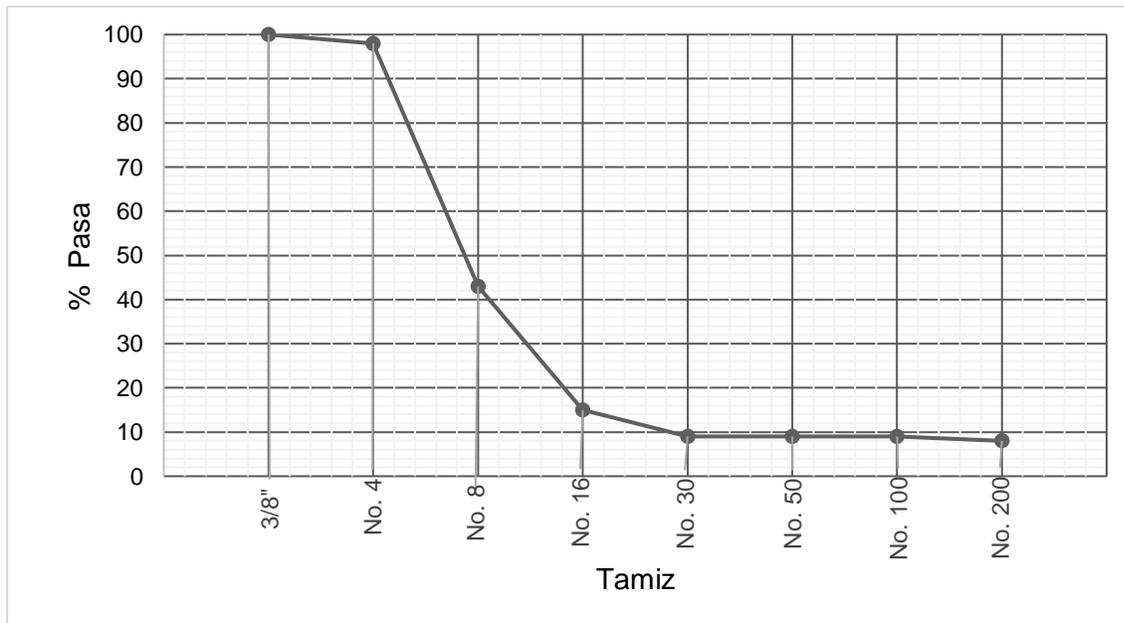
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Resultados de la caracterización de la perlita expandida

Norma ASTM	Norma COGUANOR NTG	Ensayo	Valor
C128	41010 h09	Densidad relativa (s.s.s.)	0,42
C128	41010 h09	Absorción (%)	0,4
C566	41010 h19	Contenido de humedad (%)	0,4
C87	41010 h04	Materia orgánica (No. Color)	0
C29	41010 h2	Densidad aparente compactada (kg/m <sup>3</sup> )	170
C29	41010 h2	Densidad aparente suelta (kg/m <sup>3</sup> )	152
C136	41010 h19	Módulo de finura (MF)	4,17

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Curva granulométrica de la perlita expandida (COGUANOR NTG 41010 h1 / ASTM C136)



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Granulometría de la perlita expandida (COGUANOR NTG 41010-h1 / ASTM C 136)**

Tamaño nominal	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,6 mm	0,3 mm	0,15 mm	0,075 mm
	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
Masa retenida (g)	0,0	1,1	27,4	13,9	2,9	0,2	0,1	0,3
Porcentaje que Pasa	100	98	43	15	9	9	9	8

Total, tamizado (g): 50,0

Fuente: elaboración propia.

## 5.2 Diseños de mezcla

Para la elaboración del concreto liviano de baja densidad fue necesario realizar diseños de mezcla de ajuste. Se realizaron 3 diseños de mezcla de ajuste para alcanzar las características deseadas en el concreto en estado fresco. Posteriormente se desarrollaron 4 diseños de mezcla para evaluar el desempeño de las diferentes mezclas de concreto.

Para establecer las proporciones de los diseños de mezcla fue necesario revisar los diseños elaborados en investigaciones anteriores. Como bien indica el ACI, no existe un procedimiento exacto para el proporcionamiento. Los diseños de mezclas elaboradas son el resultado de indicaciones del proveedor de los aditivos e investigaciones anteriores.

Las mezclas de concreto liviano de baja densidad para el desarrollo experimental serán identificadas por un número correlativo del 1 al 7. La siguiente

tabla muestra los diseños de mezcla utilizados correspondientes para un metro cúbico de concreto.

**Tabla X. Diseños de mezcla de concreto liviano de baja densidad evaluados**

Identificación de la mezcla	Cantidades de material para 1 m <sup>3</sup> de concreto				Aditivos		
	Cemento (kg)	Agua (lt.)	Perlita Expandida (kg)	Microfibra (kg)	Viscoflow (ml/kg)	Reocell 30 (ml/kg)	Polyheed 789 (ml/kg)
1	340	245	208	1,20	5,00	4,75	0,00
2	380	228	177	1,20	5,00	3,50	0,00
3	380	217	165	1,00	5,00	3,00	0,00
4	360	212	148	1,00	4,00	0,50	0,00
5	360	227	148	1,00	4,00	0,35	0,00
6	360	230	146	1,00	4,25	0,40	3,00
7	360	234	146	1,00	4,00	0,35	0,00

Fuente: elaboración propia.

### 5.2.1. Definición de las características de la mezcla

Se establecieron características físicas teóricas del concreto en estado fresco y endurecido para cada mezcla. La finalidad era alcanzar los datos teóricos propuestos para cada mezcla. La siguiente tabla presenta los datos teóricos establecidos para cada mezcla.

Tabla XI. **Características teóricas de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas**

Identificación de la mezcla	Relación agua/cemento (%)	Contenido de aire (%)	f'c a 28 días		Densidad en estado fresco	
			N/mm2	PSI	Kg/m3	lb/pie3
1	0,72	30	6,9	1 000	750	47
2	0,60	33	6,9	1 000	700	44
3	0.57	25	6,9	1 000	650	41
4	0.59	30	1,4	200	650	41
5	0.63	30	1,4	200	600	37
6	0.64	30	1,4	200	600	37
7	0.65	30	1,4	200	600	37

Fuente: elaboración propia.

