

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE
INGENIERO CIVIL**

**UTILIZACIÓN DE HORMIGÓN CELULAR COMO BASE Y
SUBBASE EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS**

LUIS RAMIRO MEJÍA ESPINOSA

DIRECTOR: ING. JOSÉ SALVADOR U.

QUITO, 2010

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi esposa Carolina, a mis hijos, a la memoria de mis padres, para todos, y cada uno mis amigos y compañeros que con su ánimo, entusiasmo, y buenos consejos, me motivaron a seguir adelante y no posponer por más tiempo el trabajo final, de esta hermosa profesión.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradecer a Dios por cada instante de mi vida, expresar mi más sincero reconocimiento al director de tesis, ingeniero José Salvador, por el apoyo incondicional, la paciencia, consejos y confianza. Su vasta experiencia en el campo de la enseñanza, su gran capacidad profesional y su extraordinario humanismo, han permitido que se pueda llegar a culminar el presente trabajo.

A los ingenieros, Fredi Paredes y Lauro Lara por su valioso tiempo, el soporte brindado, y las recomendaciones oportunas, en el desarrollo de la presente disertación, “Utilización de Hormigón Celular Como Base y Subbase en la Construcción de Carreteras”, mi sincero agradecimiento y eterna gratitud.

Un especial reconocimiento para todos los profesionales del Laboratorio de Materiales de la Construcción de la Universidad Católica, encabezados por el ingeniero Guillermo Realpe. A los tecnólogos y asistentes; Mauricio Guillén, Marcelo Chávez, Edison Granja, José Segovia, Abraham, por la ayuda y colaboración prestada en momentos que se requirió de su asistencia. Al personal administrativo de secretaría de la Facultad de Ingeniería, en especial a Mario Jiménez, y por último a todas las personas, que de una u otra manera se involucraron en el proceso de investigación, consulta y desarrollo de este proyecto. Gracias.

RESUMEN

El propósito del presente trabajo, es el estudio y desarrollo de un material elaborado a base de cemento portland, arena fina, agua y espuma preformada, conocido en la industria de la construcción con el nombre de Hormigón Celular, y que debe poseer características y propiedades adecuadas para sustituir satisfactoriamente a la base y subbase, utilizadas tradicionalmente en las vías de comunicación, conformadas con materiales pétreos.

El objetivo principal de la investigación, es el de proponer una conceptualización básica sobre Hormigones Celulares, de tal manera que sirva como punto de partida para procesos investigativos futuros. Para el efecto, se recopiló información actualizada sobre el tema de Hormigones Celulares que, también, son conocidos como Morteros Celulares, Concretos Celulares, Concretos Espumosos, Hormigón Poroso, Hormigón Aireado, entre otros. La disertación aspira a optimizar el conocimiento, diseño y aplicación del Hormigón Celular como base y subbase para pavimentos, rígidos o flexibles. Se evaluará las normas y parámetros técnicos existentes, proponiendo alternativas a las normas y, sobre todo, la utilización de materiales existentes en la zona donde se requieran las obras civiles.

En consecuencia, el trabajo se ha desarrollado en siete capítulos en los que se presenta información sobre; generalidades; descripción de la base y subbase tradicional con materiales pétreos; antecedentes; conceptos básicos y aplicaciones

del Hormigón Celular; análisis y caracterización de los materiales componentes; arena fina, cemento, agua y espuma preformada; criterios de diseño y dosificación; cualidades del hormigón fresco y endurecido; conceptos para el mezclado, transporte y vertido del producto; comparación de precios unitarios.

Para concluir, como capítulo final, se presentan las conclusiones y recomendaciones generales, el análisis comparativo de costos, entre la base y subbase tradicionales y una estructura de Hormigón Celular. También, se enumeran las ventajas y desventajas de su utilización en construcción vial, y como complemento, se plantean líneas de investigación futuras.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI

CAPÍTULO 1

1	GENERALIDADES.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Justificación.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Generales.....	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Contenido.....	5

CAPÍTULO 2

2	BASE Y SUBBASE.....	7
2.1	Generalidades.....	7
2.2	Agregados.....	9
2.2.1	Origen de los agregados.....	10
2.2.2	Extracción de los agregados.....	11
2.3	Funciones de la base y subbase.....	13
2.4	Características de la base y subbase.....	14

2.4.1	Granulometría.....	15
2.4.2	Límites de consistencia.....	26
2.4.3	Límite Líquido.....	28
2.4.3.1	Límite Plástico.....	29
2.4.3.2	Índice de Plasticidad.....	30
2.4.4	Desgaste.....	32
2.4.4.1	Dureza y desgaste a la abrasión.....	33
2.4.4.2	Integridad y durabilidad.....	35
2.4.5	Equivalente de arena.....	38
2.4.6	Valor relativo de soporte CBR.....	40

CAPÍTULO 3

3	HORMIGÓN.....	43
3.1	Generalidades.....	43
3.2	Desarrollo histórico.....	47
3.2.1	Hormigón Romano.....	47
3.2.2	Hormigón Moderno.....	52
3.3	Hormigón Liviano.....	57
3.3.1	Hormigón con agregados livianos.....	59
3.3.2	Hormigón con inclusión de aire.....	66
3.3.2.1	Hormigón Gaseoso.....	67
3.3.2.2	Hormigón con Agente Aireador.....	70
3.4	Hormigón Celular.....	73
3.4.1	Procedencia.....	74
3.4.1.1	Materiales de Baja Resistencia Controlad.....	76
3.4.1.2	Materiales de Baja Resistencia y Baja Densidad Controlada.....	80
3.4.2	Definición.....	82
3.4.3	Características y propiedades.....	86
3.4.4	Efectos en las propiedades del Hormigón Celular.....	91
3.4.5	Aplicaciones.....	93

CAPÍTULO 4

4	CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES.....	98
4.1	Introducción.....	98
4.2	Componentes de la mezcla.....	101
4.3	Caracterización y análisis.....	107
4.3.1	Cemento.....	107
4.3.2	Agregado fino.....	116
4.3.2.1	Definición.....	116
4.3.2.2	Especificaciones técnicas.....	117
4.3.2.3	Substancias deletéreas.....	118
4.3.2.4	Granulometría.....	118
4.3.3	Análisis de un agregado convencional.....	122
4.3.4	Agua para el amasado.....	124
4.3.4.1	Límite de sustancias.....	124
4.3.4.2	Sedimento o partículas en suspensión.....	126
4.3.4.3	Materia orgánica.....	126
4.3.4.4	Carbonatos y bicarbonatos.....	127
4.3.4.5	Sulfatos.....	127
4.3.4.6	Cloruros.....	128
4.3.4.7	Sales de hierro.....	128
4.3.4.8	Agua de mar.....	128
4.3.4.9	Otros tipos de agua.....	129
4.4	Agente espumógeno.....	131
4.4.1	Espumas.....	131
4.4.1.1	Formación de las espumas.....	132
4.4.1.2	Maduración de las espumas.....	135
4.4.1.3	Ruptura de las espumas.....	136
4.4.2	Formulación de la solución espumosa.....	137
4.4.2.1	Tensoactivos.....	138

4.4.2.2	Espesantes.....	144
4.4.2.3	Estabilizantes.....	145
4.5	Análisis de muestras.....	148
4.5.1	Muestra modificada San Antonio.....	148
4.5.2	Muestra Río Blanco.....	149
4.5.3	Resultado del laboratorio.....	150
4.6	Análisis comparativo de costos.....	153
4.6.1	Costo unitario de subbase convencional.....	153
4.6.2	Costo unitario de base convencional.....	154
4.6.3	Costo unitario de Hormigón Celular.....	155

CAPÍTULO 5

5	CONTROL DE CALIDAD.....	156
5.1	Generalidades.....	156
5.2	Hormigón fresco.....	160
5.2.1	Consistencia o fluidez de la mezcla.....	160
5.2.2	Porcentaje de aire incorporado.....	163
5.2.3	Tiempo de fraguado.....	165
5.3	Hormigón sólido.....	167
5.3.1	Resistencia a la compresión.....	168
5.3.2	CBR o Valor Relativo de Soporte.....	171
5.3.3	Densidad seca.....	174
5.3.4	Resistencia a la tracción indirecta.....	175

CAPÍTULO 6

6.	PROPIEDADES Y PRUEBAS.....	176
6.1.	Materiales utilizados en la mezcla.....	176
6.1.1.	Agregado fino.....	176
6.1.2.	Agua.....	178
6.1.3.	Solución espumosa.....	179

6.2.	Diseño de la mezcla.....	181
6.2.1.	Elaboración de la mezcla.....	185
6.3.	Propiedades físicas y mecánicas.....	186
6.3.1.	Arena.....	186
6.3.2.	Consistencia de la mezcla.....	187
6.3.3.	Aire incorporado a la mezcla.....	188
6.3.4.	Resistencia a la Compresión.....	191
6.3.5.	Valor de Soporte Relativo, CBR.....	193
6.3.6.	Resistencia a la Tracción Indirecta.....	196

CAPÍTULO 7

7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	198
7.1.	Conclusiones.....	198
7.2.	Recomendaciones.....	201
7.3.	Ventajas y desventajas del uso de Hormigón Celular.....	203
7.3.1.	Ventajas.....	203
7.3.2.	Desventajas.....	204
7.4.	Líneas de investigaciones futuras.....	205
	BIBLIOGRAFÍA.....	206

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Corte transversal de un pavimento convencional.....	1
Figura 2.1. Conformación de una subbase convencional.....	8
Figura 2.2. Material pétreo para subbase.....	12
Figura 2.3. Análisis granulométrico.....	20
Figura 2.4. Tamices de alambre debidamente graduado.....	22
Figura 2.5. Método del hidrómetro.....	23
Figura 2.6. Material clasificado para uso en subbase.....	25
Figura 2.7. Copa de Casagrande.....	28
Figura 2.8. Determinación del límite plástico.....	29
Figura 2.9. Equipo para determinación de límites de Atterberg.....	31
Figura 2.10. Máquina de los Ángeles.....	34
Figura 2.11. Ensayo de durabilidad de los agregados.....	37
Figura 2.12. Equipos para el ensayo del Equivalente de Arena.....	39
Figura 2.13. Equipo para ensayo de CBR.....	41
Figura 3.1. El Mausoleo en Roma.....	48
Figura 3.2. Detalle constructivo de un arco romano.....	49
Figura 3.3. El Coliseo Romano.....	50
Figura 3.4. Hormigón encontrado en un acueducto de la antigua Roma.....	51
Figura 3.5. Escoria de alto horno.....	65
Figura 3.6. Bloques fabricados con el Sistema “Hebel”.....	69
Figura 3.7. Espuma preformada saliendo del generador.....	72
Figura 3.8. CLSM utilizado en el relleno de zanjas.....	75
Figura 3.9. CLSM usado en el llenado de cavidades.....	79
Figura 3.10. Relleno Fluido LD-CLSM usado como subbase.....	81
Figura 3.11. Hormigón Celular con Espuma Preformada.....	85
Figura 3.12. Composición del Hormigón Celular.....	87

Figura 3.13. El Hormigón Celular es resistente al fuego.....	90
Figura 3.14. Hormigón Celular de baja densidad.....	92
Figura 3.15. Hormigón Celular en suelo pantanoso.....	96
Figura 3.16. Escultura.....	97
Figura 3.17. Elementos decorativos.....	97
Figura 4.1. Avión detenido en zona de seguridad de Hormigón Celular.....	99
Figura 4.2. Barrera para choques en carretera.....	100
Figura 4.3. Conjunto de burbujas formando una espuma.....	133
Figura 4.4. Espuma sin aditivos.....	139
Figura 4.5. Espuma con aditivos.....	145
Figura 5.1. Fluidez ASTM C 143.....	162
Figura 5.2. Fluidez ASTM D 6103.....	162
Figura 5.3. Enrasado de cilindro.....	164
Figura 5.4. Cálculo de PUV.....	164
Figura 5.5. Ensayo para determinación del Tiempo de Fraguado.....	166
Figura 5.6. Máquina de ensayo para Compresión.....	170
Figura 5.7. Cilindro para CBR.....	172
Figura 5.8. Máquina para CBR.....	172
Figura 5.9. Ensayo ASTM C 496.....	175
Figura 6.1. Generador de espuma.....	185
Figura 6.2. Espuma en la mezcla.....	185
Figura 6.3. Ensayo de consistencia del Hormigón Celular.....	187
Figura 6.4. Llenado del recipiente.....	188
Figura 6.5. PUV.....	188
Figura 6.6. Recipiente lleno.....	190
Figura 6.7. Medición del contenido de aire.....	190
Figura 6.8. Inicio de falla.....	192
Figura 6.9. Si continúa carga.....	192
Figura 6.10. Falla típica.....	192
Figura 6.11. Ensayo de CBR.....	195
Figura 6.12. Penetración en probeta.....	195
Figura 6.13. Preparación del ensayo.....	196

Figura 6.14. Falla por el diámetro.....	196
Figura 7.1. Corte transversal de un pavimento con Hormigón Celular.....	200

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de la base y subbase.....	15
Tabla 2.2. Clasificación de suelos y agregados.....	16
Tabla 2.3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	18
Tabla 2.4. Sistema de clasificación de la ASSTHO.....	19
Tabla 2.5. Relación de la masa de las esferas.....	34
Tabla 2.6. Valores del índice CBR.....	42
Tabla 3.1. Volumen de los elementos presentes en la mezcla.....	45
Tabla 4.1. Composición química, mineralógica y propiedades del cemento.....	108
Tabla 4.2. Porcentaje en peso de sustancias dañinas.....	118
Tabla 4.3. Límites ASTM C 33 para agregado fino.....	119
Tabla 4.4. Granulometría de una muestra convencional.....	122
Tabla 4.5. Límites de substancia norma ASTM C 94.....	125
Tabla 4.6. Granulometría de muestra modificada San Antonio.....	148
Tabla 4.7. Granulometría de muestra Río Blanco.....	149
Tabla 4.8. Resultados de muestra modificada San Antonio.....	150
Tabla 4.9. Resultados de muestra Río Blanco.....	150
Tabla 4.10. Determinación del coeficiente de uniformidad.....	151
Tabla 5.1. Resistencias del Hormigón Celular en función de su densidad.....	168
Tabla 6.1. Resultados de muestra San Antonio modificada.....	176
Tabla 6.2. Granulometría de muestra San Antonio modificada.....	177
Tabla 6.3. Calidad del agua.....	178
Tabla 6.4. Características de agente tensoactivo.....	180
Tabla 6.5. Compresión del Hormigón Celular norma ACI 523.....	182
Tabla 6.6. Determinación del coeficiente de uniformidad.....	186
Tabla 6.7. Propiedades de Hormigón Celular fresco.....	190
Tabla 6.8. Resultados de ensayos Compresión, CBR.....	194

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1. Clasificación de un suelo en función de la granulometría.....	21
Gráfico 2.2. Curva granulométrica.....	22
Gráfico 2.3. Tamaños de partículas de suelo.....	25
Gráfico 2.4. Límites de consistencia de Atterberg.....	27
Gráfico 2.5. Carta de plasticidad para la clasificación de suelo fino.....	30
Gráfico 4.1. Desarrollo de las resistencias en cemento Selvalegre.....	115
Gráfico 4.2. Calor de hidratación cemento Selvalegre.....	115
Gráfico 4.3. Curva granulométrica de muestra y límites ASTM C 33.....	122
Gráfico 4.4. Efecto Giggs-Marangoni.....	135
Gráfico 4.5. Curva granulométrica de muestra modificada San Antonio.....	149
Gráfico 4.6. Curva granulométrica de muestra Río Blanco.....	150
Gráfico 5.1. Comparación de asentamientos en cono de Abrams.....	161
Gráfico 5.2. Relación entre CBR y resistencia a 28 días.....	173
Gráfico 5.3. Preparación de la muestra.....	175
Gráfico 6.1. Curva granulométrica de muestra San Antonio.....	177
Gráfico 6.2. Evolución de la resistencia a la compresión.....	191
Gráfico 6.3. Esfuerzo a la penetración promedio a los 7 y 28 días.....	193
Gráfico 6.4. Correlación resistencia a la compresión-CBR.....	194
Gráfico 6.5. Evolución de la resistencia a la tracción.....	197
Gráfico 6.6. Relación entre la resistencia a la tracción y la compresión.....	197

CAPÍTULO 1

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación, trata el tema “Utilización de Hormigón Celular como Base y Subbase en la Construcción de Carreteras”. Al momento de construir una vía de comunicación, a más del diseño geométrico, parte importante dentro del proyecto, no menos representativo es el diseño del pavimento. El pavimento tradicional, flexible o rígido, esta constituido por un sistema multicapa que se encarga de transferir las cargas exteriores, desde la superficie hasta la subrasante.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.1. Corte transversal de un pavimento convencional

Los procesos constructivos de la base y subbase son similares y consisten en el suministro, transporte, colocación, conformación y compactación de piedra natural, piedra triturada, arena, limo o cualquier otro material granular previamente aprobado. El material utilizado debe ser seleccionado y poseer mayor capacidad de carga que el suelo compactado de la subrasante, en algunos casos, es aceptable la utilización de suelos tratados con cal o cemento, siendo el más utilizado el suelo-cemento, material formado a partir de la mezcla de suelos finos o granulares, cemento y agua que, se compacta y se cura para formar un material endurecido, el cual presenta propiedades mecánicas específicas, todo este tratamiento exige la utilización intensiva de maquinaria especializada.

Las funciones básicas de la subbase son: servir de drenaje al pavimento, y representar un soporte uniforme, que prevenga deformaciones diferenciales de la subrasante debido a contracciones e hinchamientos no uniformes, producidas generalmente, por acción del agua. Siendo el drenaje una de las funciones básicas, para el filtrado del exceso de agua se debe emplear material granular, y la cantidad de finos que pasa el tamiz N° 200, no debe exceder del 8%. En la actualidad, con más frecuencia, se usan geotextiles como elemento drenante de la subbase, los geotextiles son elementos sintéticos permeables, usados sobre rocas o suelos, que poseen propiedades hidráulicas convenientes para las funciones de filtrado y drenaje.

Si bien la base y subbase una vez consolidadas, pueden ser utilizadas para el tránsito vehicular, siempre será preferible la colocación de una capa de rodadura, constituida por hormigón hidráulico o por hormigón asfáltico.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Toda obra de ingeniería civil empieza en el suelo, que luego pasa a formar parte fundamental de la estructura. En raras ocasiones, se encuentra un suelo en estado natural que no necesite la intervención del hombre para modificar sus características físicas y mecánicas, de forma que garanticen la estabilidad de las edificaciones, todo suelo debe cumplir con determinados requisitos para formar parte de una estructura, por ello es indispensable la realización de análisis y ensayos que verifiquen sus propiedades y capacidades para construir sobre ellos.

En ingeniería vial, los procesos constructivos de la base y subbase encuentran dificultades relacionadas con la conformación de los suelos; inestables, blandos, y difíciles de trabajar o, por carencia y ausencia total de materiales pétreos cercanos a los proyectos. Estas situaciones retrasan e incrementan los costos en las obras, por lo tanto, la utilización de productos alternativos, elaborados con materiales de fácil obtención y transporte, conjuntamente con otros elementos, que se encuentren cercanos a las obras de ingeniería, no deja de ser atrayente.

El reemplazar la base y subbase tradicionales, conformadas con materiales pétreos, por otro material como el Hormigón Celular de fácil elaboración y transporte, de consistencia plástica, que se acomoda con facilidad en los rellenos, que puede ser vertido directamente de los camiones mezcladores o por medio de bombeo, a costos relativamente bajos, representa un material innovador en el campo de la construcción que podría generar significativos ahorros en costo y tiempo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Generales

- Proponer una conceptualización básica sobre Hormigones Celulares.
- Desarrollar un material idóneo para remplazar a la base y subbase.

1.3.2 Específicos

- Analizar y describir la base y subbase conformada de material pétreo.
- Descripción de los agregados usados en la base y subbase convencionales.
- Clasificación y antecedentes del hormigón.
- Definición del Hormigón Celular.
- Especificar, determinar y analizar los materiales que componen la mezcla de Hormigón Celular.
- Caracterización de los componentes del Hormigón Celular.
- Función del cemento en la mezcla.
- Función del agregado fino en la mezcla.
- Función de la espuma en la mezcla.
- Descripción del tipo de espuma empleada en el Hormigón Celular.
- Detalle de las características y propiedades del Hormigón Celular.
- Establecer las circunstancias y conveniencias para el uso de Hormigón Celular como base o subbase en remplazo de estas.
- Optimizar el diseño y aplicación del Hormigón Celular.
- Comparación de precios unitarios entre base y subbase de materiales pétreos, con una estructura de Hormigón Celular.

1.4 CONTENIDO

Para definir los aspectos fundamentales en los cuales se sustenta el presente trabajo, se ha dividido en siete capítulos, en los cuales se aspira a explicar la literatura disponible, las experiencias y ensayos practicados (por otros inventores) sobre el tema de Hormigones Celulares, de manera de contar con el conocimiento adecuado para realizar pruebas y ensayos propios.

CAPÍTULO 1. En este capítulo se realiza una descripción general sobre el tema del Hormigón Celular, estableciendo los objetivos, justificación y alcance del presente trabajo. Adicionalmente se efectúa una descripción detallada del contenido que lleva de cada capítulo.

CAPÍTULO 2. Capítulo en que se describe los materiales que se utilizan en las bases y subbases convencionales, elaboradas con materiales pétreos. Se estudian las características de los suelos, origen, granulometría, clasificación, límites y su función en la conformación de la base y subbase. Se analizan las características, propiedades y funciones de una base y subbase tradicional.

CAPÍTULO 3. Capítulo que estudia el cemento y sus orígenes en el transcurso de los siglos, la formación de los materiales aglomerantes. El cemento y la aplicación de diferentes tipos de hormigón, usados durante la historia, hasta llegar a la definición del Hormigón Celular. Se describen los materiales que componen el Hormigón Celular, sus propiedades, características y usos, que lo transforman en un

material muy versátil, apropiado para ser utilizado como alternativa a la base y subbase tradicionales, en la construcción de caminos y carreteras.

CAPÍTULO 4. En este capítulo se puntualiza el análisis y caracterización de los materiales componentes, cemento, arena, agua y espuma preformada. Estudio general de los tensoactivos y la formación de las espumas. Fabricación de un aparato para generar espuma. Análisis de precios unitarios de base, subbase y Hormigón Celular.

CAPÍTULO 5. Capítulo que estudia el control de calidad del Hormigón Celular, en hormigón fresco; consistencia, porcentaje de incorporación de aire, tiempo de fraguado, en hormigón sólido; resistencia a la compresión, valor de soporte relativo o CBR, densidad seca, resistencia a la tracción indirecta.

CAPITULO 6. Capitulo destinado a encontrar las propiedades y cualidades, por medio de pruebas, y ensayos de laboratorio de muestras de Hormigón Celular fresco y Hormigón Celular endurecido. Implementación de una formula a base de un tensoactivo, para llegar a encontrar una solución espumosa estable. Desarrollo de una dosificación adecuada que cumpla con los requisitos, y sea capaz de remplazar a la base y subbase de materiales pétreos. Elaboración, ensayos seleccionados y análisis de muestras en el laboratorio.

CAPÍTULO 7. En este capítulo se establecen las conclusiones, recomendaciones, precios unitarios, ventajas y desventajas del uso de Hormigones Celulares, se detalla líneas de estudio, para futuras investigaciones sobre el tema.

CAPÍTULO 2

2. BASE Y SUBBASE

2.1. GENERALIDADES

En la forma tradicional de construcción de un pavimento (rígido o flexible), al momento de la conformación de la base y subbase, generalmente se utilizan materiales como; la piedra partida, lastre, ripio o cualquier otro componente granular apropiado, mientras que el hormigón hidráulico o el asfalto constituyen la capa de rodadura. Los materiales granulares convencionales utilizados en la conformación de base y subbase, puede fallar y presentar defectos importantes, deflexiones y hundimientos, en algunos caso superiores a 10 centímetros, que se generar, principalmente, debido al paso vehicular, ya sea este liviano o pesado, a la mala calidad de los materiales, a una compactación incorrecta, al uso de equipos inadecuados, a una mala supervisión de obra, o un deficiente control de calidad tanto de materiales como en la ejecución misma. Cuando los materiales utilizados para la conformación de la base o subbase no cumplen con las normas requeridas, se los puede estabilizar recurriendo a otros productos como; cemento, cal, cenizas volantes

o, su vez, compactarlos por medios mecánicos, hasta alcanzar las especificaciones exigidas para una específica obra. Es importante, entonces, antes de comenzar una nueva construcción, considerar la disponibilidad de los materiales pétreos, cada vez más escasos, que se encuentren cercanos a los lugares, donde serán utilizados.

Todos estos factores retrasan el progreso de las obras, provocando el encarecimiento en los costos de construcción. En consecuencia, cuando suceden estos inconvenientes, la ingeniería civil estudia e investiga hasta llegar a encontrar métodos alternativos que permitan realizar la construcción de proyectos con costos que se ajusten a los presupuestos y que satisfagan sus necesidades. Tratándose de la construcción de vías de comunicación es, también, importante la procedencia, distancia y disponibilidad de los materiales pétreos.



Fuente: Mexia Construcciones

Figura 2.1. Conformación de la subbase convencional con maquinaria

2.2. AGREGADOS PARA BASE Y SUBBASE

Los materiales convencionales usados en la conformación de la base y subbase, son generalmente suelos en sus diferentes formas; suelos naturales, suelos mezclados y mejorados con agregados gruesos y finos. Es muy común que las personas, incluso los ingenieros, no estén familiarizadas con las características del suelo y principalmente con su comportamiento.

Como se sabe, todas las estructuras descansan directa o indirectamente sobre el suelo, de manera que es imprescindible contar con un análisis y un diseño apropiado que garantice el buen comportamiento del mismo, evitando futuros asentamientos, y colapsos parciales o totales de las estructuras. En el diseño de un pavimento la finalidad específica de la subbase, es si duda, de carácter económico, se trata de llegar al espesor requerido utilizando el material más barato posible, todo el espesor se podría realizar con material de mejor calidad, como en la base, pero se acostumbra a que la base sea siempre más delgada, sustituyendo ésta parte de la base, con una subbase de menor calidad, aunque esto conlleve a un aumento en el espesor de la capa de rodadura, cumpliéndose la ecuación: a menor calidad de material colocado, mayor espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.

El material para base y subbase debe estar libre de materia orgánica, y su agregado grueso, constituido por grava, piedra desintegrada, granito o cualquier otro material similar, no debe fracturarse cuando se sature de agua y seque alternativamente, tampoco, debe contener terrones de arcilla ni sustancias de origen vegetal.

2.2.1. Origen de los agregados

Los materiales para la base y subbase, también conocidos como áridos, forman un conjunto de partículas naturales o artificiales que pueden ser tratadas o elaboradas. Las partículas de estos materiales están comprendidas entre determinados límites fijados por las normas internacionales, (ASTM, ASSTHO, SUCS...), provienen, generalmente, de yacimientos naturales y sus características varían de acuerdo a la ubicación geográfica y del origen de la mina de agregados.

- *Materiales naturales*, son las arenas, gravas y limos, así como las rocas fragmentada y alterada que al ser extraídas quedan sueltas y disgregadas.
- *Materiales tamizados*, los que necesitan de un tratamiento mecánico de tamizado para satisfacer la composición granulométrica.
- *Materiales parcialmente triturados*, son poco o nada cohesivos como la mezcla de gravas, arenas y limos, que para ser utilizados, requieren de un tratamiento mecánico de trituración y tamizado.
- *Materiales totalmente triturados*, son los extraídos de un banco de roca, y que necesitan de una acción completa de triturado y tamizado, para satisfacer la composición granulométrica.
- *Materiales mezclados*, están compuestos por la mezcla de dos o más materiales en las proporciones adecuadas, para así satisfacer la composición granulométrica.