### 5.3. Característica del concreto en estado fresco

Los diferentes ensayos para la evaluación del concreto fresco, al igual que la realización de las mezclas, se llevaron a cabo en el Laboratorio CETEC del Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso. Todo el equipo utilizado para el desarrollo experimental cumple con las especificaciones de las normas aplicadas. Así mismo, el laboratorio se encuentra certificado por la Oficina Guatemalteca de Acreditación (OGA).

#### 5.3.1. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico (COGUANOR NTG 41017 h4 / ASTM C143)

Los resultados del asentamiento son los siguientes:

**Tabla XII. Resultado del ensayo de asentamiento a las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas**

Identificación de la mezcla	Asentamiento	
	cm	pulg
1	20,5	8,00
2	18,0	7,00
3	23,0	9,00
4	16,5	6,50
5	21,0	8,25
6	23,0	9,00
7	23,0	9,00

Fuente: elaboración propia.

**Figura 17. Ensayo para la determinación del asentamiento del concreto hidráulico**



Fuente: elaboración propia.

### 5.3.2. Medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado (COGUNOR NTG 41053 / ASTM C1064)

Las temperaturas obtenidas a partir del procedimiento establecido por la norma COGUNOR NTG 41053 son las siguientes:

Tabla XIII. Resultado de las mediciones de temperatura a las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas y la temperatura ambiente

Identificación de la mezcla	Temperatura del concreto (°C)	Temperatura ambiente (°C)
1	23,0	23,5
2	21,0	23,0
3	21,5	22,0
4	23,0	22,0
5	22,0	23,0
6	24,0	24,5
7	24,0	23,0

Fuente: elaboración propia.

### 5.3.3. Densidad aparente (masa unitaria) y rendimiento (volumen de concreto producido) del concreto (COGUNOR NTG-41017h5 / ASTM C138)

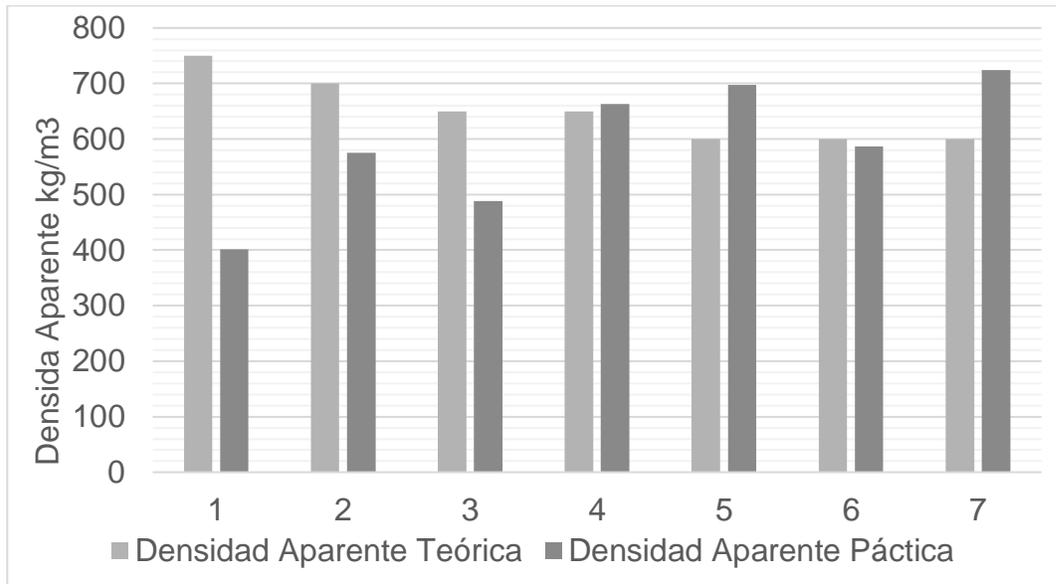
La densidad aparente y rendimiento obtenida en los ensayos a los concretos evaluados son:

Tabla XIV. Resultado de la densidad aparente y rendimiento de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas

Identificación de la mezcla	Densidad aparente		Rendimiento (m <sup>3</sup> )
	kg/m <sup>3</sup>	lb/pie <sup>3</sup>	
1	401	25,0	0,51
2	575	35,9	0,73
3	488	30,5	0,64
4	663	41,4	0,92
5	697	43,5	0,95
6	587	36,6	0,80
7	724	45,2	0,98

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Comparación de la densidad aparente teórica y práctica de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas



Fuente: elaboración propia.

**5.3.4. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión (COGUANOR NTG 41017 h7 / ASTM C231-14)**

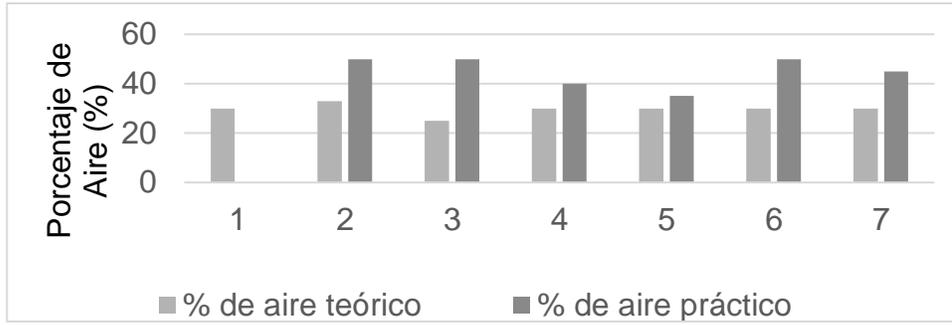
Se debe observar la siguiente tabla con los resultados del ensayo de prueba del contenido de aire:

**Tabla XV. Resultado del contenido de aire de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas**

<b>Identificación de la mezcla</b>	<b>Contenido de aire (%)</b>
<b>1</b>	-
<b>2</b>	50,0
<b>3</b>	50,0
<b>4</b>	40,0
<b>5</b>	35,0
<b>6</b>	50,0
<b>7</b>	45,0

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Comparación del contenido de aire teórico y práctico de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Ensayo para la determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en CETEC.

#### **5.4 Evaluación de propiedades mecánicas de concreto en estado endurecido**

La evaluación del concreto en estado endurecido fue realizada en el Laboratorio CETEC del Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos

Progreso. Todo el equipo utilizado para el desarrollo experimental cumple con las especificaciones de las normas aplicadas. Así mismo, el laboratorio se encuentra certificado por la Oficina Guatemalteca de Acreditación (OGA).

#### 5.4.1. Método de ensayo estándar para resistencia a compresión del concreto ligero aislante (ASTM C 495)

Los resultados del ensayo a compresión del concreto se llevaron a cabo con base en el promedio de dos cilindros sometidos a carga por cada edad. En algunas edades los cilindros no registraron carga debido a su baja resistencia. No se evaluó la resistencia a compresión de todas las mezclas. Los resultados del promedio fueron los siguientes.

Tabla XVI. Resultados promedio de la resistencia a compresión de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas

Identificación de la mezcla	Resistencia a compresión diferentes edades (N/mm <sup>2</sup> )			
	1 día	3 días	7 días	28 días
1	N.E.	N.E.	0.1	N.R.C.
2	N.E.	N.E.	0.4	0.4
3	N.E.	N.E.	N.R.C.	0.1
4	N.E.	N.E.	1.7	2.2
5	2.6	4.0	4.3	5.1
6	N.E.	1.2	2.4	2.4
7	1.2	3.0	3.2	3.0
*N.E.		No se realizó el ensayo		
*N.R.C.		No registró carga el equipo de compresión		

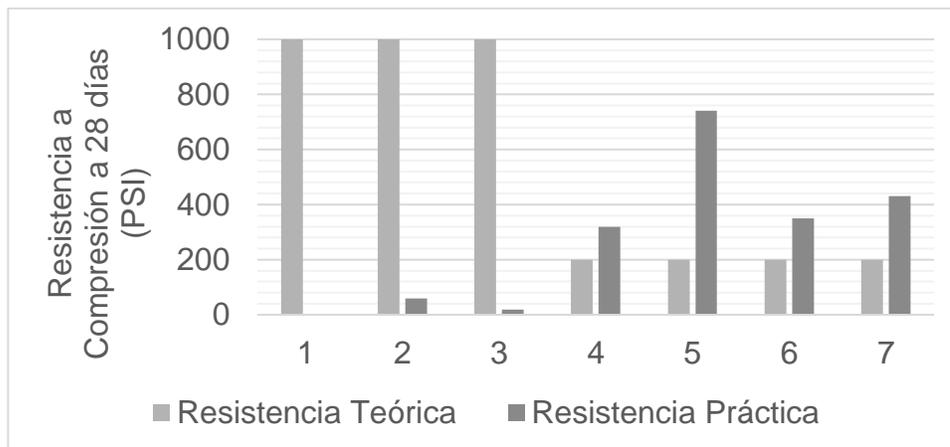
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Resultados promedio de la resistencia a compresión de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas

Identificación de la mezcla	Resistencia a compresión a diferentes edades (PSI)			
	1 día	3 días	7 días	28 días
1	N.E.	N.E.	11	N.R.C.
2	N.E.	N.E.	59	59
3	N.E.	N.E.	N.R.C.	19
4	N.E.	N.E.	240	320
5	370	580	630	740
6	N.E.	170	350	350
7	170	440	470	430
*N.E. No se realizó el ensayo				
*N.R.C. No registró carga el equipo de compresión				

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Comparación de la resistencia a compresión a 28 días teórica y práctica de las mezclas de concreto liviano de baja densidad evaluadas



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Ensayo estándar para resistencia a compresión**



Fuente: elaboración propia.



## **6. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **6.1. Caracterización de la perlita expandida**

La perlita expandida fue el único agregado utilizado para la elaboración de las mezclas. La perlita compone más del 40 % de la masa de las mezclas realizadas. En todas las mezclas realizadas se utilizó el mismo tipo de perlita expandida, el cual fue proporcionado por el mismo proveedor para garantizar que fuese del mismo origen para todas las mezclas. Se caracterizó en el Laboratorio CETEC del Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

#### **6.1.1. Granulometría y módulo de finura**

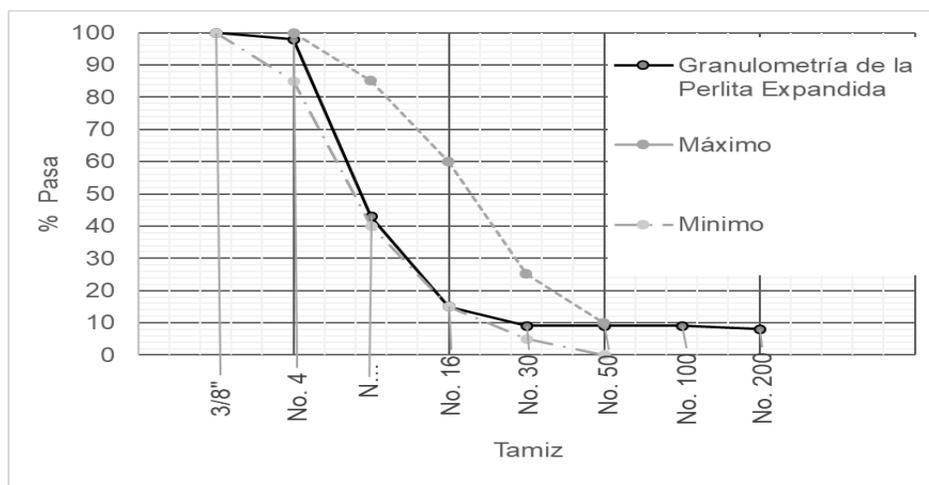
La perlita expandida pasa el tamiz con abertura de 4,75 mm (No. 4), por lo que es clasificada como agregado fino. A pesar de que las mezclas elaboradas contienen únicamente agregado fino, las normas ASTM C332 y ACI 523.1R-06 establecen que el nombre adecuado es concreto y no mortero. Se define como concreto, debido a que el concreto liviano de baja densidad es un derivado del concreto celular (cemento hidráulico, agua y aditivos espumantes).

La granulometría obtenida no contiene exceso o ausencia de algún tamaño de partícula, lo cual se ve reflejado en la curva granulométrica. La adecuada combinación de diferentes tamaños de partículas permite predecir que el concreto producido presentará resultados satisfactorios en su trabajabilidad.

En el capítulo 2 se menciona que la norma ASTM C332 establece los parámetros requeridos para que la perlita expandida sea apta para utilizarla en

mezclas de concreto. La siguiente figura muestra los límites granulométricos establecidos y la curva granulométrica obtenida de la perlita expandida a partir de los ensayos realizados.