2.2.2. Extracción de los agregados

Siempre será necesario estar de acuerdo a las normas ecológicas y ambientales, para lo cual, en primer lugar, se debe retirar la capa vegetal y depositarla en un lugar de almacenaje. Luego, separar todo tipo de arcilla, limo o cualquier material no apto para la conformación de la base y subbase, de tal forma de mantener abierta una cantera con un frente de ataque que facilite el ingreso de toda clase maquinaria para, excavación, perforación, voladura, trituración, tamizado, además del equipo de carga y evacuación del material.

Antes de proceder a la explotación de una mina de materiales para ser utilizados en la base y subbase, se debe tomar en cuenta que según la ley, el Estado Ecuatoriano es el único dueño de todos los recursos naturales, es decir, todos los depósitos de materias primas, tanto los que se encuentran en el suelo como los que hallan en el subsuelo le pertenecen, en consecuencia, es el único autorizado a emitir licencias de explotación, a través de sus respectivos organismos gubernamentales.

De forma que, cualquier fuente de material pétreo es de utilidad pública y a la presentación de los debidos documentos, los dueños de predios donde se encuentran estos depósitos, tienen la obligación de entregarlos, proporcionando todas las facilidades para explotar y extraer el material que se requiera, para determinada obra.

Para iniciar la explotación de una mina, siempre es conveniente ejecutar pruebas y ensayos de laboratorio que permitan determinar las propiedades del material, y las posibilidades de empleo en las diferentes etapas del proyecto.

La extracción del material pétreo se lo hace generalmente por medio de voladura, utilizando explosivos controlados, de manera de causar el menor impacto ambiental. La explosión permite fragmentar y obtener bloque más pequeños de roca que puedan ingresar al equipo de trituración, de donde saldrán los agregados limpios y clasificados con la granulometría adecuada.

Todos los trabajos deben realizarse adecuadamente para no producir estancamientos de agua, taludes, terraplenes y plataformas para depósitos, deben ser técnicamente diseñados y construidos. Una vez concluidos los trabajos de explotación, las fuentes de materiales deberán quedar restablecidas adecuadamente, operación que debe incluir; la eliminación de desperdicios, basura, sobras, todo el exceso de materiales y las estructuras temporales.



Fuente: Mexia Construcciones

Figura 2.2. Típica extracción de materiales pétreos (Mina Santa Rosa Tumbaco)

2.3. FUNCIONES DE LA BASE Y SUBBASE

La subbase sirve de transición y protección entre la base, formada de material granular más o menos grueso, y la subrasante, que es el suelo natural o mejorado pero de menor calidad que la base. La subbase actúa como filtro de la base, impidiendo que esta se incruste en al subrasante. Se coloca la subbase con el fin de absorber las deformaciones en la subrasante, producidas por variaciones volumétricas (cambios de humedad), e impedir que estas fallas se reflejen en la superficie del pavimento. Otra de las funciones de la subbase es el de actuar como drenaje para desalojar el agua que se infiltra al pavimento y, también, para impedir el ascenso capilar (a la base) del agua proveniente de la subrasante, cortes y terraplenes.

Tradicionalmente la construcción de la base y subbase granular, en vías de comunicación, se fundamenta en la colocación de una o varias capas de suelos naturales existente o de la mezcla de suelos naturales seleccionados o de agregados triturados, sobre una superficie preparada y terminada, llamada subrasante, que debe cumplir con todas las especificaciones; alineamientos, rasantes, espesores y secciones transversales que el proyecto exija. Todo esto con el objetivo final de obtener una capa homogénea, capaz de proporcionar el soporte estructural adecuado para el buen funcionamiento de las vías. Del grado de control y de la granulometría de los agregados dependerá el tipo de base y subbase, y la carga que se espera deben soportar durante toda su vida útil. Como ya se mencionó, la finalidad específica de la subbase es abaratar los costos, por esto, encontrar una combinación adecuada entre precio y calidad es la tarea primordial del ingeniero constructor.

2.4. CARACTERÍSTICAS DE LA BASE Y SUBBASE

Los materiales utilizados en la construcción de la base y subbase, deben seguir los valores límites y cumplir con las directrices y ensayos que señalan las normas internacionales para vías (ASTM, ASSHTO), de manera, de obtener bases y subbases granulares de agregados triturados, de mezclas de suelos o de capas de suelo existentes, con buenas características y propiedades para que resulten económicas y durables en el tiempo.

- *La granulometría*, norma ASTM D 422, debe estar encuadrada en las franjas granulométricas de clasificación para bases y subbases del MOP. En obra se puede utilizar alguna variante siempre y cuando el diámetro máximo del material no exceda los 37,5mm para bases y 70mm para subbases, ni que las partículas que pasen el tamiz No 200, finos, no sea mayor al 5% para la base y 15% para la subbase.
- *El límite líquido (LL)* del material para base o subbase debe estar según norma ASTM D 4318 y cuyo valor sea máximo 25%.
- *El índice de plasticidad (LP)*, norma ASTM D 4318, porción que pasa el tamiz No 40, con valor no mayor al 6% tanto para base como para subbase.
- *El desgaste*, norma ASTM C 133, en la máquina de Los Ángeles, el máximo desgaste permitido es del 40% para base y el 50% para subbase.
- *El equivalente de arena*, ASTM D 2419, porción que pasa el tamiz No 4, mínimo de 35% para base y de 25% para subbase.
- *El valor Relativo de Soporte (CBR)*, norma ASTM D 1883, con mínimos de 80% para base y 30% para subbase.

	Granulometría	LL	IP	Desgaste	Equivalente de Arena	CBR
ASTM	D 422	D 4318		C 133	D 2419	D 1883
Base	< 37,5mm	≤ 25%	≤ 6%	40%	35%	80%
Subbase	< 70,0mm	≤ 25	≤ 6%	50%	25%	30%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.1. Características de una Base y una Subbase

2.4.1. Granulometría

Desde los inicios, en la investigación de las propiedades de los suelos se creyó que las propiedades mecánicas dependían directamente de la distribución de las partículas, según su tamaño. Solo en suelos gruesos, donde se puede realizar la granulometría por tamizado, se logra determinar algo referente a las propiedades físicas del material. Se sabe por ejemplo, que un suelo grueso con una buena graduación (amplia gama de tamaño de partículas) tiene un mejor comportamiento, para la construcción, que otro suelo grueso que tenga granulometría muy uniforme.

De todas maneras, se entiende que en suelos gruesos el comportamiento mecánico e hidráulico esta definido principalmente por la compacidad de los granos y su orientación, pero al no existir un método que respete esta estructuración inalterada del material, la única alternativa que se tiene es de un buen sistema de tamizado.

Si en suelos finos, en su estado inalterado, las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen principalmente de su estructuración e historia geológica, entonces la granulometría por tamizado llegaría a ser inútil. Sin embargo se dispone de recursos que permiten encontrar las características del material (método del hidrómetro).

Debido a gran variedad de suelos que existen en estado natural y de acuerdo a las necesidades, campo de aplicación, y el uso que se vaya a dar, se han desarrollado varios métodos de clasificación. Es evidente que el ingeniero civil, como el geólogo, o el agrónomo, analizan el suelo desde diferente punto de vista.

Pero cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes, debe fundamentarse en las propiedades mecánicas de los suelos, por ello todas las clasificaciones aceptan los términos generales de; piedra, grava, arena, polvo, limo, y arcilla, diferenciándose entre ellas, tan solo, por los valores de los límites establecidos, para definir cada una de las clases.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	TAMAÑO mm
Piedra	-----	Mayor a 70
Grava	Gruesa	30 a 70
	Media	5 a 30
	Fina	2 a 5
Arena	Gruesa	1 a 2
	Media	0.2 a 1
	Fina	0.1 a 0.2
Polvo	Grueso	0.05 a 0.1
	Fino	0.02 a 0.05
Limo	Grueso	0.006 a 0.02
	Fino	0.002 a 0.006
Arcilla	Gruesa	0.0006 a 0.002
	Fina	0.0002 a 0.0006
Ultra-Arcilla	-----	0.00006 a 0.0002

Fuente: Elaboración personal

Tabla 2.2. Clasificación de suelos y agregados

La Tabla 2.2, proporciona una cobertura amplia respecto a los suelos. Sin embargo, este sistema adolece de ciertas fallas, siendo la más notoria la de utilizar las palabras arcilla y limo para designar fracciones de suelo definidas exclusivamente por

tamaños. Esta claro, que las características de una arcilla típica dependen preponderantemente de las propiedades de su fracción más fina, material de cuarzo o roca triturada formados de partículas del tamaño de las arcillas, debería, según la Tabla 2.2, estar clasificado como una arcilla a pesar de no cumplir ni comportarse de acuerdo a las propiedades que definen a una arcilla. Por otro lado, un suelo de comportamiento típicamente arcilloso, dentro de los límites apropiados de humedad, seguramente no contendrá más de un 20% de arcilla, según el criterio granulométrico. Siempre debe estar presente que la construcción, de estructuras importantes, requiere de datos adicionales con relación a la resistencia del suelo y no pueden estar basadas solo en una simple clasificación del suelo.

Las clasificaciones de suelos más importantes son: Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (American Association State Highway Officials) AASTHO; Administración de Aeronáutica Civil (Civil Aeronautic Administration) CAA; Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, (SUCS) (Uniform Soil Classification System USC); Instituto Tecnológico de Massachusetts, (ITM). Todas ellas tienen sus métodos propios y se basan en el tamaño de las partículas del suelo.

Para uso general, la clasificación de suelos más aceptada, en la actualidad, es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) ASTM D 2487 (Tabla 2.3.), pero, en ingeniería vial, la clasificación que se utiliza con más frecuencia es la de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos AASTHO (Tabla 2.4.) que norma, describe y regula el procedimiento para fijar el grupo al que pertenece determinado tipo del suelo o del agregado.

Unified Soil Classification (USC) System (from ASTM D 2487)

Major Divisions		Group Symbol	Typical Names
Course-Grained Soils More than 50% retained on the No. 200 sieve	Gravels 50% or more of course fraction retained on the No. 4 sieve	Clean Gravels	GW Well-graded gravels and gravel-sand mixtures, little or no fines
		Gravels with Fines	GP Poorly graded gravels and gravel-sand mixtures, little or no fines
		Gravels with Fines	GM Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures
		Gravels with Fines	GC Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures
	Sands 50% or more of course fraction passes the No. 4 sieve	Clean Sands	SW Well-graded sands and gravelly sands, little or no fines
		Sands with Fines	SP Poorly graded sands and gravelly sands, little or no fines
		Sands with Fines	SM Silty sands, sand-silt mixtures
		Sands with Fines	SC Clayey sands, sand-clay mixtures
Fine-Grained Soils More than 50% passes the No. 200 sieve	Silts and Clays Liquid Limit 50% or less	ML Inorganic silts, very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands	
		CL Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly/sandy/silty/lean clays	
		OL Organic silts and organic silty clays of low plasticity	
	Silts and Clays Liquid Limit greater than 50%	MH Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sands or silts, elastic silts	
		CH Inorganic clays or high plasticity, fat clays	
		OH Organic clays of medium to high plasticity	
Highly Organic Soils		PT Peat, muck, and other highly organic soils	

Prefix: G = Gravel, S = Sand, M = Silt, C = Clay, O = Organic
 Suffix: W = Well Graded, P = Poorly Graded, M = Silty, L = Clay, LL < 50%, H = Clay, LL > 50%

Tabla 2.3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ASTM D 2487

La clasificación ASSTHO establece 7 grupos principales de suelos: A1, A2 y A3 para materiales granulados; A4, A5, A6 y A7 para materiales de sedimento clasificados en base a granulometría, límite líquido y límite plástico. Se contempla con un octavo grupo, correspondiente a los suelos orgánicos, A8. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo, se lo hace de acuerdo al índice de grupo que es útil en la determinación relativa de la calidad del suelo para la utilización en estructuras

de tierra, particularmente en terraplenes, taludes, subrasantes, subbases y bases.

Representa un valor calculado de acuerdo a la siguiente fórmula empírica:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$$

Donde:

a = % que pasa el tamiz 200 mayor al 35%. Numero entero positivo entre 0 - 40.

b = % que pasa el tamiz 100 mayor al 15%. Numero entero positivo entre 0 - 20.

c = Limite líquido. Numero entero positivo entre 0 - 20.

d = Índice plástico. Numero entero positivo entre 0 - 20.

SISTEMA ASSTHO DE CLASIFICACIÓN											
Clasificación general	Materiales granulares (≤ 35% pasa el tamiz #200)							Material limo-arcillosos (> 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3*	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
No. 10 (2,00mm)	50 máx	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No.40 (0,425mm)	30 máx	50 máx	51 máx	...	...	...	...	...	...	...	...
No.200 (0,075mm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín
Limite líquido	...		...	B				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice Plástico	6 máx		N.P.	B				10 máx	10 máx	11 mín	11** mín
Tipos de materiales característicos	Cantos, gravas y arenas		Arena fina	Gravas y arenas limo-arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

*La colocación de A-3 antes de A-2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A-3 sobre A-2.

**El índice plástico del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice plástico del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30

Fuente: Elaboración personal

Tabla 2.4. Clasificación del suelo por la AASTHO

Ciertos términos utilizados por la AASTHO difieren de las otras clasificaciones, pero al ser de uso cotidiano en la construcción vial, se procurará mantenerlos.

- *Arena fina:* partículas de roca y suelo que pasan el tamiz No 40 (0,425mm) y son retenidos en el tamiz No 200 (0,075 mm)
- *Arena Gruesa:* partículas de roca y suelo que pasan el tamiz No 10 (2,00mm) y son retenidas en el tamiz No 40 (0,425 mm)
- *Cantos rodados:* fragmentos de roca, usualmente redondeados por abrasión, que son retenidos en el tamiz de 3" (75,0 mm)
- *Grava:* partículas de roca que pasan el tamiz de 3" (75,0 mm) pero son retenidas en el tamiz No 10 (2,00 mm).
- *Material limoso-arcilloso* (limos y arcillas combinados): partículas finas de suelo y roca que pasan el tamiz No 200 (0,075 mm).
- *Limoso:* material fino-granular, con plasticidad menor o igual a diez.
- *Arcilloso:* material fino-granular, plasticidad mayor o igual a once.

Por medio del análisis mecánico del suelo (granulometría), que no es otra cosa que el proceso por el cual se realiza la separación de las diferentes fracciones según su tamaño, se consideran dos pasos importantes dentro de este análisis:

- El cribado a través de siete tamices (norma ASTM C 33) colocados en columna, calibrados y dispuestos desde el de mayor abertura hasta el de abertura más pequeña, el ensayo de laboratorio se realiza bajo la norma ASTM C 136. Para la construcción de vías terrestres, se determina el tamaño de las partículas por medio de la norma ASTM D 448, que incluye seis tamices adicionales.
- La granulometría de los finos es por vía húmeda, a través del análisis de una suspensión de suelo efectuada por medio del método del hidrómetro.

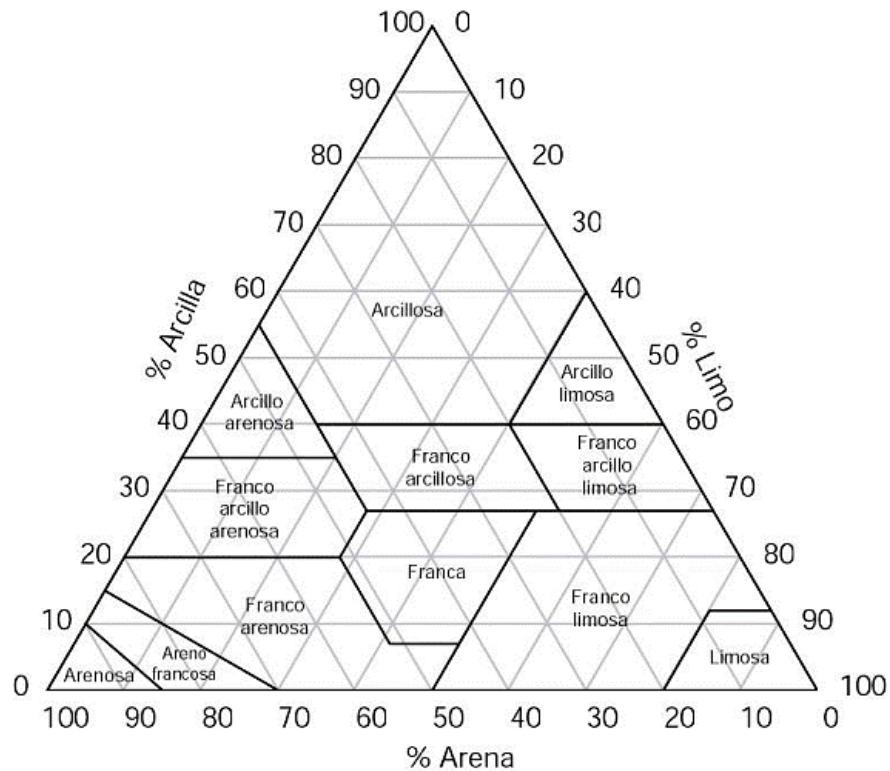


Gráfico 2.1. Clasificación del suelo en función de la granulometría

Las fracciones correspondientes a los tamaños mayores en una muestra de suelo, son obtenidos por medio del uso de tamices o mallas construidas en alambre, debidamente gradados con aberturas que van desde 3” (75,0 mm) hasta llegar al tamaño correspondiente a la malla No 200 (0,075 mm). Luego de pasar sucesivamente a través de un juego de tamices provistos de aberturas descendentes, se recolecta y se pesa lo retenido en cada tamiz. El porcentaje que representan respecto al peso de la muestra total, se suman a los porcentajes retenidos en los tamices de mayor tamaño; la diferencia a 100% de esa cantidad da el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por el tamiz correspondiente. Cuando los tamices tienen aberturas grandes no existe ningún problema, pero al trabajar con tamices de aberturas pequeñas, el método se dificulta, requiriendo que a partir del

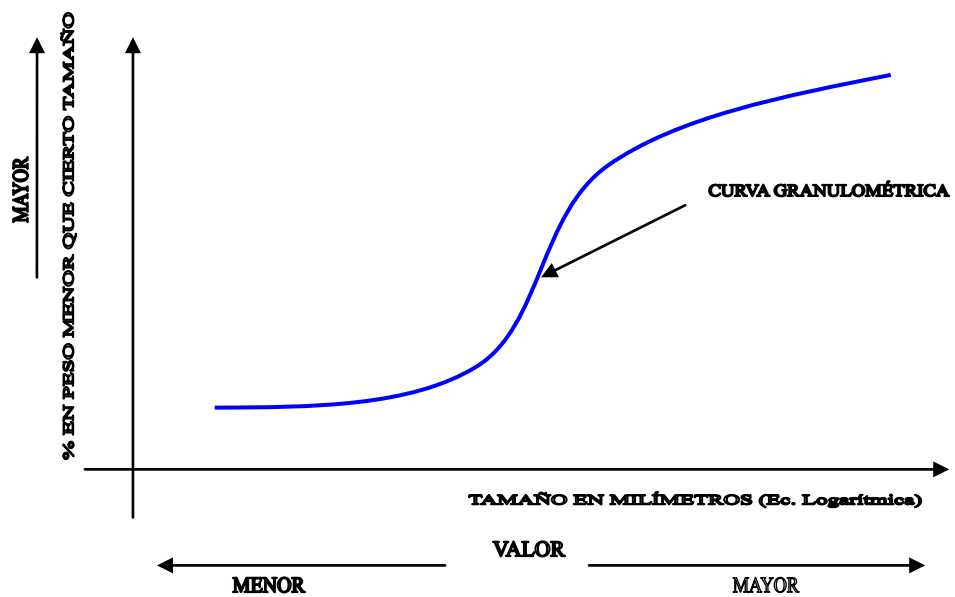
tamiz No 200 se utilice agua para facilitar el paso de la muestra de suelo (procedimiento de lavado).



Fuente: Elaboración personal

Figura 2.3. Tamices de alambre debidamente graduados

La distribución granulométrica puede ser representada gráficamente, siempre y cuando se cuente con el suficiente número de puntos.

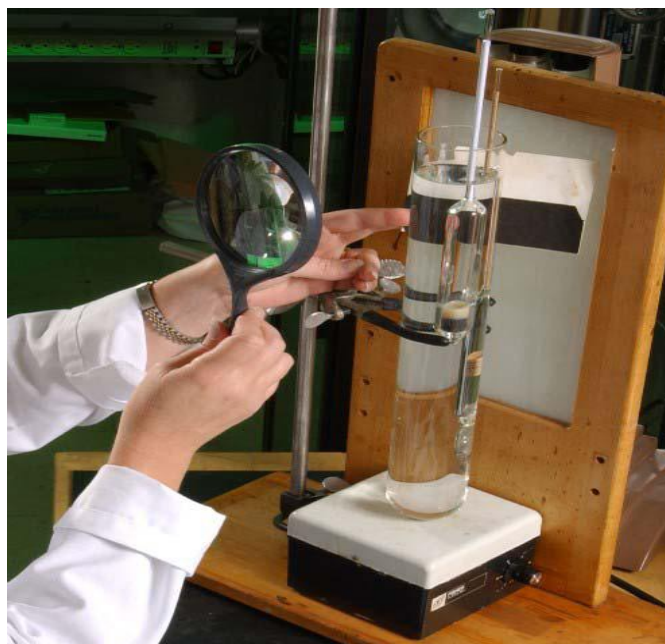


Fuente: Elaboración personal

Gráfico 2.2. Curva granulométrica

En la gráfica granulométrica, se dibuja sobre el eje de las ordenadas, a escala natural, el porcentaje en peso de las partículas menores que el tamaño correspondiente y sobre el eje de las abscisas, el tamaño de las partículas. Se ha convenido inutilizar la escala logarítmica para el eje de las abscisas ya que de esta manera es mucho mejor la lectura que a escala natural, sobretodo para las partículas finas y muy finas.

El método del hidrómetro facilita el estudio de las fracciones más pequeñas de la muestra de suelo y se basa en el principio de que la velocidad de sedimentación de las partículas en un líquido, es función de su tamaño. El hidrómetro no es más que un densímetro que esta calibrado para medir la relación del peso específico de un líquido o solución respecto al del agua. El hidrómetro tiene que estar calibrado para una temperatura de 20 grados centígrados.



Fuente: Equipos para laboratorio de suelos E.L.E.

Figura 2.4. Método del hidrómetro norma ASTM C 422

En la República del Ecuador la entidad que emite normas y regulaciones para el uso de materiales en la construcción vial, es el Ministerio de Obras Públicas (M.O.P.) de acuerdo con los requerimientos establecidos en la sección 816 de las “Especificaciones Generales Para La Construcción de Caminos y Puentes”.

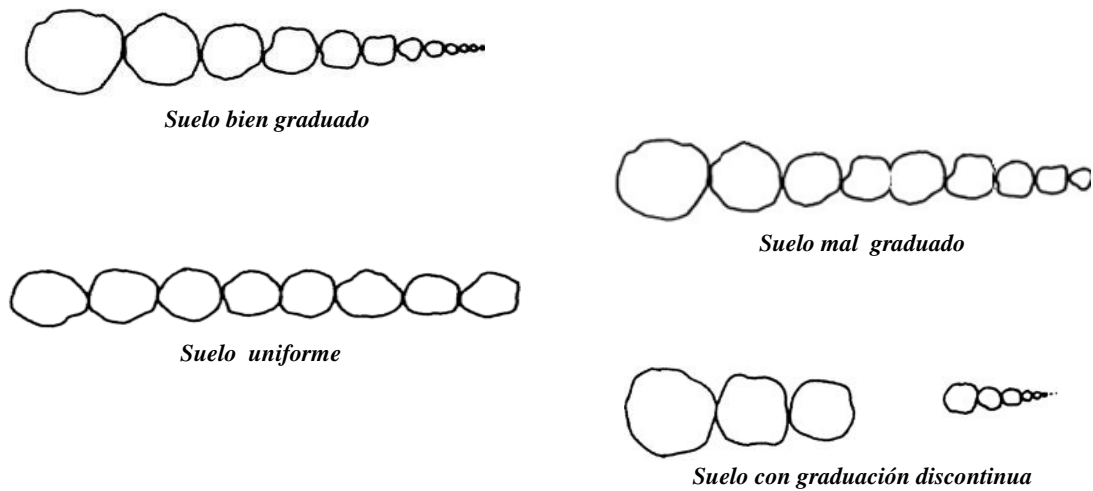
Las subbases se clasifican en tres grupos de acuerdo al tipo de material a emplearse.

- *Subbase Clase 1:* Constituidas por agregados obtenidos por trituración de piedra o grava (al menos 30%), con graduación uniforme de grueso a fino.
- *Subbase Clase 2:* Formada por agregados obtenidos por medio del cribado de piedras fragmentadas naturales o de grava, graduadas uniformemente de grueso a fino,
- *Subbase Clase 3:* Compuesta con materiales obtenidos de la excavación para la plataforma o de fuentes de préstamo.

Las bases de agregados pueden ser de las clases indicadas a continuación de acuerdo con el tipo de material a emplearse.

- *Base Clase 1:* Formada por agregados gruesos y finos triturados en un 100% y graduados uniformemente.
- *Base Clase 2:* Hecha por fragmentos de roca o grava triturada, cuya fracción de agregado grueso será triturada en por lo menos el 50% en peso
- *Base Clase 3:* Compuesta por fragmentos de roca o grava triturada, cuya fracción de agregado grueso será triturada en por lo menos el 25% en peso
- *Base Clase 4:* Constituidas por agregados obtenidos de la trituración o tamizado de piedras fragmentadas naturalmente.

De acuerdo con la disponibilidad de los materiales para base o subbase, se puede adoptar otros tipos de granulometría, pero en ningún caso el diámetro máximo del material podrá ser mayor a 3" (75.0 mm), ni que el porcentaje en peso que pasa el tamiz No 200 (0,075 mm) sea superior al 30 %.



Fuente: Elaboración personal

Gráfico 2.3. Tamaños de partículas de suelo



Fuente: Fotografía propia

Figura 2.5. Material clasificado para uso en la base

2.4.2. Límites de consistencia

Si bien la granulometría nos permite clasificar el suelo por el tamaño de sus partículas, también, es importante la determinación de los parámetros de plasticidad, para completar el estudio de un suelo y poder determinar su utilidad para la construcción y específicamente en el área de la ingeniería vial.

Cuando un suelo es remoldeado, cambiando su contenido de agua, si es necesario toma una consistencia característica, entonces decimos que este suelo es plástico. En la antigüedad a estos suelos se les denominaban arcillas y eran utilizados sobre todo para fabricar cerámica. Con el advenimiento de la Mecánica de Suelos, pronto se encontró la relación específica que existe entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas.

Algunos autores interpretan la plasticidad de los suelos, fundamentándose en las características de esfuerzo-deformación de los materiales. Se sugiere que a esfuerzos suficientemente pequeños, la relación esfuerzo-deformación es reversible y podemos afirmar que el material tiene un comportamiento elástico, por lo contrario, a esfuerzos mayores la relación se hace irreversible, produciéndose un comportamiento llamado plástico.

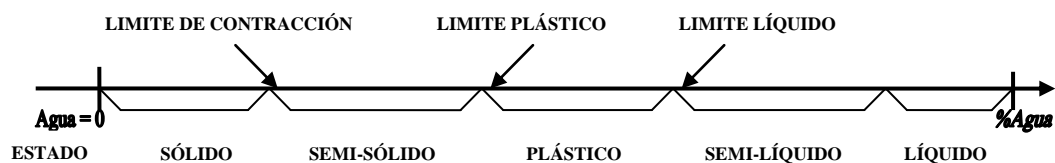
Entonces, se puede definir la plasticidad como la propiedad que tiene un material para soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable, sin desmoronarse y sin agrietarse.