**Figura 23. Límites granulométricos de la Norma ASTM C332 y curva granulométrica de la perlita analizada**



Fuente: elaboración propia.

La perlita expandida cumple con los límites establecidos en la norma, por lo que es apta para su uso en la elaboración de concreto. El cumplimiento de los límites granulométricos garantiza poca demanda de agua y de cemento, buena trabajabilidad, adecuado para ser bombeado, concreto económico, porosidad apropiada, menor contracción del concreto y durabilidad del mismo.

El módulo de finura de la perlita expandida es superior al módulo de finura de agregados finos para un buen concreto. Sin embargo, agregados con granulometrías diferentes pueden tener el mismo módulo de finura. La perlita posee partículas más gruesas en comparación a los agregados finos utilizados

para concretos convencionales. La ausencia de partículas más finas puede provocar que el concreto elaborado presente dificultad para acabado con textura superficial lisa o realizar un acabado de forma manual.

### **6.1.2. Densidad aparente**

La norma ASTM C332 indica los límites de la densidad aparente con los que debe cumplir la perlita expandida para ser utilizada. El resultado obtenido para la densidad aparente compactada y la densidad aparente suelta cumple con los límites establecidos, lo cual indica de manera general su calidad y aptitud para ser usado en mezclas de concreto liviano y aislante.

El módulo de finura obtenido y la densidad aparente compactada indican que la perlita expandida es un material de partículas gruesas y livianas, lo que garantiza vacíos en su interior de las partículas. Los vacíos en el interior del agregado permiten que exista una menor transferencia de calor en elementos de concreto con perlita expandida como agregado

### **6.1.3. Materia orgánica en los agregados finos**

El resultado obtenido después de sumergir el agregado en el hidróxido de sodio diluido al 3 % fue 0. El resultado garantiza que la perlita expandida no posee impurezas orgánicas, limo, arcilla, esquisto, óxido de hierro, carbón mineral, lignito o partículas ligeras y suaves que comprometan la calidad del concreto.

#### **6.1.4. Densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino**

No existe procedimiento establecido para determinar la densidad relativa de agregados livianos. El procedimiento del ensayo establecido de la norma COGUANOR NTG 41010 h9 (ASTM C 128) no está destinado para usarse con agregados de peso liviano. El procedimiento no garantiza un resultado representativo debido a que los poros en este tipo de agregados no están necesariamente llenos de agua después de la inmersión de 24 horas. Sin embargo, se obtuvo una densidad relativa de 0,4, lo cual presenta correlación con los resultados que garantizan y respaldan a la perlita expandida como un agregado liviano.

En cuanto a la absorción, se determinó que es de 0,4 %. Se sabe que la porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados y se verá afectada por el tamaño de los poros, la permeabilidad y el volumen total de los agregados. La perlita expandida, a pesar de ser un material de partículas gruesas y liviano, posee poros pequeños que permiten crear cierta impermeabilidad en el agregado. Por ende, hay que considerar que el porcentaje de absorción puede influir en la relación agua-cemento y trabajabilidad del concreto.

## **6.2. Concreto fresco**

Se denomina concreto fresco a partir del momento que se agrega el último componente durante el proceso de mezclado. La evaluación adecuada del concreto fresco garantiza calidad en las propiedades del concreto en estado endurecido.

### **6.2.1. Proceso de elaboración del concreto**

El proceso de elaboración del concreto liviano de baja densidad debe ser controlado minuciosamente. Se determinó el proceso adecuado para la elaboración en las primeras tres mezclas realizadas. Las mezclas de concreto fueron realizadas en una mezcladora mecánica de concreto de velocidad normal. Para alcanzar las propiedades en estado fresco el proceso de mezclado debe ser realizado de la siguiente manera:

- Homogenizar la perlita expandida con la microfibras previo a introducirlos en la mezcladora.
- Añadir toda la perlita expandida junto con la microfibras y aproximadamente el 80 % del agua necesaria en la mezcladora.
- Mezclar durante un (1) minuto la perlita expandida, la microfibras y el agua y posteriormente añadir el cemento.
- Continuar el proceso de mezclado durante dos minutos, añadir el agua restante y continuar mezclando hasta que se haya homogenizado en su totalidad todos los materiales.
- Verificar que la mezcla se haya homogenizado adecuadamente y, de cumplirse este requisito, añadir los aditivos, iniciando con el Viscoflow (reductor de agua de alto rango) y posteriormente Rheocel (incorporador de aire).
- Continuar mezclando el concreto hasta cumplir 8 minutos de mezcla desde que se añadió el cemento. Verificar si se obtuvieron las características establecidas.

### **6.2.2. Asentamiento del concreto hidráulico**

Debido a la incertidumbre del tipo de agregado no es posible fijar un asentamiento durante el diseño de mezcla. Sin embargo, los asentamientos se encuentran en un rango de 18-23 cm (7"-9"), por lo que se considera que los valores son adecuados para las diferentes aplicaciones del concreto liviano.

### **6.2.3. Temperatura del concreto hidráulico recién mezclado**

Los resultados obtenidos mostraron que el concreto liviano de baja densidad posee un gradiente de temperatura bajo. La temperatura dependió del aporte calorífico de cada uno de sus componentes, proveniente de la reacción química de la pasta cementante con los agregados y aditivos.

### **6.2.4. Densidad aparente (masa unitaria) y rendimiento (volumen de concreto producido) del concreto**

Según los resultados obtenidos, la mezcla con la densidad aparente mayor fue de 724 kg/m<sup>3</sup> y la menor de 401 kg/m<sup>3</sup>. A partir de la mezcla número 4, la diferencia de la densidad aparente teórica y práctica fue menor debido al adecuado proceso de mezclado y las proporciones óptimas de aditivos, reduciendo considerablemente la cantidad de incorporador de aire.

### **6.2.5. Contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado**

El concreto liviano de baja densidad posee alto contenido de aire en estado fresco y en estado endurecido. Se debe garantizar que el contenido del aire en su estado endurecido permanezca. En estado fresco se obtuvieron resultados del contenido de aire en un rango entre 50 y 35 %. Es un resultado poco común y

fuera de los concretos convencionales. Sin embargo, es parte de las características que permiten alcanzar las propiedades deseadas en el concreto.

Para obtener estos porcentajes fue necesario sumar un aditivo incorporador de aire. El aditivo incorporador de aire utilizado es de alto impacto; con una mínima cantidad de aditivo, aumenta considerablemente la cantidad de aire en el concreto. Es importante considerar las especificaciones dadas por el proveedor de aditivos, la cantidad utilizada dependerá del aditivo empleado sin importar que sean especificados para la misma finalidad.

La cantidad óptima de aire en el concreto es del 35 %. Una cantidad óptima de aire permite alcanzar densidades bajas con resistencias relativamente altas. Con la cantidad adecuada de aire se obtiene un buen aislamiento térmico y acústico en el concreto elaborado. Cantidades mayores de aire incorporado comprometen la calidad, alterando las propiedades del concreto.

Figura 24. **Ampliación 16X de la mezcla No. 5 (35 % de aire)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Ampliación 16X de la mezcla No. 6 (50 % de aire)**



Fuente: elaboración propia.

### **6.3. Concreto endurecido**

Una vez el concreto ha perdido el 100 % de su trabajabilidad y ha fraguado en su totalidad, se considera en estado endurecido. Que el concreto alcance su estado endurecido no garantiza que este alcanzó la totalidad de su resistencia en este momento.

#### **6.3.1. Resistencia a compresión del concreto**

Como indica el ACI 523.1, fue necesario realizar mezclas de ajuste. Las mezclas 1, 2 y 3 fueron realizadas para ajustar características del concreto en estado fresco. No se puede garantizar veracidad de los resultados de su estado endurecido debido a que no se tenía una metodología establecida para el proceso de elaboración del concreto. Así mismo las proporciones de materiales y aditivos

para garantizar calidad en estado fresco y endurecido en las primeras tres mezclas no era la adecuada.

La resistencia teórica establecida no podía ser determinada como se realiza en un diseño de mezcla de concreto convencional. Los datos propuestos o establecidos de resistencia a compresión teóricos son con base en investigaciones previas realizadas por diversos autores. Es importante mencionar que la perlita expandida comercializada a nivel mundial no es estándar. La calidad está en función de las características de la materia extraída, el proceso de expansión aplicado y el control de calidad durante su expansión.

La resistencia más alta obtenida es de 5,1 N/mm<sup>2</sup> (740 PSI), la cual corresponde a la mezcla con menor aire incluido (35 %). La resistencia obtenida en las mezclas 4, 5, 6 y 7 es superior a la resistencia esperada. La resistencia a compresión obtenida con las últimas 4 mezclas garantiza la calidad del concreto liviano de baja densidad apto para los diferentes usos indicados.

El ACI 523.1 indica que no se debe realizar ensayo a compresión de los especímenes a 1 y 3 días, debido a la baja resistencia a compresión de este tipo de concreto. Para fines de investigación se realizaron ensayos a 24 horas, la dificultad de realizar este ensayo era extraer la muestra del molde sin lastimarla. Para poder obtener los especímenes sin dañarlos fue necesario utilizar moldes de metal de 4" de diámetro por 8" de altura.

**Figura 26. Espécimen dañado durante el proceso de extracción de molde de plástico**



Fuente: elaboración propia.

Se realizó ensayo a compresión a 24 horas desde la mezcla No. 5 a la No. 7, fue posible realizar el ensayo únicamente en 2 mezclas distintas. Se descartó el ensayo a 24 horas de la mezcla No. 6, la cual contenía retardante de fraguado, los especímenes permanecían demasiado frágiles para ser manipulados. Los especímenes de la mezcla No. 6 tuvieron que ser nivelados, debido a que el retardante de fraguado provocó que la superficie se asentara previo a que alcanzara su estado endurecido, creando una superficie cóncava en los especímenes.

Figura 27. **Especímenes de la mezcla No. 6 24 horas después de elaboración**



Fuente: elaboración propia.

Para la edad de 3 días se realizaron pruebas de compresión a 3 mezclas. Para la mezcla No. 4 se realizó únicamente ensayo a 7 y 28 días, siguiendo el procedimiento e indicaciones del ACI 523.6.

En las mezclas evaluadas durante todo el proceso fue evidente el crecimiento entre cada edad evaluada. A pesar de utilizarse cemento de alta resistencia inicial, el aumento de resistencia fue lento pero constante durante los 28 días evaluados.



## CONCLUSIONES

1. La perlita expandida puede utilizarse como agregado en concreto, limitando su uso para aplicaciones no estructurales debido a sus características físicas y propiedades mecánicas que lo catalogan como un agregado frágil.
2. La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto evaluadas varió en función de la cantidad de aire incorporado. En el resultado de la densidad aparente en estado fresco, a mayor densidad y menor aire, mayor resistencia a compresión.
3. Con base en los datos mineralógicos de la perlita expandida, no presenta problemas con respecto a sus posibles reacciones con el cemento y aditivos. Se considera un agregado inerte, no aporta a la reacción química del agua con el cemento y aditivos.
4. Los pequeños poros de la perlita expandida crean una superficie casi impermeable, por lo que presenta baja absorción. Es un agregado poroso que permanece liviano al humedecerse, a diferencia de otros, como los agregados de pómez.
5. El principal problema de la perlita expandida para su uso como agregado en mezclas de concreto es el minucioso cuidado que se requiere para el proceso de mezclado. Debe garantizarse el adecuado proceso y metodología para garantizar la calidad del concreto en estado fresco y endurecido. En este sentido la perlita expandida no es diferente a otros

agregados livianos disponibles, que requieren cuidados especiales durante el proceso de mezclado.

6. La calidad de la perlita expandida no es estándar. Es necesaria la evaluación y análisis de la perlita expandida a utilizar en la elaboración de concreto. En Guatemala se contactó con un importador de perlita expandida, a pesar de la existencia de bancos del mineral perlita dentro del territorio nacional, no se pudo obtener perlita expandida localmente.
7. Debido a que la perlita expandida presenta variación en la geometría de sus partículas y diferencia en sus características y propiedades respecto de los agregados utilizados en concretos convencionales, provoca que los concretos elaborados con aquella requieran procesos de diseño y elaboración diferente a los concretos convencionales.
8. Los diseños de mezcla de los concretos elaborados con perlita expandida acá presentados no se deben considerar un estándar. Es necesaria la evaluación y determinación de las características del concreto en estado fresco por medio de mezclas de ajuste, hasta obtener las cualidades requeridas.