Sin duda, le debemos al científico sueco Albert Atterberg los aportes más significativos en el desarrollo para la determinación de la plasticidad de los suelos. Atterberg afirmaba que la plasticidad de un suelo no es una propiedad permanente sino circunstancial, dependiente del contenido de agua y que cuando no se puede determinar la plasticidad, se dice que se trata de un suelo no plástico (N.P.).

Un suelo susceptible de ser plástico, según su contenido de agua puede estar en cualquiera de los siguientes estados:

- Estado líquido, el suelo tiene las propiedades de una solución.
- Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- Estado plástico, cuando el suelo se comporta plásticamente.
- Estado semisólido, cuando parece sólido pero sigue perdiendo volumen cuando se seca.
- Estado sólido, cuando su volumen no disminuye al ser secado.

Estas son fases generales por las que pasa un suelo al irse secando, al no existir límites determinados para distinguir sus fronteras, Atterberg estableció los primeros parámetros bajo el nombre general de *Límites de Consistencia*.



Fuente: Elaboración personal

Gráfico 2.4. Límites de Consistencia de Atterberg

2.4.3. Límite Líquido

A la frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico, Atterberg, la denominó *Límite Líquido (L.L.)*, encontrando la forma de determinar su valor por medio de ensayos de laboratorio. Se depositaba el suelo remoldeado en un recipiente, se hace una ranura y se llegaba a determinar el contenido de agua correspondiente al límite líquido, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocan, sin mezclarse al cabo de un cierto número de golpes proporcionados secamente al recipiente. El problema fundamental en esta técnica, era la falta de normas y especificaciones, que dejaba a los operadores del laboratorio mucha libertad para emitir criterios propios y subjetivos, desvirtuando con frecuencia, el resultado final. Arthur Casagrande, a sugerencia de Karl Von Terzaghi, utilizó el mismo procedimiento de Atterberg y desarrolló su propio método, conocido que hasta la fecha como *Copa de Casagrande*, para encontrar el límite líquido de un suelo.



Fuente: Fotografía propia

Figura 2.6. Copa de Casagrande para determinar Límite Líquido

2.4.3.1. Límite Plástico

La frontera convencional entre los estados plástico y semisólido se llamó *Límite Plástico (L.P.)*, y se determinó su valor fabricando un pequeño cilindro con el suelo. El agrietamiento y desmoronamiento de este pequeño rollito, indica que se ha alcanzado el límite plástico y el contenido de agua. Estos dos límites que definen el intervalo plástico de un suelo, se los conoce como *Límites de Plasticidad*.

Para los ensayos de los límites de consistencia, se requieren de alrededor de 400 gramos de material que pasen el tamiz No 40. La forma de determinar estos límites puede parecer empírica, subjetiva y poco científica, pero la experiencia ha probado su valor, ya que la información que proporcionan sobre los suelos en casi el cien por ciento de los casos, es muy confiable.



Fuente: Fotografía propia

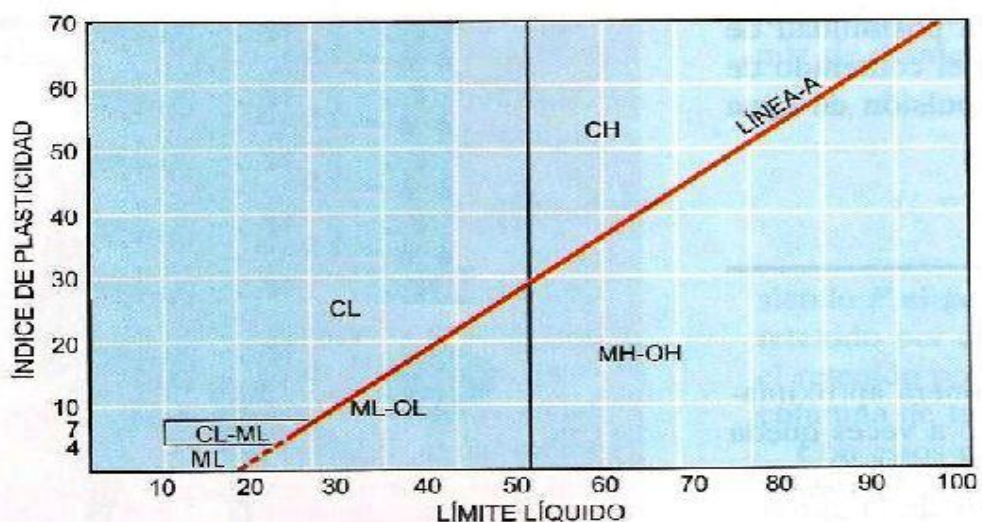
Figura 2.7. Determinación del límite plástico

2.4.3.2. Índice de Plasticidad

Además del límite líquido y el límite plástico, existe un parámetro importante e indispensable para el diseño de una subbase, es el denominado **Índice de Plasticidad** (*Ip*) que no es otra cosa que la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, valor que permite clasificar bastante bien a un suelo.

$$Ip = LL - LP$$

La forma de determinar todos estos límites podría parecer empírica, subjetiva y poco científica, pero la experiencia de muchos años de ensayos, han probado su valor ya que la información proporcionada sobre los suelos, en casi el cien por ciento de los casos, ha sido muy confiable. Un índice de plasticidad grande, corresponde a un suelo muy arcilloso, por lo contrario, un índice de plasticidad pequeño, representa a un suelo poco arcilloso, por ejemplo.



Fuente: <http://area.us.es/ingterreno/ingterreno/>

Gráfico 2.5. Carta de plasticidad para la clasificación de suelo fino

Aparte de estos límites (líquido y de plasticidad) existen otros límites:

- *Límite de Adhesión*, que se define como el contenido de agua en que una arcilla pierde sus propiedades de adherencia con una hoja metálica. Límite muy útil en la agricultura.
- *Límite de Cohesión*, que es el contenido de agua con que los grumos de arcilla ya no se adhieren entre si.
- *Límite de Contracción*, que representa la frontera entre los estados de consistencia semisólido y sólido, se define como el contenido de agua con que un suelo ya no pierde volumen al seguirse secando. Este límite es muy usado en ingeniería civil, por que al conocer el cambio de volumen promedio producido por efecto de la contracción, se puede calcular el asentamiento cuando varía su humedad, desde la humedad de saturación hasta la humedad correspondiente al límite de contracción.



Fuente: Equipos para laboratorio de suelos E.L.E.

Figura 2.8. Equipo para la determinación de límites

2.4.4. Desgaste

Los materiales usados en la conformación de la base y subbase, están expuestos a una constante agresión física ocasionada principalmente por las cargas del tráfico o a los agentes climáticos y atmosféricos. Razón por la cual, es primordial que reúnan ciertas propiedades y características para garantizar su durabilidad en el tiempo.

- Tienen que ser homogéneos, compactos y de grano firme. Carecer de grietas y restos orgánicos, esto se puede apreciar fácilmente al golpear la muestra con un martillo.
- La resistencia a la carga de la roca proveniente de erupciones volcánicas debe ser superior a 500 Kg/cm² y de 250 Kg/cm² para roca sedimentarias o metamórficas.
- Mantenerse inalterable ante los agentes atmosféricos, con pérdidas en resistencia no mayores al 10%. Ser resistente al fuego, no ser permeable ni absorbente en una proporción mayor al 4% de su volumen.
- Fácilmente trabajable y tener adherencia a los morteros y asfaltos.

El material utilizado para base o subbase tradicional está compuesto de agregados pétreos tanto finos como gruesos, por lo tanto, es indispensable analizar las propiedades físicas y químicas de dichos materiales, esenciales en el diseño de las mezclas de agregados. Conocer la dureza, la resistencia a la abrasión, la resistencia al ataque a los sulfatos y la durabilidad de los agregados, garantizará el diseño y la obtención de bases y subbases de buenas características capaces de cumplir con la función principal, transmitir las cargas a los estratos inferiores.

2.4.4.1. Dureza y resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión, dureza o desgaste de un agregado, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Las pizarras son las que resisten mejor al deterioro, seguidas por las rocas graníticas y las basálticas. Las rocas areniscas y calizas tienen un desgaste 4 o 5 veces mayor que el granito. El principal método para determinar el desgaste por abrasión es sin duda, la Máquina de los Ángeles (Figura No 2.9.), que consiste en un tambor cilíndrico hueco de acero, cerrado en sus extremos y que tiene un diámetro inferior a 711 mm y una longitud de 508 mm.

Junto con la muestra, con granulometría especificada, se introduce un material abrasivo, esferas de acero, y se gira el rodillo a 30 revoluciones por minuto. El choque entre agregado y las bolas da como resultado el desgaste por abrasión. El número de revoluciones tiene que ser de 500, cuando se trata de agregado grueso menor a 38 mm y de 1000 para agregado grueso entre 75 y 19 mm.

Cuando se trata de material con partículas menores a 50 mm, se aplica la norma ASTM C-131 y para material con partículas mayores a 50 mm, se emplea la norma ASTM C-535. El objetivo final, es determinar la fracción de la muestra cuyo tamaño se ha mantenido superior a 1.7 mm o sea la porción retenida en el tamiz No 12, se pesa y se lo expresa en forma del tanto por ciento respecto al peso original.

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{Pa - Pb}{Pa} * 100$$

Donde:

Pa = masa de la muestra seca antes del ensayo.

Pb = masa de la muestra seca retenida en el tamiz No 12

La carga abrasiva consiste en una carga de esferas de fundición o de acero de 45 a 50 milímetros de diámetro y con una masa de 440 ± 50 gramos cada una y cuya cantidad depende del material que se va a ensayar, tal como se muestra en la tabla.

TIPO	NUMERO DE ESFERAS	MASA DE LAS ESFERAS (gr)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 25
D	6	2500 ± 25

Fuente: Elaboración personal

Tabla 2.5. Relación de la masa de las esferas



Fuente: Equipos para laboratorio de suelos E.L.E

Figura 2.9. Máquina de los Ángeles

2.4.4.2. Integridad y durabilidad

La durabilidad de un material es la capacidad que posee para mantener su integridad estructural, bajo las condiciones a las cuales está expuesto. Los principales factores que afectan a la durabilidad de materiales estabilizados son las condiciones ambientales, temperatura, humedad y las condiciones propias de trabajo.

En construcción vial, los materiales extraídos de los depósitos naturales son movilizados y utilizados en otras condiciones, propias de las locaciones donde son requeridos, al quedar expuestos interactúan con la atmósfera, hidrosfera y la biosfera, produciéndose cambios físicos y/o químicos que desestabilizan los minerales y las características intrínsecas de las rocas.

Este proceso natural de transformación de los materiales rocosos y no rocosos se lo denomina intemperismo, que se debe entender como una acción de desintegración de los elementos constitutivos de los agregados y no solamente como una fragmentación de los mismos ya que los agentes químicos, transforman el material original de la roca en algo diferente.

Un suelo rico en material vegetal en descomposición, origina soluciones formadas por gran cantidad de ácidos orgánicos que reaccionan con las superficies minerales formando sales que descomponen a las rocas. El congelamiento y los ciclos de hielo y deshielo son los ataques más peligrosos para los agregados, debido a que el hielo causa la expansión del agua a medida que pasa del estado líquido al estado sólido, rompiendo la roca en fragmentos cada vez más pequeños.

Entonces se puede decir, que integridad y durabilidad son las propiedades de los agregados para resistir la descomposición y la desintegración, debido a los agentes climáticos y a los procesos químicos o biológicos, es por lo tanto de suma importancia, determinar y escoger el material pétreo más adecuado para la conformación de las bases y subbases.

El ensayo de laboratorio ASTM C 88, o los equivalentes: AASHTO T 104 y norma ecuatoriana INEN 863, consiste en analizar y estudiar las propiedades de los materiales a ser utilizados en las bases y subbases. Este procedimiento permite recrear las condiciones naturales de un material sometido a los agentes químicos presentes en la naturaleza.

El procedimiento de ensayo, empieza con el tamizado y la separación los agregados, (grueso y fino), que posteriormente serán analizados y estudiados por separado. Luego, se procede al lavado y secado de los materiales y se los sumergen, siempre por separado, en una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) o de sulfato de magnesio (MgSO_4), por un periodo no menor de 16 horas a 18 horas. La solución debe cubrir completamente las muestras, al menos, 25 mm sobre ellas, después de ese tiempo se las retira de la solución, dejándolas escurrir por lo menos 15 minutos, y, finalmente se las traslada a un horno precalentado a 110°C .

Se saca del horno y con la ayuda de un ventilador, se enfría con intervalos de 2 horas a 4 horas y después se pesa. Calculado el peso, se espera hasta que la temperatura llague a 20°C , comprobando la temperatura por medio de un termómetro. Una vez

más se sumergen las muestras en la solución de sulfato, se acostumbra repetir esta misma operación cinco veces. Este proceso, ocasiona la formación de cristales de sal produciendo una presión interna que tiende a romper a los agregados. Terminados los cinco ciclos se retira y lava el material, con agua tibia, para eliminar todo vestigio de la solución de sulfato, enseguida se lo tamiza para determinar la masa perdida. Si por alguna razón se interrumpe el ensayo, se deberá dejar la muestra en el horno a 110° C hasta que el ensayo pueda reanudarse.

El mismo procedimiento se realiza, tanto para el agregado fino como para el agregado grueso, solamente es necesario la verificación y el cambio de los tamices correspondiente. Para determinar el porcentaje de masa perdida, en cada uno de los agregados, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Pérdida = \left(\frac{Mb - Ma}{Mb} \right) * 100$$

Donde:

Mb= masa inicial

Ma= masa final



Fuente: Equipos para laboratorio de suelos E.L.E.

Figura 2. 10. Ensayo de durabilidad de los agregados

2.4.5. Equivalente de arena

Si bien, la construcción de la subbase implica el uso de materiales de menor calidad que en la base, no es menos cierto que para obtener buena cimentación de un camino se necesita la menor cantidad de finos, sobre todo arcillas, que son los materiales que al ponerse en contacto con el agua, causan deterioro rápido en las estructuras de pavimentos, hasta dejarlas inservibles.

Con el fin de garantizar el buen desempeño de la base y subbase, se realiza el ensayo *Equivalente de Arena*, ASTM D 2419 o su similar AASHTO T 176, el cual evalúa las proporciones relativas de arcillas, finos plásticos y polvo presente en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz No 4 (4.75 mm) y que generalmente aparecen como materia orgánica, materiales expansivos, limos y otros finos.

El objetivo primordial, del ensayo es determinar la proporción relativa de polvo fino o material arcilloso que contienen los suelos o los agregados, y, es un procedimiento que usualmente se lo realiza en el campo para una rápida determinación de la cantidad de arena. Originalmente fue ideado en un laboratorio de California, Estados Unidos, y se basa particularmente en el principio de sedimentación de los materiales dentro del agua, utilizando la ley de Stokes.

El ensayo se fundamenta en liberar de posibles recubrimientos de arcilla adheridos a las partículas de arena, mediante la adición de una solución; compuesta de cloruro de calcio, glicerina, formaldehído y agua destilada, que favorece la suspensión de las partículas finas sobre la arena, para determinar el contenido de finos respecto de las

partículas de mayor tamaño. Normalmente se determina *el equivalente de arena* para la fracción 0/2 mm pero se permite su aplicación sobre la fracción 0/4 mm, siempre y cuando la humedad máxima portante del árido sea inferior al 8%.

El procedimiento del ensayo se lo realiza por duplicado y comprende varios pasos; llenado de las probetas graduadas, agitación de las probetas (manualmente o con máquina), lavado por medio de un tubo lavador, Finalmente se determina la altura en que se encuentran los finos (h_a) y la altura donde se encuentra la arena (h_p). Para obtener la altura real de la arena (h_r) y el equivalente de arena se aplican las siguientes expresiones para cada muestra analizada:

$$h_r = h_p - 254 \text{ mm.}$$

$$Ea = \left(\frac{h_r}{h_a} \right) * 100$$

Donde:

h_r = altura real de la arena

h_p = altura aparente de la arena

h_a = altura de la arcilla



Fuente: Equipos para laboratorio de suelos E.L.E

Figura 2.11. Equipos para el ensayo del Equivalente de Arena

2.4.6. CBR o Valor Relativo de Soporte

La base y la subbase, una vez compactadas, deben poseer ciertas características estructurales, entre ellas la capacidad de resistencia al corte. Para determinar este valor, se acostumbra a utilizar las normas del ensayo ASTM D 1883 que se lo define como “Relación de Soporte”.

La finalidad de este ensayo, es determinar la capacidad de soporte de suelos y agregados, compactados en el laboratorio, con una humedad óptima y con niveles de compactación variables.

El método originalmente fue propuesto en 1929, por los ingenieros T.S. Stanton y O.J. Porter del departamento de carreteras de California. Desde entonces, se lo usa como una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o como material de base y subbase en la construcción de carreteras.

Al Valor Relativo de Soporte se lo conoce comúnmente como CBR por sus siglas en inglés (California Bearing Ratio). El ensayo determina el valor de la relación de soporte, que no es constante para un suelo dado sino que se aplica al estado en que se encuentra el suelo el momento del ensayo.

El valor CRB, se obtiene de la relación de la carga unitaria necesaria para lograr una cierta cantidad de penetración del pistón de $19,35 \text{ cm}^2$ (3 pulgadas²) a una velocidad de 1,27 mm/min (0,05 pulgadas/min) en un muestra compactada de suelo, después de haberla sumergido en agua durante cuatro días y de haber medido su hinchamiento,

con respecto a la carga patrón requerida, para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

Se mide la carga necesaria para que el pistón penetre hasta 2,54 mm (0,01 pulgadas) y hasta 5,08 mm (0,02 pulgadas). La carga se expresa en porcentaje dividiendo los valores encontrados para el valor de una muestra tipo de piedra machacada. Los valores corresponden a 6,9 MPa para una penetración de 2,54 mm, y 10,3 MPa para una penetración de 5,08 mm. Expresado en la siguiente formula:

$$CBR = \frac{\text{Valor del ensayo}}{\text{Valor tipo}} * 100 (\%)$$

De la ecuación, se puede deducir que el número CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón, que en la práctica se elimina el signo de porcentaje (%) quedando la relación simplemente como un número entero.



Fuente: Equipos para laboratorio de suelos E.L.E.

Figura 2.12. Equipo para ensayo de CBR

En la práctica hay que observar ciertas diferencias en el procedimiento de ensayo para ciertos tipos de suelo.

- En suelos plásticos el tiempo de curado no debe ser menor de 24 horas.
- En suelos con baja plasticidad el curado es menor y se puede eliminar.
- En suelos finos y granulares que absorben fácilmente la humedad, se permite un periodo de inmersión más corto pero no menor de 24 horas.
- Para suelos del tipo A-1, A-2-4 y A-2-6, se calcula el CBR solo para 5 mm de penetración.
- Para suelos tipo A-3, A-2-5 y A-2-7, el procedimiento de aplicar inmersión queda a criterio de los ingenieros responsables del proyecto.

Los valores del índice CBR oscilan entre 0 y 100. Cuando mayor es el valor, mayor es la capacidad portante del suelo, valores por debajo de 6 deben desecharse.

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2-5	Muy mala	Subrasante
5-8	Mala	Subrasante
8-20	Regular-Buena	Subrasante
20-30	Excelente	Subrasante
30-60	Buena	Subbase
60-80	Buena	Base
80-100	Excelente	Base

Fuente: Elaboración personal

Tabla 2.6. Valores del índice CBR

CAPÍTULO 3

3. HORMIGÓN

3.1. GENERALIDADES

El hormigón, también conocido como concreto, fundamentalmente es el resultado de la mezcla de uno o más ligantes hidráulicos con rocas (áridos o agregados) y agua. Los componentes del hormigón se dividen en dos grupos importantes; activos e inertes, son activos el ligante hidráulico y el agua, y, los inertes lo forman los áridos; arena y grava (ripio), todos ellos con ciertas características mecánicas, químicas y granulométricas. A la mezcla básica y al momento del amasado, eventualmente puede añadirse otros productos o materiales (adiciones y aditivos) con el objeto de mejorar ciertas características del producto final.

El hormigón elaborado de esta manera, es un material durable y resistente que al ser trabajado en su estado fluido, prácticamente puede adquirir cualquier forma. La combinación de estas características propias, es la razón principal para que el uso del hormigón se haya extendido tanto para estructuras interiores como para estructuras

exteriores, proporcionando un aspecto agradable y dotando de comodidad en cualquier lugar donde se lo utilice.

El ligante hidráulico es el cemento, reacciona con el agua iniciándose un proceso químico muy complejo que termina con el fraguado y endurecimiento de la masa, obteniéndose al final un material de consistencia pétreo.

Los agregados pétreos de mejor desempeño son los derivados silíceos o los provenientes de rocas volcánicas, con resistencia a la compresión superior a 50 MPa, se debe evitar el uso de agregados producto de calizas y otras rocas blandas, por otro lado, los agregados rodados aumentan la trabajabilidad y necesitan menos agua, mientras que los agregados triturados, producen mejores resistencias especialmente a la tracción, y mejora la estabilidad química del conglomerado.

Entre los áridos, la arena es el agregado fundamental dentro de la mezcla y probablemente el elemento con mayor influencia en el comportamiento final del hormigón, sin duda, las mejores arenas son las provenientes de los ríos o del mar, previamente lavadas con agua dulce, no obstante, las utilizadas con mayor frecuencia son las originadas de la trituración de rocas volcánicas. Siempre será oportuno limpiar los áridos para eliminar los finos, que alteran la hidratación del cemento e incrementan la retracción. Los agregados pétreos, no deben presentar reacciones frente al cemento, especialmente la presencia de sulfuros oxidables que se transforman en ácido sulfúrico y óxido ferroso, que afectarán al volumen final del hormigón. Finalmente, deben ser estables y no incluir materia orgánica.

ELEMENTO	VOLUMEN %
Aglomerante (cemento hidráulico)	10 – 15
Agregados granulares	65 – 75
Agua	15 – 20
Aire ocluido	1 – 2
Aditivo y adiciones (eventuales)	Variable

Fuente: Elaboración personal

Tabla 3.1. Volumen de los elementos presentes en la mezcla

Función que cumplen cada uno de los componentes de la mezcla:

- **Aglomerante (cemento hidráulico) 10 – 15%**

 - a. Llena los huecos de los áridos.
 - b. En estado fresco la pasta lubrica y da cohesión.
 - c. En estado duro la pasta tapona los huecos del árido suministrando impermeabilidad.
 - d. Proporciona resistencia al hormigón endurecido.

- **Agregados granulares (Arena y ripio) 65 – 75%**

 - a. Forma el esqueleto inerte que da rigidez para resistir la acción de las cargas, la abrasión y el clima.
 - b. Mejora la estabilidad dimensional al reducir cambios de volumen de la pasta.
 - c. Proporcionan economía.

- **Agua 15 – 20%**

 - a. Confiere plasticidad en estado fresco.
 - b. Hidrata al aglomerante.
 - c. Curado del hormigón.

- **Aire Ocluido** 1 – 2%
- **Aditivos (eventuales)**
Materiales activos que modifican las propiedades del hormigón por acción física o química.
- **Adiciones (eventuales)**
Materiales sólidos inertes.

El cemento, elemento básico para la elaboración del hormigón, no es más que un conglomerante que funciona como un pegamento y aporta un mínimo de resistencia a la masa del hormigón. Se lo encuentra en abundancia, ya que se lo fabrica en casi todo el mundo, debido a que las instalaciones necesarias para su elaboración son sencillas. El volumen de producción de cemento, representa uno de los indicadores de la economía de un país.

El proceso de fabricación del cemento, puede ser por medio de vía seca o húmeda, solamente se diferencian por la adición de agua durante su fabricación, pero, siempre se utilizará como materias primas; un 75% de caliza (carbonato de calcio, Creta o marga) y un 25% de arcilla (esquistos arcillosos o escoria). Al pasar estos dos componentes por un horno tubular rotatorio, que se encuentra a una temperatura de entre 600° C (entrada) y 1500° C (salida) y de aproximadamente de 200 metros de longitud, se fusionan de forma homogénea dando lugar al clinker de cemento, que luego de enfriarse se lo muele finamente, por medio de bolas de acero, apareciendo, entonces, el cemento propiamente dicho.

3.2. DESARROLLO HISTÓRICO

Las civilizaciones antiguas, en su necesidad de encontrar materiales que sirvan para unir piedras y otros elementos constructivos, encontraron para su propósito, materiales como; la cal, el yeso cocido y las arcillas, con el inconveniente que solo endurecían en construcciones aéreas. Fue en la antigua Grecia donde se aplicó por primera vez un mortero que endurecía, también, en agua, usando toba volcánica, primer cemento natural, los constructores griegos la mezclaban con arena para transformarla en un mortero muy eficaz. Pero, fue en el antiguo imperio romano donde se difundió el uso del hormigón con agregados pétreos.

3.2.1. Hormigón Romano

Hacia el año 700 a.C. los etruscos, civilización anterior a los romanos, utilizaban mezclas de puzolana y cal para elaborar un mortero primitivo. En la antigua Roma, los constructores, ya empleaban agregados livianos para elaborar hormigón, por ejemplo, entre los años se 120 y 125 d.C., el emperador Adriano, inspirado en los templos griegos y sobre los restos del antiguo Panteón de Agripa (edificado en el año 27 a.C. y destruido en el año 110 d.C.), construye el edificio que hoy se conoce como Mausoleo, Panteón de Agripa o la Rotonda, y, que permanece hasta nuestros días.

La construcción del Mausoleo se atribuye a Apolodoro de Damasco (97-130 d.C.), el desafío consistía en la edificación de un domo (*rotunda*) con forma perfectamente semiesférica de 43,30 metros de diámetro y con una apertura circular en la parte superior (*oculus*) de 8,20 metros, que serviría como fuente de iluminación para el

interior. Esta bóveda de hormigón, debía sustituir la forma tradicional de la techumbre de vigas de madera, usada hasta entonces en edificios civiles y templos, a la construcción de bóvedas falsas de cantería, formadas por hiladas sucesivas de piedra que vuelan unas sobre otras, cuyo uso era limitado en acueductos, puertas de ciudades y cloacas abovedadas.

Los ingenieros romanos crearon un material extremadamente ligero, pero a la vez capaz de soportar su propio peso y los esfuerzos generados en la estructura. Si bien los romanos habían construido edificios, con hormigón, desde el año 200 a.C, el trabajo en el Panteón era diferente y más complicado, ya que se requería de materiales más livianos. Los constructores de Adriano, utilizaron cemento de puzolana, un hormigón de gran resistencia, que se lo obtenían a partir de cal molida y una ceniza volcánica obtenida en Pozzuoli, cerca de Nápoles, en la actual Italia.

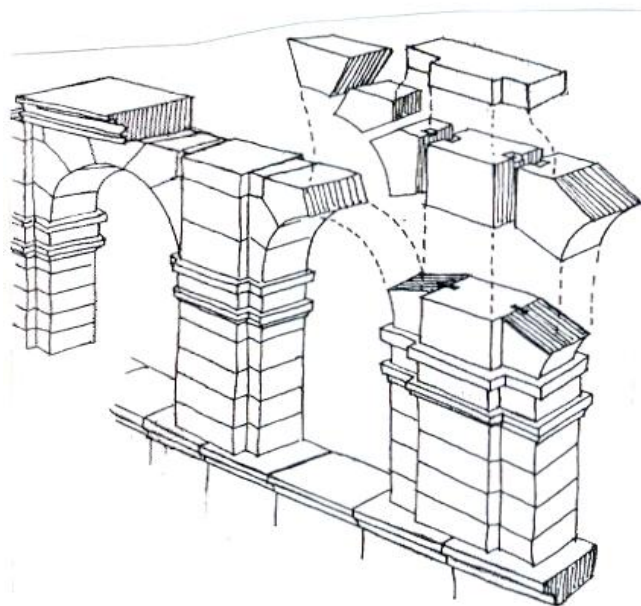


Fuente: <http://www.viajarsi.com/panteon-de-roma.html>

Figura 3.1. Panteón o Mausoleo en Roma

Vitruvio (arquitecto romano, 20 a.C), describe el proceso de construcción: “A la cal mezclada a mano con la ceniza volcánica, en una caja de mortero, se le incorpora un poco de agua de tal manera de lograr una consistencia casi seca. Transportada, esta mezcla, en cestas y se la vierte sobre la capa de roca, entonces se apisona el mortero. El apisonamiento empaqueta el mortero, reduciendo la necesidad de más agua, pero favoreciendo la adherencia de la mezcla”. [4]

La construcción de la bóveda, desarrollada por etapas, empezó por la parte más gruesa, la base de 6 metros de espesor, hasta culminar en la zona más delgada, en el oculus de 2,5 metros de espesor. Los constructores romanos utilizaron el agregado más pesado (basalto) en las partes inferiores y agregado más liviano (piedra pómez) en las partes superiores, la piedra pómez, material liviano debido a la gran cantidad de cavidades que posee, es un producto de procesos volcánicos.



Fuente: El Arte de Construir en Roma

Figura 3.2. Detalle constructivo de un arco romano

El ingenio de los constructores romanos, guiados por un espíritu práctico y un gusto innato por la sencillez, e intentando aprovechar mejor los recursos, simplificaron el uso de encofrados y dotaron a las bóvedas de un armazón interno de ladrillo que sostuviera los hormigones durante la construcción, evitando con esto, que todo el peso descansara sobre los encofrados. El ladrillo representa un soporte auxiliar para el hormigón, que era el que realmente formaba el cuerpo de la bóveda, y aseguraba su solidez y permanencia.

Otra de las estructuras notables del tiempo romano es, si duda el Coliseo, construido entre los años 75 d.C. y 80 d.C, por el emperador Vespasiano. Anfiteatro enorme, para la época, con capacidad para más de 50.000 espectadores, cuya cimentación fue moldeada con hormigón liviano, utilizando lava volcánica triturada, y, las paredes hechas con material poroso proveniente de ladrillos triturados.



Fuente: <https://cjaronu.wordpress.com/category/curiosidades/>

Figura 3.3. Coliseo Romano

Durante el tiempo que prevaleció el Imperio Romano, proliferaron todo tipo de construcciones; grandes acueductos, edificios, templos, caminos, en los que se utilizaban materiales nuevos y otros tradicionales como la piedra, pero nunca dejaron de emplear *hormigón romano*, tal cual como fue descrito por el arquitecto Vitrubio.

Legados como; el Foro de Trajano, la Basílica de Constantino, las Termas de Caracalla, El Palacio de los Césares, que forma parte del conjunto que rodea al Circo Máximo, edificaciones a lo largo de la vía Apia, unas aún en pie y otros lamentablemente en ruinas, son el claro ejemplo de la belleza arquitectónica y constructiva de la antigua Roma. Con la desaparición del Imperio, en el año 476 de nuestra era, el hormigón romano entro en desuso hasta el punto, de dejar de utilizarlo, casi por completo. Durante los siglos posteriores, hasta los años 1700, exclusivamente se empleaban, morteros compuestos por cal, mezclada con materiales puzolánicos, dejando a un lado los agregados pétreos.



Fuente: <http://www.ficunfv.com/laboratorios/51-concreto/66-concreto>

Figura 3.4. Hormigón encontrado en un acueducto de la antigua Roma

3.2.2. Hormigón Moderno

Como se mencionó anteriormente, el hormigón tal como lo concibieron los constructores romanos, cal, puzolana y agregados pétreos, no se lo volvió a usar por varios siglos, y es solo a partir de mediados de los años 1.700, que se lo redescubre.

En año de 1756, el Parlamento encarga al Ingeniero inglés John Smeaton, la construcción de un nuevo faro (por tercera ocasión) en Eddystone, los anteriores, levantados en madera, habían sido destruidos por las llamas. Al tratarse de un lugar estratégico se requería la construcción de un faro permanente y durable. Según sus propias palabras, descritas en sus memorias de construcción publicadas el año de 1791: *“Me informé de que la composición generalmente empleada en construcciones hidráulicas, tanto en las obras de piedra como de ladrillo, era la siguiente: dos medidas de cal apagada en polvo seco, mezclada con una medida de tras (puzolana) holandés”*.^[29] Entonces procuró encontrar los materiales adecuados, realizando los ensayos respectivos hasta encontrar que la cal producida en la zona de Aberthaw era la más adecuada. Es interesante mencionar que la siguiente observación que hizo al terminar los ensayos: *“Respecto a estas bolas que se mantenían constantemente bajo el agua, no parecen inclinadas a sufrir ningún cambio de forma, sino a adquirir una dureza gradual, tanto que no dudo que he de hacer un cemento que igualará la mejor piedra de Portland del mercado en solidez y duración”*.^[29]

Es esta, la primera vez en que aparece la palabra portland, isla británica del mismo nombre de donde se obtenían materiales pétreos para la construcción, relacionada a los aglomerantes elaborados con piedras calizas y arcillas.

James Parker (1795) fábrica el primer cemento artificial hidráulico por calcinación de nódulos de cal con alto contenido de arcilla y desde entonces comenzó a utilizarse la palabra cemento. Antes se utilizaba el vocablo “*caement*” para describir a toda sustancia capaz de mejorar las propiedades de otra.

En 1818, el ingeniero francés Louis Vicat, explica de manera científica el comportamiento de estos aglomerantes hidráulicos, y afirmaba: “*La fabricación de la cal hidráulica, consiste en amasar cal apagada con cierta cantidad de arcilla gris o más sencillamente de las arcilla corriente de hacer ladrillos, haciendo con esta pasta bolas que se dejan secar, haciéndolas cocer a continuación hasta el grado conveniente*”.^[29] Este aporte, le ha significado ser reconocido como el verdadero primer padre del cemento, el procedimiento que utilizó para fabricar cemento, es que se sigue empleando en la actualidad.

Joseph Aspdin y James Parker en el año de 1824, presentan la patente del proceso llamado “*Una innovación en el modo de producir una piedra artificial*”, transformándose en la primera patente otorgada para la fabricación de cemento. Por el característico color gris verde y la dureza semejante a las piedras de Portland, se lo conoce desde entonces, por el nombre de *cemento portland*.

Isaac Johnson (1885) obtiene el prototipo del cemento moderno, quemado a muy altas temperaturas una mezcla de caliza y arcilla que se transformara en el denominado *clinker*, base para la fabricación de cemento portland tal como se lo conoce hoy.

Durante el siglo XX surge un rápido crecimiento en la industria del cemento. Los adelantos en la química para producir cemento de calidad homogénea, la invención de nuevos equipos tales como; hornos más eficientes para la calcinación, molinos para molienda más fina, y, sobre todo los métodos para transportar hormigón fresco, han contribuido decididamente en la producción de cemento portland en grandes cantidades que la industria de la construcción ha sabido sacar provecho. El continuo estudio del cemento y su posterior utilización en la elaboración de hormigones, ha permitido que en la actualidad contemos con materiales cementicios de diferentes características.

El hormigón por sus características pétreas, absorbe bien los esfuerzos a la compresión, pero es ineficiente a las sollicitaciones de flexión, tracción, torsión y esfuerzo cortante. La necesidad de contar con un material que pueda soportar dichos esfuerzos, determinó la incorporación de varillas de hierro en la masa del hormigón, dando origen al denominado *hormigón armado*. La invención de este procedimiento es atribuido a William Wilkinson, quien solicitó en 1854 la patente de un sistema de hormigón que incluía armaduras de hierro.

El la década de 1860 el francés Joseph Monier, patentó varios métodos de armaduras, pero el sistema más convincente de hormigón armado fue patentado en 1892 por François Hennebique, quien basaba sus teorías en resultados experimentales, mediante pruebas de carga. Nace de esta manera los ensayos de laboratorio que generarían los primeros reportes técnicos. Posteriormente, numerosos investigadores, han contribuido en el desarrollo de la teoría y práctica del hormigón armado.

En el año de 1913 se suministra, por primera vez a una obra, hormigón elaborado en una central, hecho ocurrido en Baltimore (Estados Unidos). Para el año de 1916, se presenta la patente del primer camión hormigonera.

Freyssinet, en la construcción de un hangar, en Orly Francia, emplea por primera vez un vibrador para el hormigón fresco, y, en el año de 1933 construye los primeros postes prefabricados para transmisión de energía eléctrica, es gracia a este ingeniero francés, que se han desarrollado grandes obras e innovaciones tecnológicas, como el hormigón pretensado.

El avance de la tecnología y el mejor conocimiento de los materiales que lo componen, ha permitido una constante evolución del hormigón. El cemento actual, no se parece en nada con el utilizado por Aspdin, las mejoras experimentadas han sido trascendentales, no solo en cuanto al ahorro energético, (en la actualidad la fabricación de cemento requiere de menos de la mitad de calorías por tonelada, de las que se precisaba en el año de 1940), sino también en cuanto a sus características de composición y granulometría, que ha posibilitado obtener resistencia a la compresión a edades más tempranas.

Conocer más de cerca las características de los agregados ha contribuido a tener mejor adherencia entre estos y la pasta de cemento, logrando mejoras importantes en el comportamiento de los hormigones. El empleo de aditivos surfluidificantes ha permitido obtener hormigones prácticamente autonivelantes con altas características de resistencia, perfectamente trabajables a reducidas relaciones agua cemento.

El hormigón liviano de baja densidad, al cual se le incorpora aire por medio de espuma preformada que se incorporan a la masa el momento del amasado, técnica utilizada a partir de los años 1980, forma una estructura celular homogénea que se distribuyen por medio de miles de burbuja microscópicas en el interior de la mezcla, dándole cierta isotropía que aumenta considerablemente sus prestaciones frente a impacto, flexión, tracción, fisuración. Este tipo de hormigón ha abierto un nuevo campo de aplicaciones al ser más idóneos para soportar solicitaciones a las que no estaba capacitado un hormigón convencional.

El hormigón se ha impuesto totalmente en el campo de la construcción y se puede afirmar que no existe estructura, en la cual no este presente de alguna manera, este material. En cualquier país, por pequeño que sea, existen áridos y materias primas para fabricar cemento, por consiguiente preparar hormigón. Se considera al hormigón como un material universal que esta presente en edificios, viviendas, industrias, puentes, viaductos, puertos, carreteras, túneles, canales, tuberías, postes, durmientes de ferrocarriles y en muchas aplicaciones más.

Con frecuencia, en algunos países se utiliza la palabra “concreto” en lugar de hormigón, se trata de una adaptación a la traducción del inglés del vocablo “concrete”. Se espera que en el futuro próximo el hormigón siga con un desarrollo sustentable hasta alcanzar niveles muy altos de perfección. El material desarrollado por los ingenieros romanos, el cual utilizaba agregados ligeros para reducir el peso del hormigón, se diferencia sustancialmente de lo que actualmente conocemos como hormigones livianos.

3.3. HORMIGÓN LIVIANO

En un inicio, el hormigón liviano estuvo restringido al empleo de piedras volcánicas porosas cementadas con calizas, posteriormente se desarrollaron procesos para obtener materiales porosos por medio la adición de aire o agentes espumógenos, y al mismo tiempo se inició la producción de agregados artificiales expandidos. En actualidad, es común la utilización de cenizas y desechos industriales procesados, como agregados para hormigones livianos.

De acuerdo con el ACI 213, todo hormigón con densidad aparente inferior a 1850 Kg/m³, se considera como hormigón liviano o ligero. Existen tres grupos principales, en función de su densidad:

- *Hormigón liviano de resistencia estructural, de limitadas características de aislamiento térmico: densidad entre 1400 y 2100 Kg/m³.*
- *Hormigón ligero de resistencia media, de buenas características de aislamiento térmico: densidad de 800 a 1400 Kg/m³.*
- *Hormigón ligero de reducida resistencia y muy buenas características térmicas: densidad de 280 a 800 Kg/m³.*

La denominación hormigón liviano cubre toda una gama de materiales de construcción con diferentes propiedades, cuya principal característica es su reducido peso y lo único que tienen en común es la utilización de cemento portland en su elaboración. En términos generales, los hormigones livianos son aquellos desarrollados con el propósito de obtener un material de construcción con las mismas

propiedades que los hormigones convencionales, pero con cualidades propias en lo que se refiere a bajo peso, y a capacidades aislantes o acústicas. Existen criterios, en los que se menciona, que desde el punto de vista de sus componentes, algunos de estos productos no son en realidad hormigones, si se considera que la denominación de hormigón, es para aquellos materiales que se ajustan a los constituidos por cemento, agua y agregados (fino y grueso), de origen natural o artificial.

Disminuir la densidad del hormigón, permite una reducción de esfuerzos sobre los elementos portantes de una estructura (vigas, columnas y cimentación), característica importante que modifica los costos, al momento de diseñar las estructuras elaboradas con hormigón liviano. Bajar la sobrecarga, posibilita el montaje de elementos prefabricados con menos equipamiento, facilita la reconstrucción de estructuras ya existentes, también, mejora las condiciones de habitabilidad debido su gran capacidad de aislamiento térmico y absorción acústica.

Básicamente existen dos formas de obtener hormigones livianos:

- Reemplazando el agregado grueso por otro más liviano de menor densidad, que puede ser de origen natural, volcánico (piedra pómez, escoria celular, arcillas expandidas, bentonita) o artificiales (perlita, vesiculita), agregados plásticos (bolas de poliestireno expandido)
- Incorporando aire a la mezcla, para obtener una estructura celular que contiene vacíos (burbujas de aire atrapadas en la masa), comprendidos entre 0.1 y 1 mm, capaces de mantenerse estables durante los procesos de mezclado y compactación de la masa.

3.3.1. Hormigón con agregados livianos

Los hormigones que usan agregados livianos, en sustitución de los áridos minerales tradicionales, no son nuevos, desde las primeras civilizaciones, han venido siendo usados, proporcionando a los constructores materiales con peso específico más ligero. Por lo general han sido utilizados para solucionar problemas constructivos, relacionados con el peso de los elementos estructurales, en edificaciones que de otra manera habrían sido imposibles de realizarlas. En apariencia, se parecen a los hormigones convencionales, pero en realidad se trata de materiales, con cierta estructura celular interna que ocupa un volumen considerable, y que ofrecen determinadas características y propiedades propias, tales como; baja densidad, buen aislamiento térmico y excelentes propiedades acústicas.

En términos generales, pueden ser considerados como el resultado de la tendencia a obtener un material de construcción, con características de los hormigones tradicionales, pero que posean un grado apreciable de ligereza, capacidad aislante, y que incorpora economía en los proyectos. Los agregados livianos, empleados en la elaboración de este tipo de hormigón, pueden ser de origen natural, provenientes de yacimientos minerales, o artificial, obtenidos luego de una transformación térmica efectuada por el hombre, poseen una estructura interior cavernosa que, se produce al generar altas temperaturas que originan gases, y por consiguiente vacíos, generalmente dispersos, que expanden al material (piedra pómez, por ejemplo). Las propiedades de estos elementos no vienen fijadas solamente por el porcentaje de vacíos que contienen, sino también, por la naturaleza, cantidad, tamaño y distribución de las cavidades de aire, en el interior del material.

Existe una gran diversidad de agregados livianos con distintas propiedades, características y origen, entre los más representativos se encuentran:

- *Piedra pómez.* Sin lugar a dudas el material más representativo de un agregado liviano es la piedra pómez. Piedras de origen volcánico, son piroclásticos porosos constituidos de vidrio en forma de espuma, que se producen por el enfriamiento muy rápido del magma ascendente de alta viscosidad. Entre los componentes químicos más importantes de la piedra pómez están el trióxido de sílice y el trióxido de aluminio. Su origen volcánico le confieren ciertas características; una gran cantidad de cavidades o células cerradas diminutas, que le dan una porosidad con sólidos de grano al mismo tiempo, porosidad que le permite absorber y retener agua además de hacerla ligera, permitiéndola incluso flotar en el agua. Es resistente al frío, al fuego y a la intemperie y esta libre de sales solubles en el agua, posee partículas de formas variadas destacándose las alargadas y angulosas, tiene color blanco o gris, su textura áspera y porosa, esponjosa o espumosa con muchos huecos y cavidades que la hacen una piedra liviana de baja densidad, muy útil para ser usada como agregado liviano en diferentes tipos de hormigón de baja densidad y en general en todo tipo industria, como filtro, e incluso en el hogar, como abrasivo para la limpieza. La piedra pómez tiene una dureza media comprendida entre 5 a 6 Mohs, el poder abrasivo es más bien bajo, produciendo un efecto muy suave sobre las superficies, y su densidad varía entre 400 Kg/m³ a 900 Kg/m³.
- *Rocas de origen sedimentario.* Son por lo general tierras diatomáceas, diatomita o sílice fósil. Consiste esencialmente en residuos microscópicos del

esqueleto silíceo de un organismo fósil, presenta una contextura formada por innumerables poros y canales con una densidad aparente muy reducida lo que al usarla como agregado, permite obtener hormigón liviano.

- *Arcilla expandida.* Material aislante de origen cerámico, producido industrialmente. Se fabrica a partir de arcilla pura extraída de yacimientos a cielo abierto, después de un proceso de desbaste, esta arcilla pura es almacenada en bodegas cerradas para su homogenización y posterior secado. Una vez secada, la arcilla se muele hasta obtener un polvo impalpable denominado crudo, que al mezclarlo con agua y por efecto de la rotación de los platos granuladores se forman esferas de barro de tamaño controlado. Estas pequeñas esferas con una granulometría de 0 a 4 mm, forman las denominadas arcillas expandidas. La expansión se produce en hornos rotativos a temperaturas de 1.200 C°, el choque térmico hace que se produzca la incineración de la materia orgánica presente en el interior de la arcilla, los gases producidos expanden la bola de barro hasta cinco veces su tamaño original, el producto final es una bola de arcilla rugosa que presenta una alta porosidad. Se trata de un material duro color marrón de forma redondeada, con densidades que van desde 270 a 600 Kg/m³, no es corrosivo, no se pudre, resistente al fuego, no produce gases, su exposición al sol no representa problema alguno y es un aislante continuo sin puentes térmicos.
- *Escoria espumosa.* La escoria proveniente de alto hornos de fundición, se forma por la fusión de los residuos del material, los fundentes y la ceniza de coque o de carbón vegetal especial, y se la conoce con diferentes nombres; escoria espumosa, escoria esponjosa, pómez artificial o pómez siderúrgica. Se

la puede considerar, dentro de la clasificación de materiales cerámicos, por estar compuesta principalmente de cuatro óxidos; de silicio, de aluminio, de magnesio e hidróxido de calcio que constituyen aproximadamente el 95% de su composición, otros componentes que también están presentes en las escorias espumosas son, el azufre, manganeso y hierro, estos componentes varían de acuerdo al tipo de horno, la composición, las proporciones de mineral, fundente, coque y otras materias primas. La composición mineralógica de la escoria espumosa es un factor importante en la determinación de su comportamiento, cuando se usa como material inerte, para la elaboración de hormigón, las que provienen de altos hornos y que han tenido un enfriamiento moderado, son las que resultan de interés como agregado fino, para la elaboración de hormigón, de todas maneras, antes de utilizarlas como agregado es necesario someterla a un proceso de tratamiento combinado, en el que se incluye agua y aire. El proceso de tratamiento, básicamente, consiste de las siguientes etapas; expansión de la escoria, granulación y enfriamiento. El método más aplicado es el *Galex*, desarrollado originalmente en Canadá, que consiste en un proceso físico que combina la expansión y porización de la escoria, facilitado por medio de la inyección de agua, y la dispersión mecánica, obtenida mediante un tambor horizontal giratorio. Al final, después del enfriamiento y solidificación, se obtiene un material de gran estabilidad, lleno de poros regulares y bien formados que luego del molido y cribado, se lo denomina, *escoria expandida*. El material con partículas de entre 0 y 3 mm, denominado *arena de escoria*, se utiliza como agregado en hormigones livianos.

- *Poliestireno expandido.* Se trata de un agregado artificial a base de un polímero en forma líquida, llamado estireno, cuyas moléculas se polimerizan dando origen a las macromoléculas del poliestireno. El estireno se mezcla con agua y un agente expansor, para lograr alcanzar hasta cincuenta veces su volumen original. El poliestireno expandido es un material muy poroso, contiene de 3 a 6 millones de celdillas por centímetro cúbico, cerradas, no conectadas, y llenas de aire. Es un material blando y de buena elasticidad, de baja densidad 10 Kg/m^3 , la superficie de las esferas de poliestireno expandido es completamente lisa, lo que perjudica su adherencia con la pasta de cemento y agua a la hora de elaborar hormigón que sumado a su baja densidad hacen que algunas floten en la mezcla, generando así un esqueleto granular defectuoso. Es un material de muy baja absorción gracias a la conformación de las celdas de aire cerradas que no se encuentran conectadas entre sí, el tamaño de las esferas varía entre 2 y 8 mm de diámetro.
- *Perlita expandida.* Proviene de un vidrio volcánico amorfo, compuesto de feldespatos y silicatos de alúmina, que contiene de 2% a 5% de agua combinada, la cual no se elimina por simple secado sino solamente a temperaturas de fusión. Si se calienta esta roca volcánica a temperaturas de entre 850 y 900°C , se ablanda, por tratarse de un vidrio, provocando que el agua atrapada en la estructura del material escape y se vaporice ocasionando que el material se expanda notablemente (16 veces su volumen original), dando origen a la aparición de un agregado, que presenta una contextura de partículas o nódulos de forma perlada; de allí su nombre. La perlita expandida tiene una densidad de entre 30 y 150 Kg/m^3 , debido a su baja densidad y

precio relativamente bajo, se la utiliza como agregado en hormigones livianos con densidades que varían entre 450 a 950 Kg/m³.

- *Vermiculita.* La vermiculita es un mineral de origen natural, formado por alúmino-silicatos de hierro y magnesio y, se la cataloga en el grupo de las micas. Al elevar rápidamente la temperatura (entre 700 y 1300° C), la vermiculita se expande entre 8 y 35 veces su volumen original, la expansión se debe a la liberación de vapor de agua, por efecto del calor y varía según el origen y la naturaleza de vermiculita, proceso que se denomina exfoliación. El mineral triturado a la dimensión conveniente, debe sufrir un calentamiento brusco, y simultáneamente un batido activo, con el fin de regularizar la acción calorífica en toda la masa. La vermiculita exfoliada se presenta bajo la forma de partículas de diferentes tamaños, que van desde polvo hasta partículas de 30 mm, con densidad, dependiente de la granulometría, comprendida entre los 60 a 140 Kg/m³. Es un material incombustible y químicamente muy estable a altas temperaturas, es insensible a los agentes atmosféricos y no produce ninguna acción sobre el hierro y el acero, se utiliza como agregado para obtener hormigón liviano con densidades que van de entre 350 y 1200 Kg/m³.
- *Cascote de ladrillo.* Se trata de ladrillo triturado, que se encuentra conformado por el 80% de arcilla con un agregado de material ligante que puede ser estiércol o cascarilla de cereales. Es un producto proveniente de los hornos de ladrillo, residuos de la fabricación de baldosas o de la recuperación de escombros, que previa la limpieza de impurezas, debidamente triturados y cribados pueden ser usados como agregados. Su porosidad depende del tipo

de la tierra utilizado y del proceso de elaboración, su densidad varía entre 900 y 1200 Kg/m³, aunque es menor que los agregados convencionales, es mayor que otros agregados livianos. Tiene colores variables, dependiendo de la cantidad de oxido que contenga. Son de forma irregular con aristas angulosas, superficie áspera y rugosa, de estructura porosa y muy absorbente.



Fuente: www.fceia.unr.edu.ar

Figura 3.5. Escoria de alto horno



Fuente: <http://iberica.extha.com/vermiculite.php>

Figura 3.6. Vermiculita

3.3.2. Hormigón con inclusión de aire

Por lo general se utilizan dos métodos para la incorporación de burbujas de aire al interior de la masa de cemento, al producto resultante de estos dos procesos se conoce, comúnmente, como Hormigón Celular.

- Hormigón gaseoso. Reacción química de una base alcalina (cal y cemento), con un ácido, para liberar gas que se incorporan al mortero fresco permitiendo que la masa se expanda sin dejar que el gas se escape.
- Hormigón con espuma. Introducción de burbujas aire al interior del mortero, por medio de espuma preformada.

Los primeros intentos para producir hormigones ligeros, datan de finales del siglo 19. La incorporación de aire a la masa de hormigón, método patentado por el checoslovaco, E. Hoffman en 1889, se lo hacía por medio de dióxido de carbono, generado al reaccionar ácido clorhídrico con piedra caliza. El año 1914, los norteamericanos Aylsworth y Dyer, incluyen por primera vez polvo de aluminio e hidróxido de calcio, como agentes aireadores.

Existe un sinnúmero de patentes para la elaboración de Hormigón Celular, una del año 1917, por ejemplo, en que un holandés proponía el uso de levaduras orgánicas como agente aireador. En el transcurso del tiempo, se han ensayado distintos polvos metálicos, finamente divididos, para producir el desprendimiento gaseoso; zinc, magnesio, bario, litio, peróxido de hidrógeno, sodio, o hipoclorito de calcio, que reaccionan con los álcalis del cemento, entre otros.

3.3.2.1. Hormigón Celular Gaseoso

La utilización de aluminio en polvo, para incorporar gas en la masa de hormigón, es el método más aceptado en la elaboración de los denominados *hormigones gaseosos*. El proceso consiste en adicionando un compuesto de aluminio a la masa de hormigón, con el objeto de introducir burbujas de gas hidrógeno, generado al reaccionar el aluminio con el hidróxido de calcio y los álcalis liberados del cemento, entonces, el gas expande la masa hasta alcanzar la densidad deseada, la denominación Hormigón Celular, es aplicable a este producto.

El material, una vez elaborado y moldeado, es curado con vapor a presión atmosférica o en autoclave con, vapor a 180° C, y alta presión. Definitivamente el material curado en autoclave tiene mayor resistencia a la compresión, mejor estabilidad volumétrica y mayor durabilidad, que el curado al aire libre.

El hormigón preparado con este método, originalmente se desarrolló en Suecia (1924) y resulta ser un descubrimiento bastante casual. El doctor Axel Johan Eriksson, trabajando con muestras de este material, decide acelerar el proceso de curado, de esta masa porosa, introduciéndola en un autoclave de laboratorio. El resultado de la fusión, de los componentes del sílice y la cal, un cristal hidratado de silicato de calcio, material con formación cristalina mejorada, más resistente y parecido al mineral de Tobermorita, piedra volcánica, que se encuentra usualmente en conjunción con el Basalto, y que se la conoce, comúnmente, con el nombre de *toba volcánica*.

En 1924 se patenta este proceso, denominado “*ñgas concretei*”. Inicialmente se conocía, a este material, como “*hormigón gaseoso*” y se lo utilizaba en paneles aislantes de casas para mantenerlas protegidas de las bajas temperaturas en épocas invernales, para el año 1929, el doctor Eriksson, encuentra un fabricante, Y-TONG, y por primera vez se fabrica comercialmente Hormigón Celular, curado en autoclave (HCA) o por sus siglas en inglés AAC (Autoclaved Aerated Concrete).