## RECOMENDACIONES

1. Impulsar la investigación y aprovechar el recurso disponible de bancos de perlita existentes en Guatemala es importante, ya que es un mineral con una gran variedad de aplicaciones que van más allá del campo de la construcción.
2. Cuantificar la cantidad de perlita en los diferentes bancos localizados en el territorio de Guatemala para evaluar factibilidad de su extracción.
3. Evaluar la calidad de la perlita en Guatemala y su capacidad para procesarla y transformarla en perlita expandida para diferentes usos, especialmente en la construcción.
4. Desarrollar investigaciones para implementación de concreto con perlita expandida para aislamiento térmico, que implicará ahorros de consumo de energía.
5. Realizar investigaciones para la optimización del concreto con perlita expandida, para luego ser producido a nivel industrial.
6. Realizar investigaciones para análisis de la compatibilidad de la perlita expandida con otros agregados o materias primas, para desarrollar concretos livianos y aislantes con diferentes propiedades y características.
7. Investigar la durabilidad de concretos livianos de baja densidad con perlita expandida, bajo condiciones climáticas de Guatemala.

8. Investigar la factibilidad de elaboración de prefabricados de concreto liviano de baja densidad con perlita expandida para elementos estructurales y no estructurales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ABD, Mohamed; FAROUK, Mariam. *Optimization of lightweight concrete process by gray-taguchi method*. Michigan: ACI Materials Journal, 2015. 9 p.
2. ALVARADO CARÍAS, Carlos Humberto. *La perlita de Guatemala*. Guatemala: Dirección General de Minería. 1998. 8 p.
3. ÁLVAREZ, Gorka y SÁEZ, Eduardo. *Hormigón ligero: aspectos técnicos y estéticos*. Madrid: CEMEX, 2012. 148 p.
4. ALYOUSEF, Rayed; BENJEDDOU, Omrane; SOUSSI, Chokri; KHADIMALLAH, Mohamed y JEDIDI, Malek. *Experimental study of new insulation lightweight concrete block floor based on perlite aggregate, natural sand and sand obtained from marble waste. Advances in materials, science, and engineering*. Alkharj: Necmettin Maraşlı, 2019. 14 p.
5. American Concrete Institute Committee 211. *Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete. (ACI 211.2-98)*. Michigan: American Concrete Institute (ACI), 1998. 18 p.
6. American Concrete Institute Committee 213. *Guide for structural lightweight aggregate concrete. (ACI 213R-14)*. Michigan: American Concrete Institute (ACI), 2014. 45 p.

7. American Concrete Institute Committee 229. *Controlled low strength materials (CLSM). (ACI 229R-94)*. Estados Unidos: American Concrete Institute (ACI), 2003. 9 p.
8. American Concrete Institute Committee 523. *Guide for cast-in-place low-density cellular concrete. (ACI 523.1R-06)*. Estados Unidos: American Concrete Institute (ACI), 2006. 13 p.
9. American Society for Testing and Materials. *Book of standards. Standard specifications for concrete and aggregates. Vol. 04.02*. Pensilvania: ASTM, 2019. 1 210 pp.
10. BROUK, John. *Perlite aggregate: its properties and uses*. Michigan: ACI Materials Journal, 1949. 6 p.
11. BROUK, John. *Perlite insulating concrete*. Michigan: ACI Materials Journal. 1954. 11 pp.
12. CELIK, Atila; KILIC, Ahmet and CAKAL, Gaye. *Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material*. Adana: National Boron Research Institute, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2013. 12 p.
13. Comisión Guatemalteca de Normas. *Normas relacionadas con la industria de la construcción*. Guatemala: Ministerio de Economía, 2005. 345 p.
14. ERDEM, Tahir; CAGLA, Meral and TOKYAY, Mustafa. *Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements*. Ankara: Cement and Concrete Composites. 2007. 10 p.

15. Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI). *Lightweight concrete. History, applications, economics*. Illinois: ESCSI. 1971. 21 p.
16. HARMON, Kenneth. *Engineering properties of structural lightweight concrete*. Carolina del Norte: Carolina Stalite Company. 2000. 11 pp.
17. JEDIDI, Malek; BENJEDDOU, Omrane and SOUSSI, Chokri. *Effect of expanded perlite aggregate dosage on properties of lightweight concrete*. Sfax: University Tunis El Manar, National Engineering School of Tunis. 2015. 14 p.
18. KARA, Ç.; KARACASU, M.; CANBAZ, M. and AKALIN, K. *The evaluation of performance properties of asphalt concrete with expanded perlite*. Iran: Electronic Journal of Occupational Improvement and Research. 2015. 9 p.
19. KHONSARI, Vassiliki. *Effects of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete*. Teherán: Sharif University of Technology. 2010. 9 p.
20. KLUGET, Ralph; SPARKST, Morris and TUMA, Edward. *Structural lightweight-aggregate concrete*. Michigan: ACI Materials Journal. 1949. 19 p.
21. KOSMATKA, Steven; KERKHOFF, Beatrix; PANARESE, William; TANESI, Jussara. *Diseño y control de mezclas de concreto*. Illinois: Portland Cement Association (PCA). 2004. 469 p.

22. LAMNOD, Joseph; PIELERT, James. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. Pensilvania: American Standard for Testing and Materials International (ASTM). 2006. 661 p.
23. National Federation of Structural Concrete and Fédération Internationale Du Béton (FIB). *Lightweight aggregate concrete: extracts from codes and standards*. State-of-the-art report. Lausanne: NFSC. 1999. 46 p.
24. SINGH, Manjit; MRIDUL, Garg. *Perlite-based building materials - a review of current applications*. Nottingham: University of Nottingham. 1991. 7 p.
25. TOBAR, Percy. *Exploración, caracterización fisicoquímica y estimación de reservas de los depósitos de perlita de Guatemala*. Guatemala: Dirección General de Minería. 1997. 5 p.
26. U.S. Geological Service. *Perlite. Minerals Yearbook*. Estados Unidos: U.S. Geological Service. 1991. 7 p.
27. WILSON SUTHERLAND, Harry. *Lightweight aggregates - vermiculite, perlite, pumice - for insulating concretes*. Ottawa: Energy, Mines and Resources Canada (CANMET). 1981. 28 p.
28. ZOLLO, Ronald; HAYS, Carol. *Engineering material properties of a fiber reinforced cellular concrete*. Michigan: ACI Materials Journal. 1998. 5 p.