El año 1943, Josef Hebel adquiere la tecnología, la perfecciona y desarrolla el sistema para fabricar bloques livianos, utilizados en mampostería y paneles prefabricados de Hormigón Celular, curado en autoclave, llamado “*Sistema Hebel*”, muy popular en la actualidad dentro de la industria de la construcción de viviendas, se lo utiliza por sus características aislantes y por su fácil operación.

Luego de la segunda guerra mundial, esta nueva tecnología de expandió rápidamente por todo Europa, ocasionada fundamentalmente por la gran demanda de materiales para la reconstrucción en las ciudades desbastadas por la guerra, los bloques y paneles de Hormigón Celular curado en autoclave, eran muy solicitados por sus propiedades aislantes y por la facilidad para ser transportarlos y colocarlos. En la Unión Soviética se desarrollaron aplicaciones constructivas, sobre todo, en paneles estructurales destinados a viviendas de carácter social.

Para finales de los años 1950, la tecnología para elaborar materiales livianos, había alcanzado gran auge, a tal punto que no solo se producía Hormigón Celular curado en autoclave, sino también, empezó el desarrollo de materiales con inyección de

burbujas de aire, por medio de espuma previamente elaborada. Esta tecnología se introdujo a los Estados Unidos, donde no encontró acogida, debido, principalmente, a la baja resistencia a la compresión de este nuevo material, y se la destina inicialmente, solo a la cobertura de techos y paredes, es decir, como material de aislamiento y relleno.

En los últimos 30 años, el desarrollo de la tecnología en la construcción, ha introducido en el mercado una gran variedad de productos, para mejorar las características de los hormigones. Se ha puesto mucho énfasis en crear hormigones más duraderos, a través de los cambios efectuados tanto en los componentes, como en las proporciones, incluyendo, los agregados, aditivos y la relación agua-cemento.



Fuente: www.xella.cl/hebel/

Figura 3.7. Bloques fabricados con el sistema Hebel

3.3.2.2. Hormigón Celular con Agente Aireador

El proceso de inclusión de burbujas de aire, por medio de un agente espumógeno, con el fin de producir Hormigón Celular, es de reciente tecnología y rápidamente ha encontrado un amplio campo de aplicación dentro de la construcción. Inicialmente usado en la fabricación de tabiques divisorios, techos, bloques alivianados, posteriormente, en aplicaciones geotécnicas tales como; rellenos de suelos, taludes y muros de contención. Su difusión y acogida se debe esencialmente a su eficiencia, facilidad de transporte, ligereza, plasticidad, fluidez y otras características más, que lo diferencian del hormigón convencional, elaborado con agregados pétreos.

En la construcción vial, se utiliza Hormigón Celular fundamentalmente en aplicaciones de mejoramiento de suelos, rellenos de ductos y conductos que pasan por las vías y caminos, con la gran ventaja, que debido a su baja densidad puede ser removido con facilidad, también, se lo usa en estribos y aproximaciones de puentes, en remplazo de la base y subbase, hechas con materiales pétreos para pavimentos flexibles y rígidos, y más recientemente, en las cabeceras de pistas de aterrizaje, como seguridad y barrera contra el ruido.

Como ya se mencionó, en los inicio todos los procedimientos empleados para elaborar Hormigón Celular, estaban basados en la formación de gases por medio de reactivos químicos, que se añadían al mortero. Estos procedimientos tenían básicamente dos inconvenientes; la tendencia de las cavidades de aire a segregarse, y el colapso durante su manejo y su posterior colocación en moldes y encofrados.

Con el desarrollo del proceso basado en un agente espumógeno incorporado a la mezcla por medio de; químicos añadidos directamente en la mezcladora, o inyectando espuma estable, previamente formada, quedaron eliminados los inconvenientes mencionados.

De acuerdo a la manera de introducir el aire en la mezcla, se generaran estructuras y materiales endurecidos con diferentes características, la inclusión de aire por acción de un agente espumante produce Hormigones Celulares con un contenido de aire no menor al 30 por ciento:

- El material formado añadiendo un aditivo incluso de aire concentrado, directamente en la mezcla y amasándola por un periodo no menor a 10 minutos, se logra que el 75% de las burbujas tengan un diámetro comprendido entre 0,3 y 1,5 milímetros.
- El material elaborado, al incorporar a la mezcla espuma previamente preparada, a partir de una solución compuesta por un agente espumógeno (proteínas hidrolizadas o tensoactivo sintético), y agua, en una cantidad determinada. Este proceso proporciona gran cantidad de burbujas, mucho más finas (20 a 200 micras de diámetro), que el procedimiento anterior. La preparación de la espuma se hace por medios mecánicos, introduciendo aire a una solución espumosa, mediante el empleo de un aparato sencillo, denominado *generador de espuma*.

Este último proceso implica que el mortero y la espuma son preparados por separado y que posteriormente se los mezcla en una hormigonera de tipo

convencional. Al preparar por separado el mortero y la espuma resulta más sencilla su dosificación, de manera que pueden obtenerse una extensa variedad de densidades con un sin número de cualidades.

La presencia de burbujas de aire de tamaño uniforme, dan un alto grado de fluidez a la mezcla, trascendental durante los procesos de elaboración, transporte y vertido de la masa de hormigón. La estabilidad de las burbujas de aire es bastante alta, de tal forma, que no solamente resiste el maltrato durante la mezcla, vaciado y relleno de los encofrados, sino que permanece estable hasta el endurecimiento del hormigón.



Fuente: www.cretefoamer.com/

Figura 3.8. Espuma preformada saliendo del generador

3.3. HORMIGÓN CELULAR

De acuerdo a lo visto hasta este momento, se reconoce como Hormigón Celular tanto al hormigón gaseoso, como al hormigón con agente aireador. La presente disertación esta enfocado solamente al estudio del producto elaborado a partir de un agente aireador y más específicamente, espuma preformada inyectada en la mezcla, proceso que, permitirá suministrar las muestras necesarias para los ensayos de laboratorio que proporcionarán el soporte necesario al presente trabajo.

En el capítulo cuatro se volverá a tratar detenidamente el tema del Hormigón Celular con Espuma, detallando los procesos y pasos que intervienen en la elaboración de la mezcla, preparada por medio de una solución espumosa. Se describirán los materiales locales disponibles, se analizará toda la información disponible que conjuntamente con normas y tecnologías actuales, permitirán desarrollar un material capaz de satisfacer el objetivo final; representar una alternativa valedera a la base y subbase de material pétreo compactado.

Hallar su procedencia ayudará a entender el comportamiento y utilidad del Hormigón Celular a base de espuma. En la actualidad, existen varias mezclas a las que se denominan Hormigón Celular. Por lo tanto, es necesario encontrar conceptos adecuados que se apliquen correctamente y ayuden a identificar y definir al material o materiales que se pueden llamar como tal. La forma de preparación y el uso al que se destina este material, representan más bien, una descripción cualitativa y no una definición objetiva.

3.3.1. Procedencia

Sin duda, el antecedente más próximo al concepto de Hormigón Celular se encuentra en el desarrollo de materiales formados a base de cemento, agregados pétreos y aditivos que proporcionan a la mezcla una consistencia muy fluida.

Si bien se trata de materiales de tecnología reciente, ya en el año 1964 el “U.S. Bureau of Reclamation” (Oficina de Reclamaciones de Estados Unidos) documentó el uso de un producto cementicio muy pastoso, al que denominó *suelo-cemento plástico*. Se utilizó este novedoso material, por primera vez, para rellenar las zanjas del tendido para tuberías en el proyecto del acueducto Río Canadá, en el estado de Texas, Estados Unidos, el propósito era encontrar un método más rápido y económico al relleno de suelo compactado de uso tradicional. A partir de los 1970 se analiza el comportamiento mecánico y las propiedades de este nuevo material, en la Universidad de Toledo, Ohio, se realiza el estudio por la necesidad de encontrar una alternativa para el suelo-cemento compactado en sitio, desde entonces que se empieza a conocer, a este material, como *Controlled Low-Strength Material* o Relleno de Densidad Controlada, para el español.

El ahorro que representaba producir este material en una planta de hormigón, sin necesidad de utilizar otro tipo de equipo a más de los camiones mezcladores para su transporte, desde la planta a la obra. Estas características, lo hacían sumamente interesante y surge, entonces, la primera empresa productora con patente del material, que se lo denominó *K-Krete*.

En las décadas siguientes, este material era usado ampliamente, a pesar de que no existían normas ni especificaciones técnicas para su elaboración y consumo, para regular el uso indiscriminado del denominado *Material de Baja Resistencia Controlada*, se forma el Comité ACI 229, que luego emite su primer reporte, aprobado el año de 1994 y posteriormente publicado en 1995.

En el reporte del ACI 229R-99, se encuentran las primeras referencias del CLSM, (*Controlled Low-Strength Material*, por sus siglas en inglés), *Materiales de Baja Resistencia Controlada (MBRC)*, y en el Reporte del Comité ACI 116R-00, *Terminología del Cemento y Hormigón*, se lo tífica como un material cementicio que a los 28 días alcanza una resistencia a la compresión igual o menor a 8.3 MPa. También, se lo comienza a denominar *Flowable Fill* o *Relleno Fluido*, en su traducción al español, y, se lo emplea para aplicaciones específicas. Este tipo de mezclas no están diseñados para resistir; los procesos de congelación y deshielos; fuerzas abrasivas, erosivas, corrosivas; o al ataque de químicos altamente agresivos.



Fuente: Ing. Anibal Martínez V.

Figura 3.9. CLSM utilizado en el relleno de zanjas

3.3.1.1. Materiales de Baja Resistencia Controlada

El término Materiales de Baja Resistencia Controlada, MBRC, puede ser usado para describir a una familia de mezclas usadas en una variedad de aplicaciones, estos materiales reciben otros nombres, tales como; mortero o relleno fluido, suelos líquidos o fluidos, relleno fluido que no encoge, mortero o material de baja densidad controlada, morteros o materiales de baja resistencia controlada, pero, sin duda, la denominación más conocida es *rellenos fluidos de baja resistencia controlada* o simplemente *rellenos fluidos*.

A estos materiales se los define como morteros u hormigones de baja resistencia de consistencia muy fluida, de fácil nivelación y auto-compactantes, y, han sido desarrollados como alternativas al relleno granular compactado, en lugares donde se requiere llenar, un cierto volumen con material estable.

Por tratarse de un material fluido, el asentamiento tal como se mide en un hormigón tradicional, generalmente superior a 200 mm., facilita su colocación con un mínimo esfuerzo, sin necesidad de vibración o golpes, y, endurece como un material fuerte dando lugar a estructuras estables de baja resistencia, sin importar las condiciones climáticas.

Si bien, en la definición se incluye a todo los materiales con resistencias a la compresión, iguales o menores a 8 MPa., en la mayoría de las aplicaciones se emplean mezclas con resistencias inferiores a 2.1 MPa. En caso que requiera ser removido en el futuro, la resistencia deberá estar entre 0,2 MPa y 1.4 MPa.

Por representar una alternativa al relleno granular compactado, y considerando el ahorro en mano de obra, equipo y tiempo, los rellenos fluidos de resistencia controlada se han desarrollado en las siguientes aplicaciones:

- *Rellenos simples.* En zanjas como remplazo del suelo procedente de la propia excavación o de la utilización de materiales granulares de préstamo, se coloca sobre las zanjas, debido a su fluidez se acomoda fácilmente alrededor de las tuberías brindando un soporte uniforme sin la necesidad de la aplicación de energía mecánica que pueda deteriorar las conducciones enterradas en la zanja, sino más bien, representa un apoyo para tuberías en todo tipo de construcción o para envolver completamente las tuberías de agua potable, aguas residuales, gas, teléfono y otros.
- *Rellenos estructurales.* Bases para losas de piso, bases para pavimentos, cimientos de conductos y excavación de pilotes, estribos de puentes, recubrimiento de ductos y conductos, muros de contención y cortes de carretera.
- *Otros usos.* En minas abandonadas, tanques de almacenamiento subterráneos, pozos y pozos de ventilación y alcantarillas de túneles abandonados, cimientos y estructuras subterráneas, vacíos debajo del pavimento, en construcción de terraplenes, nivelación de terrenos, nivelación de azoteas y entrepisos.

Los procesos descritos representan un ahorro en tiempo y dinero, partiendo de que no necesita; compactación manual, el ancho de la zanja y el tamaño de la excavación es mínima, permite el trabajo sobre el relleno después de tan solo tres horas de haber

sido vertido, en este tiempo ya soporta el peso de una persona sin dejar huellas y en 24 horas permite el paso de un vehículo de mediano peso, alcanzado resistencias a la compresión de entre 0,35 MPa y 0,70 MPa, similares a la capacidad de soporte de un suelo de relleno, con la peculiaridad que puede ser removido, si las necesidades ameritan, aún por medio de herramientas manuales.

El relleno fluido de baja resistencia controlada, usualmente esta elaborado con cemento portland Tipo I y Tipo II, agua, cenizas volantes u otro producto similar, agregado fino o agregado grueso o ambos. Algunas mezclas están constituidas solamente de cemento, agua y cenizas volantes.

De todas maneras, los materiales utilizados en las mezclas de relleno fluido, deben estar conforme al ASTM o cualquier otra norma requerida. El uso de materiales normalizados no siempre es necesario, la selección de materiales puede estar basada en la habilidad, costo, aplicaciones específicas, y de las características necesarias de la mezcla como; fluidez, resistencia, excavabilidad y densidad.

El relleno fluido de baja resistencia no debe ser confundido con un hormigón de baja resistencia, ni tampoco con un suelo-cemento compactado, como el reportado en el ACI 230.1R, el relleno fluido no requiere de compactación para su consolidación o de curado para alcanzar las resistencias deseadas. Un Suelo-Cemento compactado frecuentemente excede los 8.3 MPa de resistencia, máximo límite establecido para un relleno fluido, la densidad de los rellenos fluidos, normalmente se encuentra entre

1840 a 2320 Kg/m³, pudiendo variar hacia abajo, llegando incluso hasta 1360 Kg/m³, de acuerdo a los materiales usados.

El uso del relleno fluido en Estados Unidos, Canadá, Suiza, Italia, Francia y el Reino Unido, cuenta ya con más de treinta años de experiencia, y están específicamente definidos y claramente diferenciados de los hormigones y los morteros tradicionales.

En realidad se trata de un material híbrido entre un suelo y un hormigón, ya que se elabora con los mismos materiales y se lo vierte de igual manera que un hormigón, pero en servicio sus propiedades se parecen más, a suelos de calidad controlada, de todas maneras, es necesario recordar, que los materiales y las dosificaciones afectan las propiedades de las mezclas.



Fuente: Ing. Aníbal Martínez V.

Figura 3.10. CLSM usado en el llenado de cavidades

3.3.1.2. Materiales de Baja Resistencia y Baja Densidad Controlada

El Capítulo 8 del reporte ACI 229R-99, describe a los denominados LD-CLSM, (*Low Density Controlled Low-Strength Material*), *materiales de baja densidad y baja resistencia controladas*, fabricados en base a cemento y aditivos químicos o por medio de espuma pre-elaborada que introduzcan aire a la mezcla.

Entonces, al añadir un aditivo que introduzca aire a la mezcla, se obtiene otro tipo de producto diferente al relleno fluido (CLSM). En el mismo Capítulo 8 se define al LD-CLSM como; un material liviano, cementicio, de consistencia fluida, que aparte de la baja resistencia (entre 0,1 MPa y 3,4 MPa), también, tienen baja densidad (entre 290 Kg/cm³ y 1900 Kg/cm³), que por lo general se lo obtiene, por medio de adición de un químico que permite la inclusión de aire o de agentes espumógenos capaces de generar espuma por medio de una solución espumosa añadida a la mezcla de cemento, arena y agua, durante el amasado, en donde la cantidad de espuma que se inyecte a la mezcla, determinará la densidad final del producto.

Estos materiales, de baja densidad, fueron desarrollados en reemplazo al CLSM, relleno fluido normal, para ejecutar obras donde el CLCM no era posible utilizarlo debido al excesivo peso, usualmente, en suelos con poca capacidad de soporte. Hoy en día su campo de aplicación se ha extendido, encontrando un lugar mucho más amplio dentro de construcción, a parte, de todas las aplicaciones de un relleno fluido normal, puede ser utilizado como; aislante acústico, aislante térmico; como base y subbase, en reemplazo de suelos con poca capacidad de soporte, suelos con nivel freático alto y en suelos pantanosos.

Cuando se lo utiliza como base y subbase, en pavimentos, el diseño debe incluir un buen drenaje donde se prioricen los bordillos, desagües, alcantarillas y pendientes adecuadas en el pavimento. Siempre será necesaria la utilización de una capa de rodadura, colocada sobre la superficie del relleno fluido, debido a sus propiedades relativamente bajas, de resistencia al desgaste. Se lo vierte directamente entre los bordillos previamente construidos, el espesor de la capa del LD-CLSM depende de la resistencia a la compresión del material, para un rango de resistencias a la compresión de 2,8 y 8,3 MPa los coeficientes estructurales (medida de la capacidad, como componente estructural de un pavimento flexible) pueden tener un rango de entre 0,16 y 0,28, superiores a los de la base y subbase convencionales y semejante a los suelos tratados con cemento.



Fuente: www.chemventures.com/concepts/road-subbase.htm

Figura 3.11. Relleno Fluido LD-CLSM usado como subbase

3.2.2. Definición

La Guía ACI 523.2R-96, no hace ninguna distinción entre los materiales a los que se denominan Hormigones Celulares, pero si señala las formas de prepararlos y los califica como materiales en cuya elaboración se añade químicos que mediante reacción con los elementos del cemento, incorporan aire a la mezcla. Entonces, según la Guía, existen tres formas de preparar Hormigón Celular:

- Material formado con polvo de aluminio y curado posteriormente a través de autoclave. Procedimiento analizado anteriormente y que se lo conoce, más frecuentemente, por el nombre de *Sistema Hebel*.
- El proceso por el cual se añade espuma preformada a la mezcla.
- Preparación de un material al que se introduce un agente espumógeno concentrado, directamente en la mezcla.

Ciertamente, resulta confuso definir con certeza al Hormigón Celular debido a que siempre que se encuentra un producto parecido, tanto en la forma de elaboración como en las aplicaciones, existe la tendencia a denominarlo con el nombre genérico de Hormigón Celular, lo que si esta claro, es que toda denominación de Hormigón Celular lleva en su composición la incorporación de burbujas de aire ya sea de forma química o por acción mecánica.

La Guía del Comité ACI 523,1R-06, aclara en algo estos conceptos, en el Capítulo 1 dedicado a este tipo de materiales, define, por un lado el Hormigón Celular y por otro al relleno fluido (LD-CLSM), que se asemejan mucho, en la forma de prepararlos, aplicaciones y en ciertas propiedades.

El mencionado manual del ACI dice en su parte pertinente; *“Hormigón Celular de baja densidad es el producto de la mezcla de cemento hidráulico, agua y espuma preformada obtener un material liviano que una vez endurecido tiene una densidad seca menor o igual a 800 Kg/m³. Esta mezcla se puede incluir agregados y otros materiales compontes incluyendo pero no limitando cenizas volantes y las mezclas químicas”*.

Con esta aclaración, se debe descartar definitivamente la tendencia de ciertos autores a denominar como Hormigón Celular a los rellenos fluidos de baja resistencia y baja densidad controladas. Consideración que se la hace a pesar de que estos materiales incorporan aditivos aireadores a la mezcla, y a que el proceso de elaboración se asemeja mucho a la fabricación de Hormigón Celular con Espuma.

El mismo documento, recomienda el uso de cemento portland siguiendo los requerimientos de la norma ASTM 150, pudiéndose usar otros tipos de cementos hidráulicos o con adiciones pero siempre conforme a las normas ASTM C 595 o ASTM C 115.

El agua para la mezcla debe ser de preferencia potable y deberá estar exenta de aceite, ácidos, álcalis, sales, material orgánico o cualquier otra sustancia deletérea. Cuando se use agua que no sea potable, debe ser analizada para determinar la dureza, el pH, sólidos en suspensión, contenido total de sales y otras sustancias que puedan afectar a la obtención de la espuma preformada, al tiempo de fraguado y a la resistencia final del Hormigón Celular.

La solución espumosa se obtiene diluyendo el agente espumógeno en determinada cantidad de agua, luego de pasar esta solución espumosa por el generador de espuma, se incorpora al mortero, cuya densidad es generalmente de entre 32 a 64 Kg/m³. La composición química del agente espumógeno concentrado, debe ser capaz de producir y mantener estable las células de aire, durante el proceso de mezclado, es decir, que la espuma debe resistir, sin destruirse física y químicamente, las fuerzas generadas durante el mezclado, el bombeo, vertido y moldeo del Hormigón Celular.

Las formulaciones más comunes de agentes espumógenos, contienen proteínas hidrolizadas o surfactantes sintéticos, las normas ASTM C 796 y ASTM C 869 proporcionan especificaciones para la evaluación y comportamiento de un específico agente espumógeno, pero, la mayor información concerniente a estas formulaciones y los procedimientos para su uso es generalmente proporcionado por los fabricantes de aditivos para el hormigón. También, se ha experimentado con otro tipo de agentes espumógenos de origen natural o artificial tales como; detergentes, jabones resinosos, colas animales o vegetales, resinas.

Con el fin de evitar confusiones futuras y con el afán que se comprenda mejor el presente trabajo, es necesario llegar a un acuerdo, para lo cual se propone que en el futuro, solamente se llame Hormigón Celular, al material producto de la incorporación de espuma en el interior de la masa del mortero, o sea, el material producto de la mezcla de cemento portland, arena fina, agua y espuma preformada, previamente elaborada en un generador.

Con toda esta información, se puede definir al Hormigón Celular como:

Un material liviano, versátil, de baja densidad, formado con un ligante hidráulico (cemento portland), un agregado fino (generalmente arena fina o ceniza volante), espuma preformada estable y una relación agua cemento determinada, que mediante métodos mecánicos, usando un generador de espuma, se introducen millones de burbujas de aire en el interior de la mezcla, logrando de esta manera, expandir la masa que se llena de una gran cantidad de cavidades o células prácticamente uniformes, que no tienen comunicación entre ellas y que se encuentran distribuidas uniformemente, dando como resultando un producto en forma de un líquido pastoso, auto-nivelante, que por su plasticidad, mayor a 20, facilita la distribución y el colado con un mínimo esfuerzo, sin necesidad de ser vibrado o compactado, que permite ser bombeado, incluso a distancias considerables, tanto vertical como horizontalmente.



Fuente: www.cretefoamer.com/

Figura 3.12. Hormigón Celular con Espuma Preformada

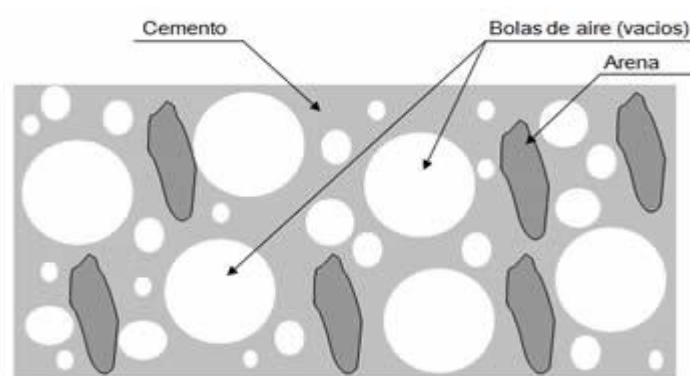
3.3.3. Características y propiedades

A pesar de mantener semejanzas con otros productos que incorporan en su mezcla agentes aireadores, el Hormigón Celular, sin duda, mantiene su propia forma de preparación, características y propiedades.

- El relleno fluido de baja densidad controlada, por ejemplo, utiliza aditivos aireadores, para inyectar entre 20 y 30% de aire, que se incorpora directamente a la masa de hormigón y siempre requerirá de dosis y concentraciones más altas en comparación con un Hormigón Celular que incorpora entre 20 a 60% de aire a la mezcla, por medio de espuma pre-elaborada a partir de una solución de concentrado-agua en una relación que generalmente esta en una relación 1:20 hasta 1:100.
- La dosificación de aditivos aireadores en el caso del relleno fluido, generalmente se realiza por medio de cápsulas de 0,1 litros por cada 100 kg de cemento. Pero dependiendo del fabricante, pero se puede decir que una buena dosificación esta entre 0.1 y 0.45 litros por cada 100 Kg. de cemento. En el caso del Hormigón Celular, depende mucho de la expansión de la espuma preformada y de la densidad final del producto, por regla general, mientras más baja la densidad final mayor dosis de agente espumógeno, como referencia se puede mencionar que para un Hormigón Celular de densidad final 1100 Kg/m^3 se requerirá de entre 0,5 a 0,8 litros de solución espumosa por metro cúbico.
- El diseño de la mezcla del relleno fluido es crítica pues usa pequeñas cantidades de cemento (3-7%), por lo general utiliza agregados más tradicionales que un Hormigón Celular, lleva mayor cantidad de arena u otro

tipo de agregado fino que un hormigón normal (72%), agua (17%) y utiliza, también, agregado grueso, pudiendo ser remplazado por espuma.

- La relación cemento-arena, en el caso del los rellenos fluidos, puede usarse para manejar de alguna manera la densidad, pero difícilmente se puede lograr densidades inferiores a 1700 Kg/m^3 .
- Una mezcla típica de Hormigón Celular tiene una relación cemento-arena de 1:1 a 1:3, a más alta proporción de arena mayor densidad final del producto, si, se reduce la cantidad de arena también se reduce la densidad hasta que en Hormigones Celulares con densidad menor a 600 Kg/m^3 , puede ser eliminada, por completo.
- La variación de la dosificación de la solución espumosa, en los Hormigones Celulares, recomendada por los fabricantes, relativamente no incide en el desempeño de la espuma, pero si la densidad es reducida al incrementar la cantidad de espuma, en el mortero difícilmente se lograra aumentar la densidad de la mezcla.



Fuente: www.zeladafischer.com.py

Figura 3.13. Composición del Hormigón Celular

Contrario a los hormigones tradicionales, el Hormigón Celular se caracteriza principalmente por su reducido peso específico y su elevada capacidad de aislación térmica y acústica. Siguiendo las diferentes dosificaciones para su preparación, es posible variar el peso específico entre límites muy amplios, obteniéndose una gran diversidad de productos. Si bien, el ACI específicamente se refiere a la densidad seca que alcanza el Hormigón Celular, 800 Kg/m^3 , este valor define mejor a los materiales producidos bajo el sistema Hebel (AAC Hormigón Celular curado con autoclave). Los fabricantes de agentes espumógenos sugieren que Hormigones Celulares son todos aquellos productos que alcancen densidades comprendidas entre el rango de 300 a 1800 Kg/m^3 , siempre y cuando sean elaborados de acuerdo a los procedimientos en los cuales se utilice; cemento portland, agregado fino y espuma.

Debido a su composición y al uso de materiales alternativos, es un producto que tiene características diferentes a los hormigones convencionales, propiedades que resultan ser muy útiles en los procesos constructivos actuales.

- *Liviano.* Es liviano por su peso específico aparente (300 a 1800 Kg/m^3) que lo hace un material sumamente ligero, propiedad apreciada en la construcción. Cuando se trata de bloques para mampostería y elementos prefabricados, proporciona economía en el transporte, es posible elaborar piezas de mayor tamaño, se facilita la manipulación y se logra agilizar los procesos constructivos.
- *Aislante acústico.* Por ser un material sólido, bloques para mampostería, ofrece un gran aislamiento acústico, reduce en 41 decibelios el ruido exterior.