# ANEXOS

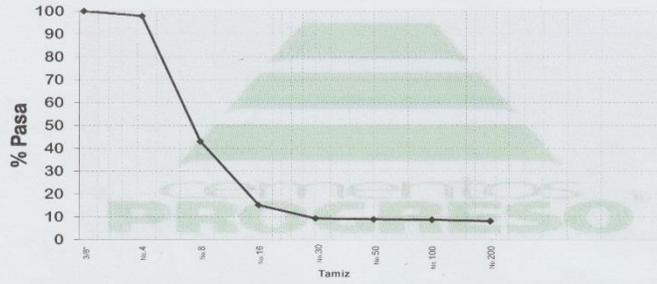
## Anexo 1. Informe de ensayo de evaluación de las características y propiedades de la perlita expandida

 <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Av. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala. Tel: 2286-4178    laboratorioctec@cempro.com		 Acreditado OGA-LE-052-13	Orden de Trabajo: 33408 Fecha: 2019-02-20 Página: 1 De 1 Impresión: 2019-03-11
Cliente: C I + D / CETEC Dirección: 15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA Contacto: ESTUARDO HERRERA / ARIEL OSORIO Teléfono: 2286-4100	Procedencia: NO INDICA Muestra: PERLITA Proyecto: CONCRETO CELULAR / TESIS HECTOR VASQUEZ Fecha de Ensayo: 2019-03-11		

**INFORME DE ENSAYOS**  
LABORATORIO DE AGREGADOS

Granulometría de Agregado Fino COGUANOR NTG-41010 h1



Tamaño nominal	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
Masa retenida (g)	0.0	1.1	27.4	13.9	2.9	0.2	0.1	0.3
% Pasa	100	98	43	15	9	9	9	8
Total tamizado (g):	50.0							

Densidad Relativa (s.s.s.) COGUANOR NTG-41010 h09	0.42	Densidad Aparente Compactada (kg/m³) COGUANOR NTG-41010 h2	170
Absorción (%) COGUANOR NTG-41010 h09	0.4	Densidad Aparente Suelta (kg/m³) COGUANOR NTG-41010 h2	152
Contenido de humedad (%) COGUANOR NTG-41010 h19	0.4	Densidad Aparente Húmeda (kg/m³) COGUANOR NTG-41010 h2	--
Materia Orgánica (No. color) COGUANOR NTG-41010 h4	0	Módulo de Finura (MF) COGUANOR NTG-41010 h1	4.17

  
 Ferngrid Quiñeco  
 Analista de Laboratorio

  
 Jefe de Laboratorio / Coordinador

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratorioctec@cempro.com.  
La reducción de la muestra se llevo a cabo en base al método planteado en norma COGUANOR NTG-41010 h11.  
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga integramente.

Observaciones:

SGL-CT-AG-IE-01 Rev. 04

Fuente: Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

## Anexo 2. Informe de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto liviano de la mezcla No. 4



**CEMENTOS PROGRESO®**  
Compartimos Sueños. Construimos Realidades.

CEMENTOS PROGRESO, S.A.  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181



ACREDITADO  
OGA-IE-052-13

Fecha impresión: 2019.03.29  
Página: 1 de 1  
Usuario: DVILLATORO  
OT: 33587  
Fecha OT: 2019.03.25

Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO.	Proyecto: CONCRETO LIVIANO DE BAJA DENSIDAD TESIS
Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA	Dirección: 15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA
Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO	Muestra: CILINDROS
Teléfono: 22864100	Analista: DELBERT VILLATORO

**INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1**

No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in)/ Flujo (mm)	Masa (kg)	Area (mm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia (PSI)	T. Rot
1		33587-0		2019.03.21	2019.03.28	7	CLIVIANO	6.50						
2		33587-03		2019.03.21	2019.04.18	28	CLIVIANO	6.50						
3		33587-04		2019.03.21	2019.04.18	28	CLIVIANO	6.50						
4		33587-05		2019.03.21	2019.04.18	28	CLIVIANO	6.50						
5		33587-06		2019.03.21	2019.05.16	56	CLIVIANO	6.50						
6		33587-07		2019.03.21	2019.05.16	56	CLIVIANO	6.50						
7		33587-01		2019.03.21	2019.03.28	7	CLIVIANO	6.50	1.01	8091	14.2	1.8	260	2
8		33587-02		2019.03.21	2019.03.28	7	CLIVIANO	6.50	1.01	8091	12.1	1.5	220 <sup>†</sup>	2

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos; 6 = Similar tipo 5 pero extremo puntiagudo

Observaciones: CONTENIDO DE AIRE: 40%; MASA UNITARIA 660KG/M3

  
Analista

  
Jefe Laboratorio/Coordinador

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo: laboratoriocotec@compro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.

SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

Fuente: Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

**Anexo 3. Informe de ensayo de resistencia a la compresión de  
especímenes cilíndricos de concreto liviano de la mezcla  
No. 5**



**CEMENTOS PROGRESO**  
Compartimos Sueños. Construimos Realidades.

CEMENTOS PROGRESO, S.A.  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181



**OGA**  
ACREDITADO  
OGA-LE-052-13

Fecha impresión: 2019.08.01  
Página: 1 de 1  
Usuario: GNOCHEZ  
OT: 33954-  
Fecha OT: 2019.06.05

Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO.	Proyecto: CONCRETO LIVIANO BAJA DENSIDAD
Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA	Dirección: TESIS JORGE DELGADO
Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO	Muestra: CILINDROS
Teléfono: 22864100	Analista: DELBERT VILLATORO

**INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1**

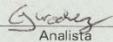
No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in/ Flujo (mm))	Masa (kg)	Area (mm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Resis-tencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resis-tencia (PSI)	T. Rot
1	CIL 1	33954-01	CILINDRO	2019.06.05	2019.06.06	1		8.25						
2	CIL 2	33954-02	CILINDRO	2019.06.05	2019.06.06	1		8.25						
3	CIL 3	33954-03	CILINDRO	2019.06.05	2019.06.08	3		8.25	1.32	8091	30.1	3.7	540	2
4	CIL 4	33954-04	CILINDRO	2019.06.05	2019.06.08	3		8.25	1.39	8091	34.5	4.3	620	2
5	CIL 5	33954-05	CILINDRO	2019.06.05	2019.06.12	7		8.25	1.39	8091	34.4	4.3	620	2
6	CIL 6	33954-06	CILINDRO	2019.06.05	2019.06.12	7		8.25	1.44	8091	35.6	4.4	640	2
7	CIL 7	33954-07	CILINDRO	2019.06.05	2019.07.03	28		8.25	1.24	8091	40.8	5.0	730	2
8	CIL 8	33954-08	CILINDRO	2019.06.05	2019.07.03	28		8.25	1.27	8091	41.9	5.2	750	2
9	CIL 9	33954-09	CILINDRO	2019.06.05	2019.07.31	56		8.25	1.34	8091	35.3	4.4	630	2
10	CIL 10	33954-10	CILINDRO	2019.06.05	2019.07.31	56		8.25	1.34	8091	36.7	4.5	660	2

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos;  
6 = Similar tipo 5 pero extremo puntiagudo

**INFORME PRELIMINAR**  
Fecha: 01/08/2019

Observaciones: MUESTREO Y DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE EN ORDEN DE TRABAJO. MASA UNITARIA (KG/M3) 697.0 RELACION A/C 0.60

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratoriocotec@cempro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.

  
Analista

  
Jefe Laboratorio/Coordinador

SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

No. 22743  
CETEC

Fuente: Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

## Anexo 4. Informe de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto liviano de la mezcla No. 6



**CEMENTOS PROGRESO, S.A.**  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181

Compartimos Sueños. Construimos Realidades.



**ACREDITADO**  
OGA-LE-052-13

Fecha impresión: 2019.08.05  
Página: 1 de 1  
Usuario: GNOCHEZ  
OT: 33958  
Fecha OT: 2019.06.07

Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO.	Proyecto: CONCRETO LIVIANO BAJA DENSIDAD
Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA	Dirección: TESIS JORGE DELGADO
Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO	Muestra: CILINDROS
Teléfono: 22864100	Analista: DELBERT VILLATORO

INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1

No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in/ Flujo (mm))	Masa (kg)	Area (mm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Resis-tencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resis-tencia (PSI)	T. Rot
1		33958-03	CILINDROS	2019.06.07	2019.06.10	3		9.00	0.95	8091	9.3	1.1	170	5
2		33958-04	CILINDROS	2019.06.07	2019.06.10	3		9.00	0.95	8091	9.2	1.1	170	5
3		33958-01	CILINDROS	2019.06.07	2019.06.08	1		9.00						
4		33958-02	CILINDROS	2019.06.07	2019.06.08	1		9.00						
5		33958-05	CILINDROS	2019.06.07	2019.06.14	7		9.00	0.97	8091	18.1	2.2	330	3
6		33958-06	CILINDROS	2019.06.07	2019.06.14	7		9.00	1.01	8091	20.5	2.5	370	2
7		33958-07	CILINDROS	2019.06.07	2019.07.05	28		9.00	0.99	8091	20.0	2.5	360	2
8		33958-08	CILINDROS	2019.06.07	2019.07.05	28		9.00	0.97	8091	19.1	2.4	340	2
9		33958-09	CILINDROS	2019.06.07	2019.08.02	56		9.00	0.91	8091	17.9	2.2	320	2
10		33958-10	CILINDROS	2019.06.07	2019.08.02	56		9.00	0.93	8091	18.3	2.3	330	2

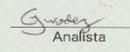
T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos; 6 = Similar tipo 5 pero extremo puntigudo

INFORME PRELIMINAR

Fecha: 05/08/2019



Observaciones: MUESTREO REALIZADO POR EL CLIENTE.



Analista



Jefe Laboratorio/Coordinador

SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

No. 22766

CETEC

Fuente: Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

## Anexo 5. Informe de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto liviano de la mezcla No. 7



**CEMENTOS PROGRESO®**  
Compartimos Sueños. Construimos Realidades.

CEMENTOS PROGRESO, S.A.  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181



ACREDITADO  
OGA-IE-052-13

Fecha impresión: 2019.07.15  
Página: 1 de 1  
Usuario: DVILLATORO  
OT: 34011-  
Fecha OT: 2019.06.14

Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO.	Proyecto: CONCRETO LIVIANO BAJA DENSIDAD
Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA	Dirección: TESIS JORGE DELGADO
Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO	Muestra: CILINDROS
Teléfono: 22864100	Analista: DELBERT VILLATORO

**INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1**

No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in)/ Flujo (mm)	Masa (kg)	Area (mm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Resis-tencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resis-tencia (PSI)	T. Rot
1		34011-09	CILINDROS	2019.06.14	2019.08.09	56		9.00						
2		34011-10	CILINDROS	2019.06.14	2019.08.09	56		9.00						
3		34011-01	CILINDROS	2019.06.14	2019.06.15	1		9.00	1.19	8091	9.9	1.2	180	2
4		34011-02	CILINDROS	2019.06.14	2019.06.15	1		9.00	1.21	8091	8.2	1.0	150	2
5		34011-05	CILINDROS	2019.06.14	2019.06.21	7		9.00	1.08	8091	27.6	3.4	500	2
6		34011-06	CILINDROS	2019.06.14	2019.06.21	7		9.00	1.06	8091	24.3	3.0	440	2
7		34011-03	CILINDROS	2019.06.14	2019.06.28	14		9.00	1.18	8091	25.0	3.1	450	2
8		34011-04	CILINDROS	2019.06.14	2019.06.28	14		9.00	1.19	8091	24.2	3.0	430	2
9		34011-07	CILINDROS	2019.06.14	2019.07.12	28		9.00	1.06	8091	22.8	2.8	410	2
10		34011-08	CILINDROS	2019.06.14	2019.07.12	28		9.00	1.05	8091	24.7	3.1	440	2

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos;  
6 = Similar tipo 5 pero extremo puntiagudo

**INFORME PRELIMINAR**  
Fecha: 16/07/2019

Observaciones: MUESTREO Y DATOS PROPORCIONADOS POR CETEC, EN FECHA DE TRABAJO.

  
Analista

  
Jefe Laboratorio/Coordinador

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratoriocetec@cempro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.

SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

Fuente: Centro Tecnológico de Cementos Progreso.