- *Resistente al fuego.* Al no poseer materiales combustibles, no se quema y no produce gases tóxicos. Ideal para utilizarlo en pantallas corta fuego.
- *Resistente a la humedad.* Debido a la presencia de celdas esféricas cerradas sin comunicación entre ellas, distribuidas uniformemente en su estructura, característica que determina una baja capilaridad y absorción de agua.
- *Absorción de agua.* Debido a su porosidad posee bajos niveles de absorción de agua, 50% del hormigón normal.
- *Absorción de energía.* Por la estructura celular, es un material que se comprime durante el impacto aumentando la resistencia del Hormigón Celular de tal manera que logra absorber la energía cinética involucrada.
- *Expansión.* El coeficiente de expansión lineal del Hormigón Celular esta en el orden que de un hormigón convencional, o sea 9×10^{-6} por grado centígrado. Este valor se hace importante cuando se usa Hormigón Celular en superficies considerablemente grandes como en losas o techos que están expuestas a variaciones de temperatura.
- *Poca contracción.* La mayor parte de la contracción ocurre durante los primeros 28 días. Si las condiciones de elaboración de hormigón celular se controlan bien, durante este tiempo, la contracción se puede mantener en alrededor del 0.1%.
- *Aislante Térmico.* El Hormigón Celular debido a la gran cantidad de cavidades de aire, tiene excelentes características de conducción y transmitancia térmica, lo que permite significativos ahorros en calefacción y refrigeración.

- *Sismo resistente.* Por ser un material liviano, reduce la carga en estructuras y cimentaciones, lo que unido a su resistencia, propicia un buen comportamiento a la acción sísmica.
- *Auto compactante.* Por su plasticidad escurre en todas direcciones, llenando fácilmente todos los vacíos, sin necesidad de vibración o compactación.
- *Auto nivelante.* Debido a su fluidez penetra rápidamente hasta en los lugares menos accesibles, tendiendo siempre a nivelarse por si mismo.
- *Fácil de trabajar.* La consistencia líquido-pastosa permite ser bombeado tanto verticalmente como horizontalmente y ser manipulado con facilidad a distancias considerables.
- *Ecológico.* Utiliza materiales abundantes en la naturaleza, no incluye sustancias nocivas, involucra bajo consumo de energía y es susceptible al reciclaje por si mismo o por sus residuos.



Fuente: www.cretefoamer.com/

Figura 3.14. El Hormigón Celular es resistente al fuego

3.3.4. Efectos en las propiedades del hormigón celular

- *Resistencia.* Con niveles altos de aire involucrados, son sistemas de resistencia normalmente bajos, típicamente entre 0,5 MPa. a 8 MPa, aunque se pueden alcanzar resistencias más altas. La relación agua-cemento tiene un efecto relativamente pequeño en la resistencia no así otros factores como la cantidad y el tamaño de las partículas de arena cuando se trata de densidades por debajo de 1000 Kg/m³. Si al momento del ensayo de compresión se satura con agua al hormigón, los bajos resultados son debidos a las presiones hidráulicas, representada como deformación por acción de una carga.
- *Trabajabilidad.* El aire tiene un gran poder plastificante proporcionando a la mezcla de alta trabajabilidad con asentamientos que van desde 150 mm hasta el colapso, complicado conseguir asentamientos más pequeños. La fluidez del material puede ser mantenida mientras la mezcladora esta funcionando, difícil restaurar la fluidez si la mezcladora se ha detenido por algunos minutos.
- *Material fresco.* El alto contenido de aire elimina cualquier tendencia al sangrado. Puede ser bombeado a distancias considerables tanto vertical como horizontalmente, pero es necesario tener cuidado con la altura de caída de vertido al final de la tubería ya que la turbulencia provocada por alturas sobre 1,50 metros, pueden destruir la estructura de las burbujas de aire, si, el Hormigón Celular es vertido sobre un suelo conformado de arena o ripio, la estructura celular puede llegar a debilitarse y puede ocurrir segregación, destrucción y colapso de las burbujas llevando a la pérdida de volumen, llegando a formar un producto de mala calidad con muy poca resistencia.

- *Material endurecido.* Aunque el Hormigón Celular es una buena alternativa, como aislante térmico y contra el fuego, siempre será recomendable comparar costos, al menos que represente la única alternativa, como en lugares inaccesibles. Entonces, por su habilidad como material de relleno, que al endurecerse adquiere propiedades especiales de resistencia y densidad, se lo utiliza cada vez con más frecuencia en rellenos.

Las superficies expuestas del Hormigón Celular, tienden a presentar pequeños encogimientos en forma de micro fisuras. La resistencia a la abrasión no es alta, sobre todo, en Hormigones Celulares de baja densidad, por lo tanto, siempre será necesario, la colocación de una capa de cobertura de otro material más resistente.



Fuente: www.cretefoamer.com/

Figura 3.14. Hormigón Celular flotando en agua

3.3.5. Aplicaciones

Está claro que la resistencia de un material está en relación directa con su densidad, por lo regular, los Hormigones Celulares tienen densidades comprendidas entre 300 y 1800 Kg/m³ y son una alternativa que permiten ahorrar tiempo y trabajo.

- *Densidades de 300 – 600 Kg/m³*. Elaborado solo con cemento y espuma. Se utiliza en azoteas y pisos como aislante térmico y acústico sobre superficies rígidas (no es un material estructural); como subbase en canchas deportivas (tenis); subbase para pavimentos rígidos; protección contra el fuego en estructuras metálicas; en rellenos donde se requiera propiedades elevadas de asilamiento; es práctico para rellenar espacios vacíos dejados entre hileras de mampostería. Cuando se trata de recubrimientos se aplica en capas con espesor mínimo de 40 mm.
- *Densidades de 600-900 Kg/m³*. Elaborado con cemento, arena y espuma. Se emplea para la fabricación de bloques y paneles prefabricados para paredes de revestimiento o divisorias; losas para cielos falso, capas de aislamiento térmico y acústico en edificios residenciales y comerciales de varios pisos; subbase para pavimentos establos, galpones y pavimentos industriales; losas para choques y para divisiones internas; losas para techados; paneles de hormigón celular; en estas densidades también es ideal para aplicaciones de hormigón en masa.
- *Densidades de 900-1200 Kg/m³*. Elaborado con cemento, arena y espuma. Se utiliza en bloques y paneles de hormigón para exteriores de edificios, también en paredes divisorias y en losas de Hormigón Celular para techos y

pisos; como bases y subbase para pavimentos elásticos (madera, alfombra, linóleo).

- *Densidades de 1200-1600 Kg/m³*. Elaborado con cemento, arena y espuma. Este material se utiliza en paneles prefabricados de cualquier dimensión para uso comercial e industrial. Para el colado en obra de paredes y elementos ornamentales.
- *Densidad de 1600-1800 Kg/m³*. Elaborado con cemento, arena y espuma. Estos Hormigones Celulares resultan ideales para rellenos de todo tipo de zanjas de servicio, siendo ventajoso frente a los rellenos tradicionales con materiales granulares. El hormigón fluye por debajo y al rededor de las conducciones, inclusive en áreas de difícil acceso donde entrar resultaría tarea casi imposible, proporcionando un soporte uniforme, evitando que se formen vacíos.

Al ser un material auto-nivelante, evita el peligro de dañar las conducciones durante el proceso de compactado con maquinaria, se puede ajustar la resistencia a la compresión a valores menores a 1.00 MPa, con lo que resulta fácil de re-excavar para futuras reparaciones y mantenimiento. Por su fluidez, permite ser colocado o bombeado con un mínimo esfuerzo, incluso a distancias considerables. Su relativo bajo costo, permite ser usado en ingeniería geotécnica; para pilares de puentes, excavaciones y muros de contención, en rellenos estructurales de cimientos, base para losas en el suelo, subbase y base en reemplazo de agregados pétreos tanto para pavimentos rígidos como pavimentos flexibles, además para rellenar espacios vacíos debajo de cimientos y pavimentos.

Es un material que se compacta solo, y además no requiere vibración o golpe, por lo tanto, no genera fuerzas laterales que puedan afectar a estructuras adyacentes, demanda una menor consolidación de la subrasante y alcanza un equilibrio estable con las presiones circundantes. Endurece como un material fuerte y resistente, de acuerdo a la densidad de diseño, con un asentamiento mínimo, presentando mejor comportamiento y superando las propiedades de la base y subbase convencionales.

Utilizado en suelos expansivos, el Hormigón Celular, ha demostrado tener un desempeño óptimo al formar una barrera impermeable que impide el paso del exceso de agua hacia el suelo de la subrasante, en suelos susceptibles al congelamiento, permite que el deshielo de las capas superiores drene con facilidad previniendo la saturación del suelo e impidiendo, de esta manera, que los finos de la subrasante migren hacia la superficie. El Hormigón Celular usado conjuntamente con mallas y geotextiles mejora sustancialmente las condiciones constructivas, proporcionando a vías y carreteras de estabilidad, comodidad y durabilidad en el tiempo. Pero, la aplicación que más interesa, objeto del presente estudio, es sin duda, la utilización del Hormigón Celular en reemplazo de la base y subbase tradicionales formadas con materiales pétreos compactados.

Cuando se lo usa como alternativa a la base y subbase convencionales, se lo vierte directamente entre los bordillos previamente elaborados. Una típica aplicación es elevar el nivel de la vía utilizando el Hormigón Celular, se vierte el líquido pastoso directamente sobre el suelo marginal existente, sin la necesidad de contar con una superficie completamente nivelada. Elimina el requerimiento por sobrecarga del

suelo ya que su peso es de entre el 20%-25% más ligero que el mismo suelo o de un hormigón convencional. El espesor de la capa del Hormigón Celular depende de la resistencia a la compresión del material, para un rango de resistencias a la compresión de entre 3,0 y 9.0 MPa, los coeficientes estructurales (medida de la capacidad, como un componente estructural de un pavimento flexible) pueden oscilar entre 0,16 y 0,28 superiores a los de la base y subbase convencional y semejante a los suelos tratados con cemento.

Por su resistencia, tres veces mayor que una base y subbase convencional, se puede obtener vías con gran capacidad de carga. Por su naturaleza liviana y en densidades inferiores a 1000 Kg/cm^3 tiene la capacidad de flotar, proporcionando una base estable que no se hunde en el fango, por esta razón, el Hormigón Celular es una excelente solución cuando se trata de suelos fangosos y pantanosos, denominándolo entonces, “*hormigón flotante*”.



Fuente: /www.foamedconcrete.co.uk/gallery_Roads.php

Figura 3.16. Hormigón Celular sobre suelo pantanoso

En cada reciente investigación de este novedoso material tan versátil, se encuentran nuevas aplicaciones, actualmente se desarrollan Hormigones Celulares estructurales de gran desempeño de manera contar con edificaciones más livianas, de mayor altura, con menor peso muerto, menos robustas, que requieran de menor consumo de materiales y utilizando menos mano de obra, para lograr ahorros significativos, tanto en elementos estructurales como en cimentaciones.

El Hormigón Celular, también, ha incursionado en el arte reemplazando con éxito a la piedra natural, utilizada en obras escultóricas terminadas por vaciado en moldes o talladas directamente sobre ellas. En la arquitectura y decoración, mediante la fabricación de muebles para exteriores, moldeados de elementos decorativos livianos, que mejoran los acabados en las edificaciones.



Fuente: www.artelista.com

Figura 3.17. Escultura



Fuente: www.litebuild.com

Figura 3.18. Elementos decorativos

CAPÍTULO 4

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES

4.1. INTRODUCCIÓN

El uso de Hormigón Celular en industria de la construcción, es relativamente reciente, debido a su composición y por tratarse de un material sumamente versátil, se lo viene utilizando cada vez con más frecuencia para diferentes aplicaciones en obras de ingeniería civil, tales como; rellenos estructurales, donde el Hormigón Celular es capaz de remplazar a suelos que necesitan ser compactados; se lo utiliza con éxito para divisiones de tabiquería en casas y edificios en forma de bloques o como paneles prefabricado; en losas alivianadas de entrepiso, para techos planos e inclinados, proporcionando aislamiento frente a las inclemencias del clima; en elementos ornamentales, para la decoración de edificios.

En la actualidad, también, se lo utiliza como sustituto de la base y subbase conformadas con materiales granulares convencionales en carreteras y vías urbanas.

En ingeniería geotécnica, se lo utiliza para estribos y aproximaciones de puentes, muros de contención, cortes de carreteras y control de erosión de taludes; rellenos simples y estructurales; para protección de instalaciones con recubrimiento de ductos y conductos; así también, como base para losas de piso y base para pavimentos; en cimientos para ductos y en acciones de pilotaje; en carreteras tiene gran aceptación al ser usado como barreras contra el ruido y como barreras divisorias para vías rápidas, debido a su gran poder de absorción de impactos.

En la aeronáutica, se lo está empleado para construir barreras contra el ruido, producido por los motores, y como zona de seguridad en las cabeceras de las pistas de aterrizaje, de forma de controlar a los aviones en emergencia, minimizando los efectos de una mala aproximación, o maniobra de las aeronaves. Como se observa en la Figura 4.1, por efecto de su baja densidad, el Hormigón Celular, cede ante el peso del avión, provocando que este se detenga.



Fuente: www.cretefoamer.com/:

Figura 4.1. Avión detenido en zona de seguridad

Como se ha repetido en varias ocasiones, a lo largo del presente estudio, la utilización de Hormigón Celular con Espuma Preformada, en sustitución de la base y subbase hechas con materiales pétreos convencionales, representa una opción altamente efectiva, que mejora las condiciones de inestabilidad de los suelos, y es muy útil al momento de remplazar a suelos inapropiados e incapaces de soportar las cargas generadas por el tráfico vehicular.

Por su gran capacidad de absorber energía, debido a la densidad de su estructura celular, es un material que se comprime durante un golpe, aumentando su resistencia de forma que, le permite absorber la energía cinética causada por una colisión. Esta capacidad de absorber la energía cinética se aprovecha utilizándolo; en carreteras como, barreras contra choques; en polígonos de tiro, para detener los impactos de los proyectiles. Otra aplicación, bastante novedosa, es su utilización en facilidades atómicas, lugares con niveles altos radioactividad, donde se lo usa para protegerse de las explosiones, una vez más, por su gran capacidad de absorción de impactos.



Fuente: www.cretefoamer.com/

Figura 4.2. Barrera para choques en carretera

4.2. COMPONENTES DE LA MEZCLA

La selección de los materiales para el diseño de la mezcla, es determinante al momento de obtener Hormigón Celular adecuado. En el transcurso del tiempo, los fabricantes de agentes espumógenos han formulado un sin número de diseños, con el propósito de conseguir materiales con diferentes densidades y propiedades, para poder satisfacer a los requerimientos, específicos de cada proyecto. De todas maneras, y cualquiera sea su formulación, intervienen en la composición de la mezcla; un cementante o ligante hidráulico, se trata de un aglomerante que mantiene unido todos los componentes; agregado fino, forma el esqueleto de la mezcla; espuma pre elaborada, forma las cavidades y células de aire que actúan en lugar del agregado grueso; y, agua, para iniciar la reacción con los químicos del cemento, en ciertas ocasiones se usa aditivos especiales con el objeto de acelerar el fraguado o disminuir la cantidad de agua de mezcla. Es imperativo que todos los materiales involucrados en la elaboración de Hormigón Celular, posean y aporten con determinadas cualidades para que en conjunto con la maquinaria adecuada, proporcionen una mezcla homogénea, de consistencia, pastosa (muy plástica), que garantice la densidad y las resistencias del producto final.

En casos específicos, se puede prescindir del agregado fino y solamente utilizar pasta de cemento y espuma preformada, en la elaboración de la mezcla, esto ocurre generalmente, cuando la densidad es menor a 600 Kg/m^3 , de todas maneras, siempre será recomendable el uso de una porción de arena con la finalidad de evitar la formación de grumos, al momento de añadir agua sobre el cemento.

Los cementantes utilizados para la elaboración cualquier hormigón, normalmente son hidráulicos, es decir que fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, incluso cuando está sumergido en ella. Esta característica lo diferencia de los cementantes aéreos, que como la palabra lo indica, solo fraguan y endurecen al contacto con el aire. Se pueden mencionar cementantes hidráulicos tales como las cales, cementos, algunas escorias (residuos de los altos hornos), ciertos materiales, con propiedades puzolánicas, que de acuerdo con sus características, son usados en forma individual o combinados entre sí, cuando se trata de la producción de hormigón para la construcción, quedan excluidas de este grupo, las cales hidráulicas.

El ligante hidráulico más usado, en la preparación de hormigón, es sin duda el cemento portland, denominado así por su semejanza en color a la piedra caliza que se obtiene en la isla de Portland, Gran Bretaña. Este tipo de cemento, como se dijo anteriormente, es una mezcla de arcilla, caliza quemada, hierro, sílice y óxido de aluminio, las proporciones relativas de estos elementos químicos, que intervienen en su composición, las reacciones químicas álcali-cemento, que pueden provocar expansiones peligrosas, y, por supuesto, el calor de hidratación, son determinantes en los diversos pasos de la elaboración de Hormigones Celulares.

En el proceso de mezcla del cemento con agua, más conocido como hidratación del cemento, se produce una reacción de carácter exotérmica, provocando un gran desprendimiento de calor, si, este calor generado en interior de la masa de hormigón no se disipa con la misma rapidez con que se produce, queda un remanente, que al acumularse incrementa la temperatura de la mezcla y expande la masa, que al

enfriarse sufre una contracción, normalmente restringida, generando esfuerzos de tensión, capaces producir grietas de considerable magnitud.

Si el control del calor de hidratación es determinante cuando se elabora hormigón convencional, es más importante aún, cuando se trata de Hormigón Celular, ya que, al modificar la temperatura de la mezcla cambiará el volumen de las brújulas, introducidas por la medio de la espuma, provocando la destrucción de las cavidades y por consiguiente un colapso de la estructura celular, que al final repercutirá en la obtención de un producto de características diferentes a las planificadas.

En la mayoría de obras de ingeniería civil, se utiliza cemento portland Tipo I conforme a la norma ASTM C 150, en el caso específico del presente trabajo, se usará cemento portland puzolánico Tipo IP, fabricado por la compañía Lafarge y comercializado con el nombre de Selvalegre. Se ha escogido el cemento portland puzolánico Tipo IP Selvalegre, porque, además de las características propias de los cementos portland convencionales, posee otras que le confiere la puzolana añadida; molienda más fina y fraguado más rápido, parámetros que colaboran en la preparación, y, sobre todo, mejoran la calidad de Hormigón Celular.

Como se sabe el agregado fino que conforma una mezcla, es un árido natural o producido artificialmente por trituración de piedras, la arena, producto natural resultante de la desintegración de las rocas, es el material de uso más frecuente, y está constituida por granos de cuarzo, sílice u otro tipo de elemento durable,

anguloso; libre de, terrones de arcilla, recubrimientos perjudiciales, materia orgánica y otras sustancias extrañas.

En el hormigón, los agregados conforman el esqueleto o relleno para la pasta de cemento, reduciendo, de esta manera, su contenido por metro cúbico, proporcionan una masa de partículas capaces de resistir las acciones mecánicas de desgaste, que podrían actuar sobre el hormigón, además, reduce los cambios de volumen de la pasta durante los procesos de fraguado y endurecimiento. El agregado fino que se utiliza en la elaboración de Hormigón Celular, según la guía del ACI 523.3R, debe estar de acuerdo con las normas ASTM C 33, C 144, C 332 o C 330, sin embargo en la práctica, las empresas fabricantes de agentes espumógenos, tienen sus propias recomendaciones para la preparación de Hormigones Celulares de mejor calidad y desempeño. En muchos casos, la granulometría de estos agregados no corresponde a los límites fijados por las normas ASTM mencionadas. En la elaboración de Hormigón Celular con adición de aluminio en polvo, *Sistema Hebel*, proceso en el cual se utiliza autoclave para el curado, por ejemplo, se utiliza agregado muy fino, arena o cenizas volantes, para que lleguen a combinarse perfectamente con los finos de cemento y los finos del polvo de aluminio.

Cuando se trata de Hormigón Celular a base de inyección de espuma, se puede ser más flexible, a parte del uso de agregado fino, se permite el uso de arena de finura media a gruesa, sin embargo, se han obtenido resultados satisfactorios cuanto el tamaño máximo de los granos ha sido de 2 milímetros y que entre el 60-95% pase el tamiz N° 30 (600µm.), de todas formas, es necesario un análisis y una comparación

de un agregado fino usado para la elaboración de un hormigón convencional, con materiales que tengan partículas no mayores a 2 mm. En el presente estudio se utilizará agregado convencional, arena natural, proveniente de la mina San Antonio de Pichincha, el material, que proviene de esta mina, posee características apropiadas para la construcción, y en general, para cualquier proyecto de ingeniería civil, y es de uso habitual, representado la fuente de abastecimiento más cercana a la ciudad de Quito. Se realizarán dos ensayos; uno con arena fina de la mina San Antonio, previamente tamizada, de forma obtener partículas de hasta un máximo de 2mm de diámetro, y se la denominará *muestra modificada San Antonio*; otro con arena natural sin tamizar, proveniente del río Blanco, en la zona de la ciudad de Quinindé, se la denominará *muestra Río Blanco*.

En la preparación de la solución espumosa, se utilizará como base un tensoactivo sintético, químico que disminuye la tensión superficial de la solución generando mayor cantidad de espuma, producto importado, pero de fácil obtención en el mercado local debido que se lo utiliza comúnmente en la fabricación de detergentes. La intención es desarrollar una fórmula, usando aditivos que al combinarlos con el tensoactivo, garanticen la estabilidad y durabilidad de la espuma, por cuanto en el mercado nacional no se encuentra agentes espumógenos disponibles.

El agua, componente básico para la hidratación del cemento y posterior desarrollo de sus propiedades, debe cumplir con ciertos requisitos para una buena combinación y reacción química con el cemento, tanto en el proceso de mezcla como en el de curado. Se utilizará la de uso corriente proporcionada por la Empresa Municipal de

Agua Potable, de forma de garantizar la pureza y cumplir con las normas internacionales y nacionales.

Los equipos utilizados son de uso convencional dentro de la construcción, esto es, una hormigonera vertical de un saco y sus accesorios, como equipo complementario se necesitará balanzas apropiadas y debidamente calibradas debido a que la dosificación del Hormigón Celular se realiza en peso y no en volumen como en un hormigón convencional. Para la preparación e inyectado de espuma en el interior de la mezcla, se diseñará un generador de espuma, el mercado local no dispone de esta clase de herramientas, el equipo, se lo manufacturará localmente en base a información obtenida de varios fabricantes extranjeros de este tipo de maquinaria. Adicionalmente es necesario un compresor para la producción de aire, esencial para la obtención de la espuma en el generador y su posterior inyección en la mezcla.

En lo referente a los ensayos de laboratorio se seguirá las recomendaciones de la norma ASTM C 796 para la determinación de las propiedades del Hormigón Celular endurecido, y serán necesarios:

- 6 cilindros de 150 x 300 mm para el ensayo de resistencia a la compresión.
- 12 cilindros de 150 x 300 mm para el ensayo de CBR a los 28 días. No previsto en la norma ASTM C 796.
- 3 cilindros de 150 x 300 mm para el ensayo absorción de agua a los 28 días, todo de acuerdo al método de prueba ASTM C 495.
- 6 cilindros de 150 x 300 mm para el ensayo de resistencia a la tensión de acuerdo con el método de prueba ASTM C 496 y C 496M.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

4.3.1. Cemento

Se conoce como portland Tipo I al cemento normal o común destinado a usos generales, se trata de un aglomerante hidráulico que se obtiene de la molienda conjunta de clinker portland (formado al calcinar silicato tricálcico y dicálcico), aluminato tricálcico, ferritoaluminato tetracálcico (presentes en calizas y arcillas), a una temperatura de entre 1400° C a 1600° C. Debido a la presencia de aluminato tricálcico el clinker tiende a fraguar rápidamente, para evitar que se produzca este fenómeno se añade yeso crudo en proporciones del 3%, luego se muele finamente la mezcla, el aditivo (yeso) reacciona con el aluminato produciendo etringita (un regulador del tiempo del fraguado) que permite trabajar las mezclas de cemento sin preocuparse que se sequen rápidamente. El polvo fino obtenido por medio de este proceso de molienda, es el cemento ya listo para ser usado.

El cemento portland Tipo I se lo utiliza en todo tipo de construcciones, también en las obras de gran envergadura siempre que no requieran de condiciones especiales, tal el caso de las represas. Tiene la característica de desarrollar resistencias iniciales rápidamente, lo que permite acortar el tiempo en el desencofrado.

El cemento portland puzolánico Tipo IP es un producto obtenido de la pulverización fina y simultánea de clinker portland, yeso crudo y puzolanas naturales o artificiales (alcanza proporciones en el rango del 15% al 40%), adición de la puzolana, puede efectuarse, también, directamente antes de ensacar o en la mezcladora. Las puzolanas

son cenizas volcánicas compuestas principalmente por óxidos de silicio o por óxido de silicio y alúmina, de color rojizo, por la concentración de hierro, por sí solas poseen poco o ningún valor cementante, pero finamente molidas y en presencia de humedad a temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio para formar compuestos que poseen propiedades cementicias.

Composición química (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.F.*	Cl
19,45	5,33	3,24	63,86	1,97	3,20	0,15	0,85	1,95	0,00

Composición mineralógica (%)				
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Na ₂ (equivalente)
62,60	8,52	8,65	9,87	0,71

Propiedades físicas			
Superficie específica Blaine (cm ² /gr)	Gravedad específica (kg/m ³)	Tiempo de fraguado inicial (min)	Tiempo de fraguado final (min)
3.340	3.150	145	195

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1. Composición química, mineralógica y propiedades físicas del cemento

Si bien el cemento portland puzolánico Tipo I, desarrolla las mismas cualidades y resistencias iniciales, que el cemento portland normal, requiere de mayor cantidad de agua en la mezcla y presenta más retracción durante la hidratación, ofreciendo más comodidad para el vertido en los encofrados, ya que por lo general, son más plásticos, además, poseen características especiales que lo hacen ideal para ser empleado en lugares y zonas donde se sospecha pueda existir niveles freáticos altos o presencia de humedad. Entre sus propiedades más importantes tenemos; resistencia mecánica media, bajo calor de hidratación, menor retracción y fraguado más lento.

Para que un cemento sea apto y se pueda utilizar en obras de ingeniería civil, debe poseer determinadas cualidades, de manera particular, cumplir con los requisitos de calidad y las recomendaciones contenidas en las normas internacionales ASTM o cualquier otra norma local. Entre las características físicas de un cemento se encuentran:

- *Finura.* Debido al tamaño extremadamente pequeño (partículas de entre 7 y 60 micras), las partículas de cemento más finas no pueden clasificarse en fracciones de distintos tamaños por medio de tamices, se ha experimentado métodos como el del turbidímetro y su medida se conoce como superficie específica. Está es el área total en centímetros cuadrados de superficie de la superficie de todas las partículas, supuestamente esféricas, de un gramo de cemento. La finura del cemento es un factor que, junto con la composición química, tiene influencia definitiva sobre la mayor parte de las propiedades del cemento. Al aumentar la finura del cemento, también aumenta la resistencia, particularmente las resistencias a corta edad, incrementa la velocidad de hidratación del cemento, produce mayor resistencia inicial y más rápida generación de calor; decrece el sangrado y otros tipos de segregación; decrece la expansión en autoclave, aumenta la facilidad de manejo y la cohesión del hormigón mejorando su impermeabilidad. Se debe comprobar la finura del cemento en función de su permeabilidad al aire por medio del aparato de Blaine, conforme al método de prueba ASTM C 204.
- *Sanidad.* La sanidad de un cemento se define como su aptitud para mantener un volumen prácticamente constante después del fraguado. La falta de sanidad en el cemento generalmente se origina por exceso de óxido de calcio

libre (cal), excesivo contenido de magnesio y de sulfatos. La causa más frecuente del exceso de cal libre proviene de una calcinación inadecuada en los hornos. Los efectos de un cemento sin sanidad, se manifiestan en una expansión lenta a través del tiempo y sus efectos pueden tardar meses y aun años en ser evidentes. En casos extremos pueden llegar a provocar la desintegración de la masa endurecida. Este fenómeno ocurre, generalmente, en morteros y hormigones pero su acción más notoria es en las pastas de cemento, por ello los ensayos de laboratorio para calificar la sanidad se los realiza sobre muestras de pasta de cemento. Hay que determinar la sanidad del cemento por medio de la prueba de expansión en autoclave realizada en la pasta de cemento de acuerdo al método de prueba ASTM C 151.

- *Tiempo de fraguado.* Al agregar agua suficiente al cemento, se forma una pasta de consistencia plástica de fácilmente moldeable, la cual va haciéndose cada vez menos plástica, hasta llegar propiamente al estado sólido. Este paso del estado plástico al estado sólido es lo que conocemos como fraguado del cemento, debemos notar que durante este proceso el cemento no adquiere prácticamente resistencia mecánica, debido a que las propiedades del hormigón endurecido dependen en gran parte de un buen vertido y consolidación del hormigón en estado plástico, las características del fraguado del cemento son de primordial importancia, se determina el tiempo de fraguado sobre la pasta de cemento por medio de las agujas de Gillmore, según método de prueba ASTM C 266.
- *Resistencia a la compresión.* La prueba de resistencia a la compresión juega un papel importante en la determinación de la calidad de cemento, y cada

especificación requiere una cierta resistencia mínima que deberá alcanzarse bajo ciertas condiciones. La resistencia desarrollada por un cemento depende de muchos factores tales como la granulometría de la arena, la proporción de agua usada, el grado de mezclado, la temperatura y humedad de la atmósfera bajo la cual se produce la prueba, el método de colocación del material en los moldes, el tipo de espécimen hecho, las condiciones del curado, el método de prueba y la edad a la cual se efectúa la prueba. La resistencia a la compresión, puede ser determinada sobre cubos de mortero 50.80 mm de lado, y el mortero debe estar preparado de acuerdo al método de prueba ASTM C 109.

- *Fraguado falso prematuro.* En algunas ocasiones el cemento al entrar en contacto con el agua, endurece inmediatamente, mucho antes del tiempo normal del fraguado, este endurecimiento se lo conoce como fraguado falso prematuro, no es un fraguado, si no un endurecimiento anormal que se produce por la deshidratación del yeso bajo elevadas temperaturas. Cuando el cemento entra en contacto con el agua, este yeso deshidratado tiende a tomar el agua que ha perdido, formándose inmediatamente una red de cristales en la masa del cemento que originan este endurecimiento. El fraguado falso es perjudicial porque le resta al hormigón facilidad de manejo, disminuye su revenimiento, dificulta la descarga de las mezcladoras, la operación de vertido y compactación en los encofrados. El fraguado falso puede ser eliminado dejando reposar la mezcladora durante 4 o 5 minutos después del tiempo de mezclado normal, y mezclando nuevamente durante otros 2 o 3 minutos. Para determinar el fraguado falso prematuro se lo hace

sobre mortero preparado con arena silíceica graduada de acuerdo con el método de prueba ASTM C 359.

- *Requerimiento de agua.* El empleo de puzolanas se justifica porque puede mejorar algunas propiedades del cemento y al mismo tiempo reducir el costo del hormigón. Al añadir puzolanas de calidad satisfactoria en proporciones adecuadas con el cemento portland, pueden producir los siguientes efectos:
 - a) Mejora la facilidad del manejo.
 - b) Reduce la generación de calor.
 - c) Aumenta la impermeabilidad.
 - d) Mejora la resistencia a los sulfatos.
 - e) Reduce la reacción álcali-agregados.
 - f) Reduce la segregación y sangrado.

- *Calor de hidratación.* El calor de hidratación del cemento es un concepto importante debido a la elevada temperatura que se produce la masa de hormigón. En grandes masas de hormigón aumenta la generación de calor, disminuye su disipación por radiación y el concepto puede entonces alcanzar grandes temperaturas. La elevación de temperatura a menudo es suficientemente grande para causar serios agrietamientos de la estructura por causa de la contracción térmica cuando el enfriamiento eventual a la temperatura circundante tiene lugar. La determinación del calor de hidratación se lo hace en función del calor de solución del cemento seco y el calor de solución del mismo cemento parcialmente hidratado durante 7 y 28 días, la diferencia entre estos dos valores es el calor de hidratación. Esta determinación debe estar conforma con el método de prueba ASTM C 186.

Como ya se mencionó, en el presente estudio, está previsto la utilización de cemento hidráulico portland puzolánico Tipo IP, que pertenece a los cementos compuestos de acuerdo con la norma nacional NTE INEN 490 y las normas internacionales ASTM C-150 y ASTM C-595, según lo establecido por el fabricante.

El cemento portland puzolánico Tipo IP Selvagre fabricado por Lafarge, tiene todas las características enumeradas para un cemento convencional, pero también posee otras que lo complementan y diferencian de un portland normal.

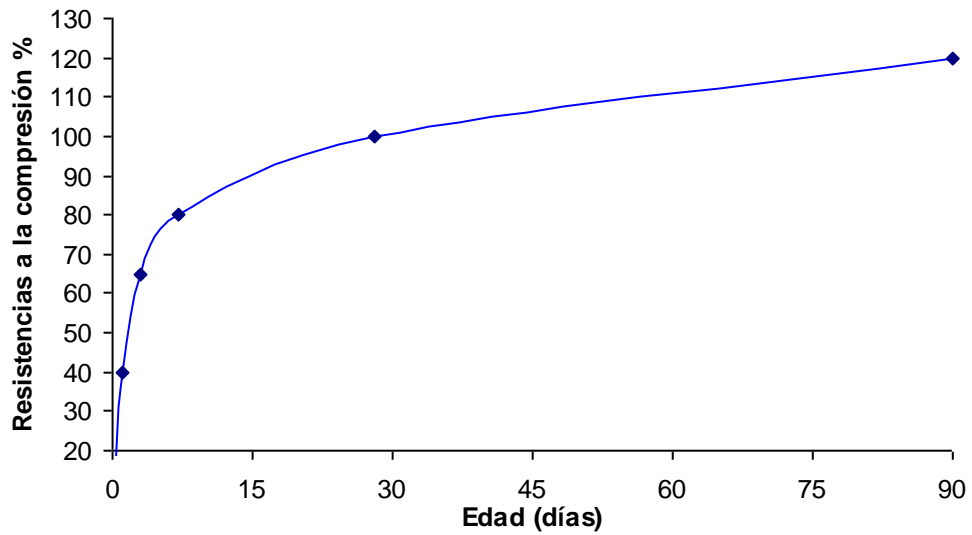
A. En el hormigón fresco:

- Mejor docilidad del hormigón al momento del vertido.
- Disminuye la exudación de las mezclas y la tendencia a la segregación.

B. En el hormigón endurecido:

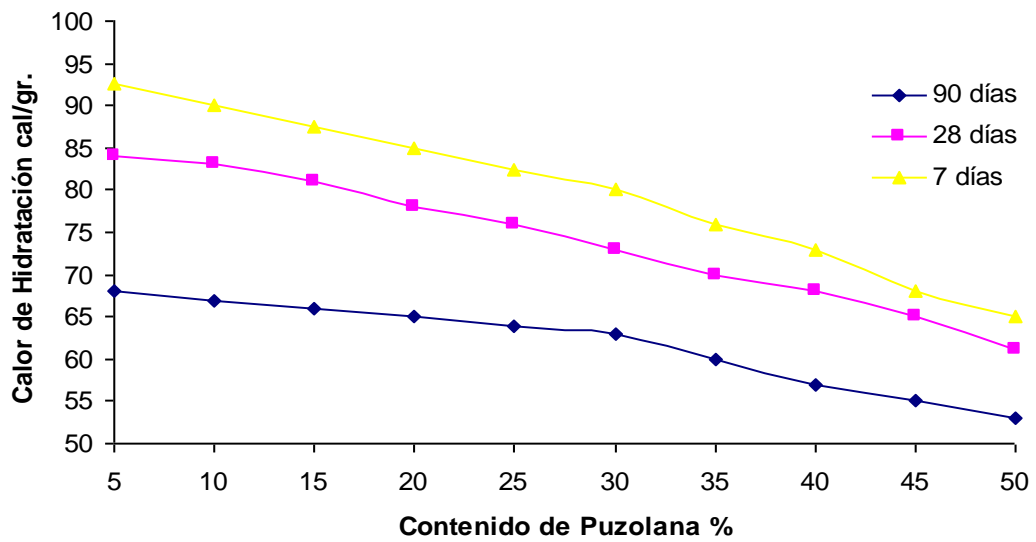
- *Resistencia.* Alcanza fácilmente las resistencias a la compresión, tiene un crecimiento progresivo de todas las resistencias aún después de los 28 días de edad, se acostumbra a tomar los 28 días de edad como especificación estructural. En el cemento Selvagre, a los 90 días se puede obtener hasta un 20% más de resistencia que a los 28 días.
- *Calor de Hidratación.* Desprende menor calor de hidratación lo que reduce la contracción térmica. La reacción química del cemento con el agua produce calor el mismo que es peligroso cuando se trabaja con grandes masas de hormigón, el cemento Selvagre, desprende menos calor de hidratación reduciendo los riesgos.

- *Resistencia a los sulfatos.* En el Ecuador la presencia de sulfatos es muy común en toda su geografía, el cemento Selvalegre tiene la propiedad de contrarrestar la acción de estos agentes.
- *Resistencia a los agentes agresivos.* Por su mayor compacidad los hormigones y morteros fabricados con cemento Selvalegre son menos permeables e impiden el ingreso de agentes agresivos como aguas salinas, suelos sulfatados, aguas servidas y en general todo desecho industrial.
- *Mayor durabilidad.* Por su característica de molienda más fina mejora la impermeabilidad favoreciendo la durabilidad del hormigón en el tiempo. Por su alta resistencia a los agentes agresivos y por su crecimiento de la resistencia a la compresión después de los 28 días, el cemento Selvalegre es mucho más durable que cualquier otro cemento portland.
- *Impermeabilidad.* La impermeabilidad es mejorada sobre todo en los hormigones pobres y en las mismas edades. Se recomienda su empleo en obras hidráulicas y marítimas.
- *Mejor resistencia al intemperismo.*
- *Retracción y fluencia.* Ambos fenómenos se ven acrecentados en el caso de los cementos puzolánicos.



Fuente: Cemento Selvaegre

Gráfico 4.1. Desarrollo de resistencias a la compresión cemento Selvaegre



Fuente: Cemento Selvaegre

Gráfico 4.2. Calor de hidratación del cemento Selvaegre

4.3.2. Agregado fino

4.3.2.1. Definición

Se define a los agregados como el conjunto de partículas inorgánicas de origen natural o artificial de forma cúbica o esférica razonablemente libre de partículas delgadas, planas y alargadas. Deben estar constituidos por fragmentos de roca limpios, duros, compactos y durables, cuyas dimensiones están dentro de los límites fijados en la norma internacional ASTM C 33.

Los agregados forman la fase discontinua del hormigón y son materiales que están embebidos en la pasta de cemento, ocupan aproximadamente el 35% del volumen de la mezcla, forman el esqueleto o relleno para la pasta de cemento que proporciona una masa capaz de resistir las acciones mecánicas de desgaste, reduce los cambios de volumen por efecto del fraguado de la pasta de cemento.

Los agregados fino y grueso deberán ser manejados como materiales independientes, los agregados finos, son la fracción proveniente de la desintegración de natural o artificial de las rocas que pasa el tamiz 3/8" (9,52 mm), y queda retenido en el tamiz N° 200 (0,075 mm).

En el hormigón, la falta de agregado fino se refleja en la aspereza de la mezcla y un exceso de arena demanda una mayor cantidad de agua, provocando la disminución de las resistencias tempranas y finales del hormigón, además, el agregado fino actúa como lubricante sobre el cual rueda el agregado grueso, dándole manejabilidad a la masa hormigón.

4.3.2.2. Especificaciones técnicas

Los agregado que van a utilizarse en las obras de ingeniería civil, deben satisfacer ciertas especificaciones técnicas que aseguren la buena calidad de las construcciones.

- Si van a estar expuestos a humedad prolongada, o en contacto con suelos húmedos, no deberán contener ningún material que sea potencialmente reactivo con los álcalis del cemento, a fin de evitar expansiones.
- Siempre que el agregado fino presenten algún tipo de contaminación en exceso; partículas muy finas que exigen agua en demasía, para la mezcla; partículas débiles o inestables, que actúan sobre la hidratación del cemento; presencia de materia orgánica, interrumpe parcial o totalmente el fraguado del hormigón, deben ser controlados mediante procesos de lavado.
- Durante el transporte es fundamental mantener la pérdida de finos en cifras mínimas, procurar mantener la uniformidad del material, no contaminarlo con sustancias extrañas, y no producir rotura o segregaciones de gran magnitud.
- Los agregados expuestos a la acción de los rayos solares, conviene ser enfriados antes de su utilización en la mezcladora. Si el enfriamiento se efectúa por aspersión de agua, se debe considerar la humedad añadida al material, a fin de corregir el contenido de agua de la mezcla y mantener la relación agua-cemento del diseño original.

4.3.2.3. Sustancias deletéreas

Se consideran como sustancias deletéreas en los agregados, todos aquellos materiales cuya presencia resulta en detrimento de cualquiera de las propiedades o características del hormigón. Las sustancias deletéreas que se encuentran con mayor frecuencia y sus límites máximos recomendados, son:

SUSTANCIA	NORMA	LÍMITE %
Material que pasa el tamiz N° 200	ASTM C 117	3 %
Materiales ligeros	ASTM C123	1 %
Grumos de arcilla	ASTM C 142	1 %
Total de otras sustancias dañinas (álcalis, micas, limos)		2 %
Pérdidas por desintegración	ASTM C88	10 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2. Porcentaje en peso de sustancias dañinas

4.3.2.4. Granulometría

El agregado fino, que constituye la mayor parte del porcentaje en peso del hormigón (usualmente supera el 60% del peso del hormigón fraguado y endurecido), es por generalmente arena, proveniente de la desintegración de rocas duras, pero también, se puede obtener de fuentes artificiales. Se considera arena, a todo aquel material en el que sus partículas pasan el tamiz de 3/8" (9,52 mm) y quedan retenidas en el tamiz N° 200 (0,075 mm).

La arena debe estar bien graduado entre los límites de fino y grueso para que pueda llenar todos los espacios, y producir mezclas más compactas, tener un módulo de

finura (ASTM C 125), que resulta de dividir por 100 la suma de los porcentajes acumulados retenidos en los tamices N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100, cuyo valor no debe ser mayor que 3,1 ni menor que 2,3 (para hormigones convencionales) para así evitar, la segregación del agregado grueso cuando el agregado es muy fino.

El índice de finura de un agregado significa, que mientras mayor sea el valor más grueso será el agregado. El módulo de finura del agregado fino es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos, en las mezclas de hormigón.

TAMIZ		PORCENTAJE EN PESO QUE PASA
ASTM	mm	
3/8"	9,52	100
4	4,75	95 - 100
8	2,36	85 - 100
16	1,18	50 - 85
30	600µm	25 - 60
50	300µm	10 - 30
100	150µm	2 - 10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3. Límites ASTM C 33 para agregado fino

Si bien las especificaciones permiten que el porcentaje que pasa el tamiz N° 50 este entre el 10% y el 30%; se recomienda el límite inferior cuando la colocación del hormigón es fácil o cuando los acabados se hacen mecánicamente y, cuando se trate de texturas superficiales tersas debe usarse un agregado fino, que cuando menos pase el 15% por el tamiz N° 50 y el 3% por el tamiz N° 100.

Un análisis cuantitativo del gráfico granulométrico nos ayuda a determinar los parámetros D_{10} , D_{30} , D_{60} .

D_{10} : Tamaño máximo de las partículas que constituye la porción 10% más fina del agregado. Recibe el nombre de diámetro efectivo.

D_{30} : Tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción 30% más fina del agregado. No tiene denominación especial

D_{60} : Tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción 60% más fina del agregado. No tiene denominación especial.

Es sencilla la determinación de estos valores; en el gráfico de la curva granulométrica de la muestra, se trazan abscisas por los porcentajes 10, 30 y 60 de material que pasa hasta interceptar la curva granulométrica. Estos puntos de intersección representan los diámetros correspondientes a D_{10} , D_{30} y D_{60} que nos servirán para la obtención de los coeficientes de uniformidad y curvatura que definen cuantitativamente la graduación de los materiales granulares.

Coficiente de uniformidad: es la razón por cociente entre D_{60} y D_{10} . No tiene valores límites.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Concepto desarrollado por Allen Hazen con el fin de clasificar arena para filtro rápido de acueductos. No tiene valores límites pero a medida que D_{60} se aleja más de

D_{10} , aumenta el coeficiente de uniformidad, lo que significa que mejora la graduación del material.

Si los valores D_{60} y D_{10} son muy semejantes tenemos un material mal graduado y gráficamente tiende a una línea vertical. C_u mide la mejor representación el tamaño de los granos. Con estas consideraciones podemos afirmar que una arena bien graduada tendrá un valor de:

$$C_u > 6$$

Coeficiente de curvatura: es la razón del cociente entre el cuadrado de D_{30} y el producto de D_{10} y D_{60}

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Este valor sirve para controlar la curvatura o rectitud del gráfico en un sector determinado. Se lo utiliza cuando entre los puntos de D_{60} y D_{10} del gráfico presenta sinuosidad.

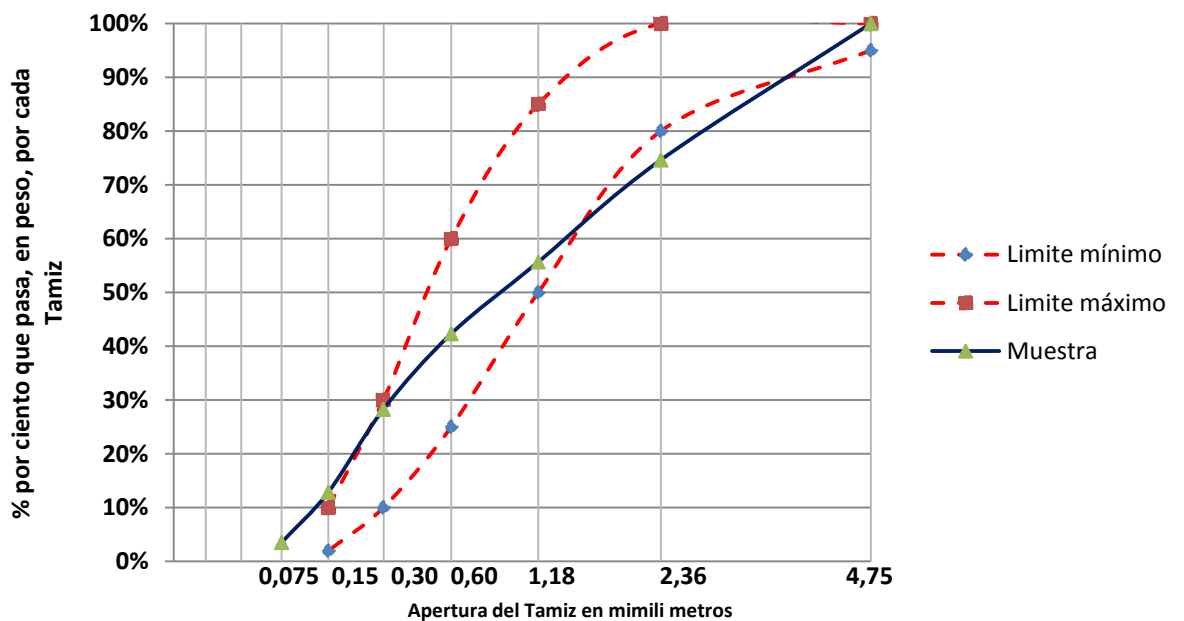
La experiencia indica que materiales bien graduados poseen un coeficiente de curvatura fluctuante entre 1 y 3.

4.3.3. Análisis de agregado fino convencional San Antonio

Tamiz		Retenido en gramos		Porcentaje en %	
ASTM	mm	Parcial	Acumulado	retenido	pasa
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,36	114,10	114,10	25,40	74,60
16	1,18	85,30	199,40	44,30	55,70
30	600µm	60,20	259,60	57,70	42,3
50	300µm	63,20	322,80	71,70	28,30
100	150µm	69,20	392,00	87,10	12,90
200	75µm	42,10	434,10	96,50	3,50
Fuente		15,90			
Suma			450,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4. Granulometría de una muestra convencional



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3. Curva granulométrica de muestra y límites ASTM C 33

Peso unitario suelto **1800 Kg/m³**

Peso unitario compacto **1932 Kg/m³**

Modulo de finura: $(0,00+25,40+44,30+57,70+71,70+87,10) = 286,20/100 = \mathbf{2,86}$

$$D_{10} = 0,125$$

$$C_u = D_{60}/D_{10} = \mathbf{9,544} > \mathbf{6} \quad \text{Arena bien graduada}$$

$$D_{60} = 1,193$$

Realizado el análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio podemos afirmar que el material convencional proveniente de la mina de San Antonio, es un agregado fino bien graduado y uniforme con valores comprendidos entre 0,075 y 4,75 milímetros, quedando casi la totalidad de las partículas retenidas en este rango.

En general se trata de una arena de buena calidad, andesítica de origen ígneo extrusivo de composición intermedia a básica, que se deposita en forma de piroclastos o flujos de lava durante las erupciones volcánicas. Posee una buena características física y química para funcionar como agregado del hormigón.

El material tiene granulometría continua apegada a los límites previstos en la norma ASTM C 33, con la salvedad que en el tramo entre las partículas de 1.50 mm y 3.50 mm existe desfase, pero los puntos que quedan fuera del intervalo, que ordena la norma, no quiere decir que el agregado no dé las resistencias deseadas y que su comportamiento sea diferente al esperado. La granulometría ideal solo existe en teoría, de alguna manera se la puede reproducir en el laboratorio, pero, difícilmente de repetir, en la práctica.

4.3.4. Agua para el amasado

El agua, elemento fundamental para la hidratación (interviene en una proporción de 0,2 a 0,22 Kg. de agua por kilo de cemento), curado y futuro desarrollo de las propiedades de la mezcla de hormigón convencional, debe cumplir con ciertos requisitos y determinadas normas de calidad, para que sea capaz de realizar una combinación química adecuada y satisfacer con las funciones de; hidratación del cemento, actuar como lubricante, que permita la trabajabilidad del hormigón, y dar la estructura necesaria de vacíos en la pasta para que los productos de hidratación tengan espacios para desarrollarse.

4.3.4.1. Límite de substancia

En realidad, no existen criterios uniformes en lo que refiere a los límites para las substancias ajenas, que pueden estar presentes en el agua destinada a la preparación del hormigón. Las normas pueden cambiar de país a país, también, tener variaciones de acuerdo con el tipo de cemento que se quiere mezclar.

Las impurezas y la cantidad de éstas ocasionan reacciones químicas con los componentes del cemento, produciendo efectos destructivos en el hormigón, tales como, el retardo en el endurecimiento, la reducción de resistencias, la eflorescencia, la contribución a la corrosión del refuerzo de hierro, los cambios volumétricos, entre otros. En general se establece que si el agua carece de gusto, olor o color particular y no es gaseosa o espumosa cuando se agita, es adecuado para el uso en la preparación de morteros y hormigón, de hecho, una gran parte de hormigones están elaborados con este tipo de agua, sin embargo, muchas aguas no aptas para beber, son

satisfactorias para el mezclado y, permiten alcanzar las resistencias exigidas por los proyectos, sin influir desfavorablemente en los procesos de endurecimiento y fraguado.

De todas maneras, el agua para el mezclado de hormigón, debe ser limpia y fresca en cuanto sea posible, debe estar libre de azúcares, efluentes cloacales, aceites, ácidos, sulfatos de magnesio, sodio y calcio (llamados álcalis blandos), sales, limo, materias orgánicas, arcillas, lodo, algas y cualquier otra sustancia dañina, algunas de estas impurezas, son naturales y otras provenientes de actividades industriales.

DESCRIPCIÓN		UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
Sólidos en suspensión		mg/dm ³		5.000
Materia orgánica expresada como oxígeno consumido		mg/dm ³		3
Carbonatos y bicarbonatos, alcalinos (alcalinidad total expresada en NaHCO ₃)		mg/dm ³		1.000
Sulfatos expresada como ion SO ₄		mg/dm ³		600
Cloruros expresada como ion CL	Para usar en hormigón simple	mg/dm ³		2000
	Para usar en hormigón convencional	mg/dm ³		700
	Para usar en hormigón pretensado	mg/dm ³		500
Hierro expresado en Fe		mg/dm ³		1
pH			5,5	8,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5. Límites de substancia norma ASTM C 94

4.3.4.2. Sedimentos o partículas en suspensión

Sedimentos y partículas en suspensión como; arcillas o partículas finas de roca, no afectan a la mezcla siempre y cuando no sobrepase las 2.000 ppm, valores más altos puede ser que no ocasionen variaciones en la resistencia, pero si en otras propiedades como; la contracción por secado, tiempo de fraguado, durabilidad y aparición de eflorescencias. Antes de utilizar aguas turbias o lodosas se las debe pasar por tanques de sedimentación, o utilizar otros métodos de clarificación para disminuir la cantidad de arcillas o sedimentos en suspensión.

Aceites como el petróleo y sus derivados, siempre y cuando no tenga mezclas de aceites vegetales o animales, causarán menos efecto sobre el desarrollo la resistencia, que los otros aceites, sin embargo, concentraciones superiores al 2,5% en peso de cemento, pueden reducir la resistencia en un 20%.

4.3.4.3. Materia orgánica

Las impurezas orgánicas, tienen efecto sobre el tiempo de fraguado del cemento, y sobre la resistencia última del hormigón, se las puede encontrar en aguas naturales, aguas muy coloridas, con un olor muy apreciable o con algas marrones o verdes, muchas veces visibles a simple vista. Las algas también pueden estar presentes en los áridos, reduciendo la adherencia entre los agregados y la pasta, siendo lo más recomendable, un contenido máximo de 1.000 ppm de algas, presentes en el agua de amasado.

Una pequeña cantidad de sacarosa, del 0,03 al 15% en peso de cemento, es suficiente como para retardar el fraguado del cemento, la resistencia a los 7 días puede disminuir, mientras que la resistencia a los 28 días puede aumentar. Cantidades iguales o mayores al 25% en peso de cemento, causa fraguado rápido y considerable reducción de la resistencia a los 28 días. Concentraciones inferiores a 500 ppm, normalmente no tiene efectos nocivos sobre la resistencia.

4.3.4.4. Carbonatos y bicarbonatos

Los carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio, tienen diferentes efectos sobre el tiempo de fraguado. El carbonato de sodio puede causar fraguado rápido, el bicarbonato puede retardar o acelerar el fraguado, cuando se encuentran en grandes concentraciones, pueden reducir la resistencia del hormigón. Cuando la suma de sales disueltas excede las 1.000 ppm, es necesario realizar ensayos para el estudio de su influencia sobre la resistencia y el tiempo de fraguado. Por otro lado, no se debe descartar la posibilidad de la ocurrencia de reacciones álcali-agregado.

4.3.4.5. Sulfatos

El alto contenido de sulfatos presente en el agua para amasado, provoca reacciones expansivas. Las sales de hierro en concentraciones de hasta 40.000 ppm no afectan la resistencia del hormigón, pero si, su aspecto estético.

La presencia de de sales de magnesio, estaño, cinc, cobre y plomo puede causar una significativa reducción de la resistencia, y apreciables variaciones en el tiempo de fraguado, siendo las más activas las tres últimas. El yodato de sodio, fosfato de

sodio, arseniato de sodio y borato de sodio actúan como retardadores del tiempo de fraguado, e intervienen en el desarrollo de la resistencia, siempre y cuando, su concentración sea baja, respecto del contenido del cemento.

Aguas con contenidos superiores a 5.000 ppm de cloruros, sulfatos y carbonatos, se ha encontrado que ocasionan una reducción de resistencia del orden del 30%, en relación con aguas libres de estas substancias.

4.3.4.6. Cloruros

Los iones cloruro tienen efecto corrosivo en las armaduras, atacan la capa de óxido protectora que se forma en el hierro de refuerzo, alcanzada debido a la alta alcalinidad (pH 12,5) del hormigón. El nivel de iones cloruro solubles en ácido en el cual comienza la corrosión es aproximadamente del 0,2 al 0,4% en peso del cemento.

4.3.4.7. Sales de hierro

Las aguas subterráneas, generalmente no contiene concentraciones de hierro o lo tienen en bajas cantidades de 20 a 30 ppm, sin embargo las aguas de mina, pueden contener grandes cantidades de hierro. Las sales de hierro en concentraciones de 40.000 ppm no afectan la resistencia del hormigón, pero si su aspecto estético.

4.3.4.8. Agua de mar

El agua de mar con sales disueltas que no sobrepasen las 35.000 ppm puede ser usada en hormigones simples que no utilicen armaduras de hierro, con excepción de

aquellos hormigones donde se sospeche que los agregados son propensos a la reacción álcali-agregado.

Aunque la resistencia temprana del hormigón preparado con agua de mar, es más elevada que la resistencia temprana de un hormigón preparado con agua potable, la resistencia a edades mayores puede resultar menor, deficiencia que se la puede corregir reduciendo la relación agua/cemento. Las estructuras de hormigón simple, expuestas al aire o sumergidas, pueden presentar manchas y eflorescencias.

De ninguna manera debe usarse agua de mar en estructuras con refuerzo de hierro, o en elementos pretensados, debido al riesgo de corrosión de la armadura, especialmente cuando se trata de climas cálidos y húmedos.

4.3.4.9. Otros tipos de agua

Aguas ácidas pueden ser usadas en la elaboración del hormigón, siempre y cuando, se controle la concentración de ácidos disueltos en ellas. Se suele utilizar el pH del agua como medida de aceptación, pero no es recomendable ya que el pH es una medida de concentración de los iones del hidrógeno, por lo tanto, no mide la reactividad potencial de un ácido o una base, que es la que nos interesa.

Agua ácida que contiene ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y otros ácidos inorgánicos comunes en concentraciones no mayores a 1.000 ppm, no tienen efecto perjudicial sobre la resistencia. Se debe evitar el uso de agua que tenga un pH menor a 3.0 ya que puede crear problemas de manejo. Los ácidos orgánicos en altas

concentraciones, pueden ocasionar variaciones en la resistencia. Aguas con contenido de ácido húmico, y otros ácidos orgánicos, no se deben usar en la elaboración de hormigón, pues disminuyen la estabilidad de la mezcla.

Aguas alcalinas con presencia de hidróxido de sodio superior al 0,5% en peso de cemento, pueden reducir la resistencia del hormigón, la presencia de hidróxido de calcio en concentraciones del 1,2% en peso de cemento, tiene poco efecto sobre la resistencia del hormigón. Cuando se usa aguas alcalinas en la mezcla, siempre se debe considerar la posibilidad de un aumento en la reactividad álcali-agregado.

Las aguas residuales suelen contener alrededor de 400 ppm de materia orgánica, pero con un tratamiento preliminar, la concentración se puede bajar a niveles de 20 ppm, que no afecta la resistencia del hormigón. Concentraciones mayores a 100 ppm de materia orgánica, reducen la resistencia e incorporan aire.

El agua proveniente de la industria, si contiene menos de 4.000 ppm de sólidos totales, podría utilizarse a sabiendas que habrá una reducción de resistencia a la compresión, del orden del 10 al 15 %. Aguas de desechos industriales tales como de la curtiembre, fabricas de pintura, plantas químicas y de galvanización, por contener impurezas peligrosas, es preferible no usarlas para el mezclado del hormigón.

4.4. Agente espumógeno

4.4.1. Espumas

En la presente disertación no se estudiarán en detalle las propiedades de las espumas, pero si se explicarán los pasos necesarios para llegar a una formulación físico-química que permita obtener una solución espumante, capaz de formar espuma abundante, suficientemente consistente y relativamente estable.

Se denomina formulación físico-química no solo el escoger los diferentes ingredientes, tensoactivos y aditivos, sino también, sus proporciones y concentraciones respectivas, tomando siempre en cuenta los factores eventuales, temperatura y presión, que son susceptibles de alterar las propiedades físicas y químicas del modelo. El objetivo primordial para encontrar una formulación adecuada, es la espumabilidad y la estabilidad de la solución, es decir la cantidad de espuma producida y su persistencia en el tiempo.

En la actualidad el uso de las espumas se ha extendido a diferentes campos, algunos de gran importancia industrial como; en la minería, flotación de minerales; en la industria del petróleo, la recuperación de aceites y petróleo; en el uso de extintores para incendios; en la construcción, aditivos para el cemento, agregado para el hormigón celular; en la agricultura, usada como marcadores o pesticidas agrícolas; como modelo en reacciones enzimáticas; para la obtención de pequeñas partículas coloidales; en los alimentos, especialmente en la pastelería.

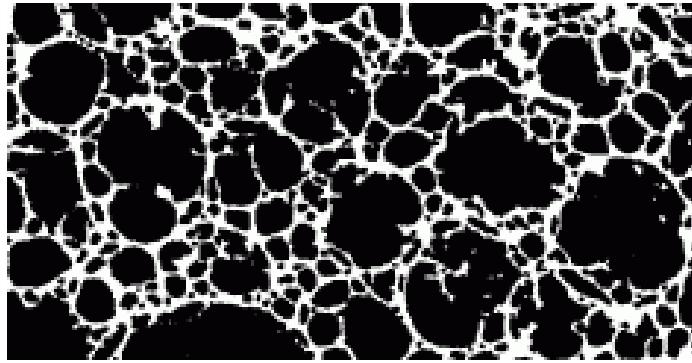
Las espumas son utilizadas por lo general debido a su textura y sus propiedades reológicas, son capaces de combinar las propiedades de un fluido y las de un sólido, con una densidad extremadamente baja, a un costo relativamente económico, en comparación con otras alternativas.

El ciclo de vida de las espumas está definido por tres etapas claramente diferenciadas; formación, maduración, y ruptura de las espumas. Desde la espuma húmeda hasta la espuma seca, donde el espesor de la película es todavía grande respecto a la escala coloidal y la persistencia de las espumas secas, donde la estabilidad de la película depende de las interacciones coloidales.

4.4.1.1. Formación de las espumas

Las espumas son dispersiones aire-líquido, constituidas por un conjunto de burbujas gaseosas separadas por películas delgadas de líquido. Los puntos de unión están formados por tres películas que forman ángulos de ciento veinte grados. A estos puntos de unión se lo conoce como triángulo de Gibbs. Un líquido puro por sí mismo no produce espuma, ya que no presenta variaciones en su tensión superficial, entonces, se requiere de la presencia de una sustancia espumógena, surfactante o tensoactiva, que junto al líquido y por medio de, una agitación energética, una caída de la solución de cierta altura o por borboteo de aire, se conviertan en burbujas de aire o gas. La tensión superficial de un líquido se opone a la formación de la película, que conforma los lados de las burbujas, es aquí donde intervienen los tensoactivos creando una diferencia de tensión superficial entre la solución y la capa superficial;

mientras más grande sea la diferencia, más consistente y mayor estabilidad tendrá la espuma.



Fuente: www.patentos.com

Figura 4.3. Conjunto de burbujas formando una espuma

La teoría termodinámica de Gibbs, afirma que en una solución que contenga un agente espumante, si, la concentración del surfactante es muy pequeña, la capa superficial estaría casi exclusivamente compuesta de moléculas de líquido, y no existiría formación espuma, por lo contrario, si, la concentración de surfactante es relativamente grande, las capas superficiales estarían compuesta por moléculas de substancia activa, y tampoco existiría una formación considerable de espuma.

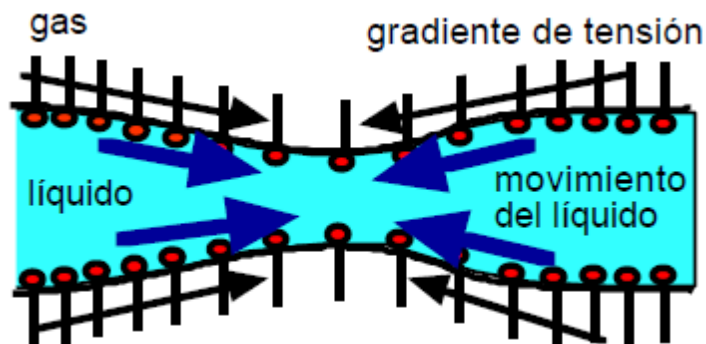
Es necesario, entonces, encontrar el punto de equilibrio en la concentración del tensoactivo con relación al líquido, de manera de obtener la mayor espumabilidad posible, que se alcanza cuando se llega al punto denominado “*Concentración Micelar Crítica*”, conocido con las siglas CMC. Otra forma de producción de espuma se puede apreciar en ejemplos cotidianos; en ríos, por la presencia de impurezas orgánicas y su concentración, producto de la contaminación; en el desarrollo de gases después de una reacción química o bioquímica del oxido de

carbono, ácido sulfúrico, metano, ejemplo claro de esta últimas, son las espumas de la cerveza y de las gaseosas que se forman por la liberación de un gas disuelto.

La célula unitaria de las espumas es una burbuja que de acuerdo a su ubicación y forma, pueden ser clasificadas en; espumas esféricas u oclusas y poliédricas o superficiales. Las espumas esféricas, se encuentran en el interior del líquido donde las presiones interna y externa son las mismas, por lo que el sistema se encuentra en equilibrio.

Las burbujas superficiales o espuma poliédrica, pueden ser consideradas como el resultado del resbalamiento el líquido a través de la espuma esférica y están formadas por células de gas separadas unas de otras por finas láminas de líquido, películas, donde se puede observar la doble capa de Gibbs, cuya constitución influye en la estabilidad de las espumas.

Cuando una película gruesa se forma entre dos burbujas y estas se acercan, las burbujas se aplastan y la película gruesa sufre un estiramiento, provocando una diferencia de tensión; mayor tensión y menor grosor en la zona estirada, y menor tensión y mayor grosor en la zona adyacente no estirada. Este aplastamiento produce un fenómeno denominado inestabilidad de Marangoni. Restaurar el espesor original o bien impedir que el estiramiento de las películas prosiga, es lo que conoce con el nombre de efecto Gibbs-Marangoni. Por lo tanto, el mecanismo Gibbs-Marangoni es el fenómeno sobre el que reposa la existencia misma de las espumas.



Fuente: www.firp.ula.ve

Gráfico 4.4. Efecto Gibbs-Marangoni

4.4.1.2. Maduración de las espumas

Desde el momento que las espumas se forman, empieza una degradación paulatinamente, en el transcurso del tiempo, fenómeno que puede ocurrir en algunos minutos o algunas horas. En la desintegración de las espumas, intervienen ciertos mecanismos perjudiciales como; la segregación y drenaje gravitacional; la succión capilar; la difusión gaseosa intra-burbuja. En los primeros instantes se producen dos fenómenos importantes; la segregación gravitacional de las burbujas debido al principio de Arquímedes, donde el empuje es mayor sobre las burbujas grandes que sobre las pequeñas, y, el drenaje gravitacional del líquido hacia abajo, que continúa durante todo el ciclo de vida de la espuma.

La forma de obtención de la espuma así como la composición del líquido, son factores que influyen en el tamaño de las burbujas. Una burbuja en el interior de un líquido tiende a subir a la superficie ya que la presión hidrostática va disminuyendo y la burbuja va expandiéndose a medida que se acerca a la superficie.

4.4.1.3. Ruptura de las espumas

En una burbuja, la presión interior es mayor que la externa que, buscar el equilibrio de presiones la burbuja crece, debido a que a menor diámetro mayor presión en exceso, entonces el aire se difunde de la burbuja pequeña hacia la grande a través de la película que la separa (difusión gaseosa intra-burbuja), de esta forma las burbujas grandes destruyen a las pequeñas, hasta que llegan a romperse, por lo general en la superficie. Este fenómeno explica la paulatina desintegración de las espumas.

A medida que la película adelgaza, la rapidez del drenaje disminuye directamente proporcional al espesor de la película e inversamente proporcional a la viscosidad del líquido y al área de la película, en efecto, si el espesor de la película intra-burbuja llega a disminuir en exceso, se presentan nuevos fenómenos relacionados con las interacciones coloidales entre sus superficies.

De manera que el adelgazamiento de la película empieza a producirse por capa, debido a la característica oscilante de la fuerzas de interacción entre las superficies que se aproximan, que pasan de atractivas a repulsivas, luego de nuevo a atractivas.

Como se ha visto, la tensión superficial de un líquido es la que se opone a la formación de la película que conforma los lados de las burbujas, por lo tanto, se puede afirmar que no puede haber una espuma sin la presencia de sustancias tensoactivas capaces de disminuir la tensión superficial y permitan su formación. No existe relación directa entre la disminución de la tensión superficial y el volumen de la espuma, ni tampoco entre el poder espumante y otras propiedades de la superficie.

El poder espumante es el grado de aptitud que tienen las sustancias tensoactivas para formar espumas. La eficacia de un agente espumógeno está representada por el volumen y la estabilidad de la espuma obtenida a partir de un determinado volumen de solución, representa la concentración a la cual el máximo de espumabilidad es afectado y corresponde al punto CMC, que se puede reducir o aumentar a voluntad de acuerdo a las consideraciones de costo, toxicidad y otros parámetros. La efectividad de un agente espumógeno se mide por la importancia del efecto producido, es decir la cantidad de espuma que varía con la concentración y el tipo de surfactante utilizado. Al momento de producir espuma, es de suma importancia la utilización de aparatos susceptibles de darnos resultados reproducibles sobre el poder espumante, en nuestro caso utilizaremos un generador de espuma, procedido para trabajar inyectando aire comprimido al interior de la solución espumosa.

4.4.2. Formulación de la solución espumosa

La formulación de la solución espumosa, abarca el término know-how, traducido del inglés como “*saber-hacer*”, necesario en el desarrollo y elaboración de un producto obtenido a base de una asociación y mezcla de diversas materias primas de origen natural o sintético, entre las que se distinguen las materias activas que cumplen la función principal y los auxiliares de formulación, que aseguran las funciones secundarias, facilitando la preparación o prolongando su duración. Debido a la dificultad de encontrar en el mercado local un agente espumógeno, el presente trabajo incluye el desarrollo de una solución espumosa, a partir de un tensoactivo, un espesante y un estabilizante, apoyándose en datos obtenidos de fabricantes de agentes espumógenos, y otras fuentes.

4.4.2.1. Tensoactivos

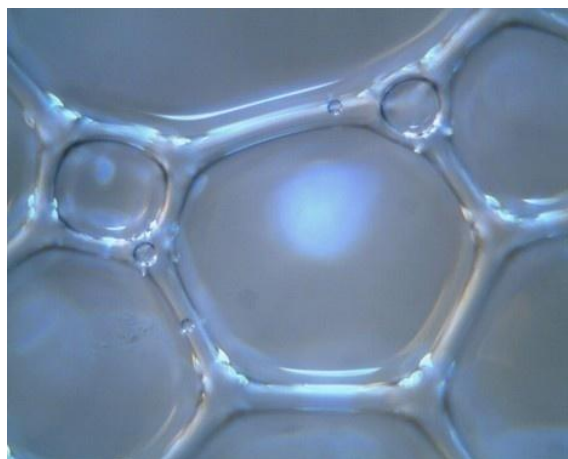
Los tensoactivos o surfactantes en conjunción con los aditivos, son los elementos que intervienen en la formulación de la solución espumosa, son los encargados de intervenir en todos los fenómenos y mecanismos enumerados, de esta manera, representan la materia activa asumiendo, el papel principal en la formulación, dejando el término auxiliares de formulación, para todas aquellas sustancias que colaboran en la formación de las espumas. Los auxiliares de la formulación están representados por los aditivos, elementos que se añaden a la solución en pequeñas cantidades, frecuentemente partes por millón, son generalmente; polímeros; sólidos finamente divididos o electrolitos disueltos en el líquido.

En la elaboración del Hormigón Celular es imprescindible contar con espumas consistentes, abundantes y relativamente estables en el tiempo, que en su formulación intervengan elementos que cumplan con los siguientes parámetros:

- *Disminución de la tensión superficial.* Se buscará un tensoactivo que sea soluble en el agua, que este presente en la superficie para evitar la deformación y rotura prematura de las burbujas.
- *Aumento de la gradiente de tensión.* El tensoactivo seleccionado debe ser capaz de favorecer el efecto estabilizante Gibbs-Marangoni en el momento en que las burbujas se aglomeran para formar la espuma.
- *Aumento de la absorción.* Se hallará un tensoactivo que tenga una fuerte cohesión con el agua sin llegar a problemas de insolubilidad. Los enlaces hidrógeno que el agua forma con diferentes sustancias y que ligan todas las moléculas del líquido entre ellas.

- *Aumento de repulsión entre las superficies.* La repulsión eléctrica de las superficies cargadas por los grupos ionizados del agente espumante que impide el adelgazamiento de la película.
- *Aumento de la viscosidad del medio líquido.* Reducir la rapidez del drenaje hidrodinámico de las películas, al añadir polímeros para aumentar la viscosidad del líquido. La presencia de sustancias sólidas finamente pulverizadas y la temperatura son factores que favorecen la formación de espumas.
- *Aumento de la plasticidad.* Y de la elasticidad de la película líquida para que se disminuya la ruptura de las burbujas.

Las características enumeradas, representan las fuerzas que se oponen al rompimiento de las burbujas dentro de las espumas, dependen de las propiedades y características de las capas superficiales y de los agentes que interviene en la solución espumosa, y, se sitúan en las dos superficies de contacto de las láminas líquidas y del gas, entre ellas.



Fuente: www.cretefoamer.com/

Figura 4.4. Espuma sin aditivos

Con lo visto, se puede afirmar, que todos los tensoactivos conocidos son capaces de generar espuma y se pueden distinguir dos categorías; los que proceden de productos naturales, y los derivados de procesos químicos del petróleo. Los tensoactivos naturales son generalmente proteínas hidrolizadas (producto de la descomposición química o enzimática) por la influencia del agua que se forman a través de la desintegración térmica. Son eficientes en la elaboración de Hormigón Celular, sin embargo por tratarse de productos orgánicos, tienden a degradarse con mucha facilidad, en el transcurso del tiempo, aceptables biológicamente por ser ecológicos, no contaminan el medio ambiente. Para obtener espumas, también, se utilizan otros elementos químicos; jabones resinosos, detergentes, colas animales y vegetales, sulfo-ácidos de la naftalina estabilizados con geles de sílice, resinas vinílicas, saponinas, producto glucósido contenido en la saponaria (planta cariofilea).

Los tensoactivos sintéticos son de hecho, los más adecuados en la elaboración del Hormigón Celular con Espuma, por su estabilidad en el transcurso del tiempo y la facilidad para obtenerlos a un costo relativamente bajo. También se los conoce como surfactantes, provienen de fracciones sintetizadas de petróleo y se los encuentra en el mercado con varias denominaciones comerciales, (Ácido Sulfónico Lineal, Sulfonato de Alquibenceno Lineal, Texapón, Tritón, Nonil Fenol, Butilglicol), destinados primordialmente en la fabricación de jabones, detergentes y limpiadores en general.

El término surfactante, es un anglicanismo desarrollado a partir de 1950, proviene de la contracción del término inglés “*surface active agent*”, que traducido al español

significa, *agente de actividad superficial*. En la actualidad, el término surfactante ha sido aceptado por la Real Academia Española y se utiliza para describir a toda sustancia orgánica, capaz de reducir la tensión superficial de los líquidos.

Los surfactantes o tensoactivos son molécula que contienen un segmento no polar, liposoluble (soluble en aceite) y otro polar, hidrosoluble (soluble en agua). Su solubilidad parcial, tanto en agua como en aceite, le permite migrar a las interfaces, de forma tal, que su grupo polar se encuentre dentro del agua y su grupo no polar se encuentre orientado hacia un solvente orgánico o en la superficie. En adelante se llamará *interface* al límite entre dos fases condensadas y *superficie* al límite entre una fase condensada y una fase gaseosa.

A los surfactantes se los clasifica de acuerdo a la estructura de su molécula o sea conforme la carga iónica de la parte superficialmente activa, o más exactamente según la forma de disociación en el agua, entonces, pueden ser; aniónicos cuando la carga molecular es negativa; catódicos cuando la carga molecular es positiva; no iónicos no existe carga y en los anfóteros existen cargas tanto negativas como positivas. De todos estos grupos los que más interesan son los surfactantes aniónicos que contienen uno de cuatro grupos polares solubles (carboxilato, sulfonato, sulfato, fosfato), combinado con una cadena hidrocarbonada hidrófoba. Se ionizan en una disolución acuosa originando iones orgánicos con carga negativa, responsables de la actividad superficial. Si esta cadena es corta serán muy hidrosolubles, por lo contrario, si la cadena es demasiado larga tendrán baja hidrosolubilidad y actuarán en sistemas no acuosos como aceites lubricantes.

Los surfactantes aniónicos pueden ser de diferente tipo:

- *Sales sódicas de ácidos grasos lineales (jabones)*. Poseen un resto hidrófobo alquílico y un grupo polar carboxílico, son fáciles de preparar por neutralización de ácidos grasos o por saponificación de acilglicerolos, poseen propiedades para uso como jabones de tocador o como aditivos en composiciones detergentes. Su desventaja es su gran inestabilidad en de aguas duras y en disoluciones a pH ácido, así también como gran insolubilidad en presencia de electrolitos.
- *Alquilbenceno sulfonatos lineales*. Son los más utilizados en su grupo después de los jabones, debido a sus propiedades deterativas y su bajo costo. Se obtiene a partir de la reacción del alquilbenceno con ácido sulfúrico o trióxido de azufre, para obtener el ácido sulfónico el cual es neutralizada para dar la sal deseada, normalmente sal de sodio.
- *Parafin sulfonatos*. Debido a que las parafinas son inertes en presencia del ácido sulfúrico, se deben obtener por sufo-oxidación. Son productos sumamente impuros con gran cantidad de parafinas no sulfonadas, son muy solubles en agua y fácilmente biodegradables a bajas temperaturas.

La experiencia muestra que son las fuerzas cohesivas las que dominan el proceso de la espumabilidad, entonces, de manera general podemos escoger a los surfactantes aniónicos hidrosolubles con cadena alquil lineales, que son mejores agentes espumantes que otros tensoactivos, por ser muy solubles en agua y migran rápidamente a la superficie para formar una capa relativamente coherente, debido a las interacciones repulsivas entre las cabezas polares y la cohesión liposoluble entre

las cadenas. Por otra parte, los surfactantes iónicos producen una doble carga eléctrica que es susceptible de generar una repulsión electrostática y efectos electrocinéticos. Las interacciones de las cadenas liposolubles del lado del gas, parecen también ser favorables al aumento de la viscosidad superficial.

Por sus características, aparte de ser el tensoactivo más y mejor estudiado, y al ser el tensoactivo sintético de mayor producción mundial, lo que implica ahorros, y sobre todo, por su disponibilidad en el mercado, al surfactante que se lo conoce como Sulfonato de Alquilbenceno Lineal (LAS, por sus siglas en inglés, *Linear Alkyl benzene Sulphonate*), se lo considera como el agente tensoactivo de primera opción en la formulación, de la solución espumosa.

El Sulfonato de Alquilbenceno Lineal, posee ciertas ventajas sobre otros surfactantes;

- Excelente desempeño como tensoactivo.
- Buen comportamiento ambiental, pues es biodegradable.
- Compatible con todo tipo de fórmula e ingredientes.
- Versatilidad de uso.
- Sinergismo con otros ingredientes de las formulas.
- Baja relación costo/beneficio.
- Facilidad de procesado.
- Estabilidad del producto, no altera el pH con el tiempo ni se hidroliza.
- Fácil de transportar, manipular y almacenar.
- Compatibilidad con otros agentes tensoactivos.

4.4.2.2. Espesantes

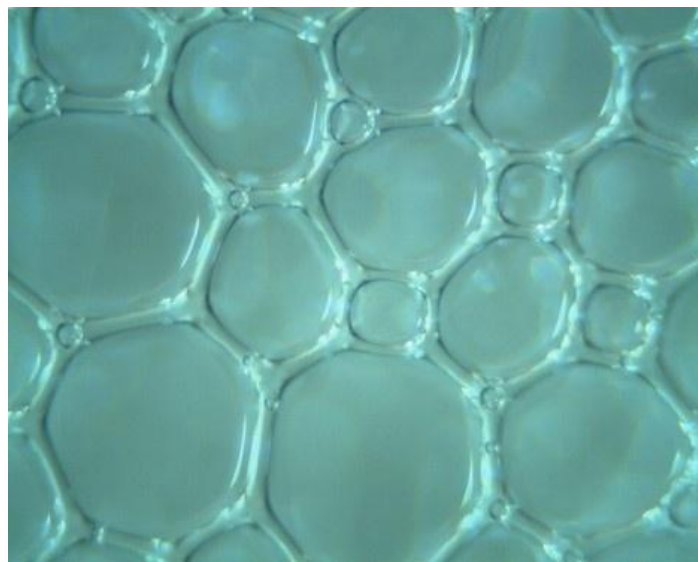
Como ya se mencionó, los polímeros solubles en un líquido aumentan su viscosidad y le confieren propiedades no newtonianas, lo que reduce todos los fenómenos hidrodinámicos de drenaje de las películas gruesas y finas. Como es muy fácil aumentar la viscosidad de una solución añadiendo una pequeña parte por millón de un polímero hidrosoluble, este método se utiliza con mucha frecuencia. Los polímeros no solo producen un efecto viscosificante al líquido, sino que participan de los mecanismos entre faces de la película. Existe otro tipo de polímeros, también hidrosolubles, denominados de injerto, que se absorben sobre la superficie y con frecuencia son buenos agentes dispersantes de sólidos, tienden a recubrir la superficie de una capa extremadamente rígida, este efecto protector es de carácter mecánico y llega a estabilizar las espumas por medio de finas partículas sólidas. La presencia de estos dos grupos de polímeros en la solución espumosa, provoca una sinergia de propiedades, es decir, aprovechar y maximizar las cualidades de cada uno de los componentes de manera obtener un producto final mejorado.

El primer grupo incluye al Carboxil Metil Celulosa (CMC), material orgánico preparado a partir de celulosa (principal polisacárido de la madera y de todas las estructuras vegetales), que por su carácter hidrofílico, alta viscosidad en soluciones diluidas, buenas propiedades para formar películas, inocua y excelente comportamiento como coloide, no solamente se lo usa como producto para la construcción, sino también en diferentes aplicaciones industriales, principalmente; como agente espesante, como producto de relleno, fibra dietética, agente antigrumoso y emulsificante. Para la formulación, se utilizará CMC como espesante.

4.4.2.3. Estabilizantes

En el segundo grupo encontramos el acetato de polivinilo o polivinil acetato (PVAc), producto que se obtiene mediante la polimerización del acetato de vinilo. Es ampliamente utilizado en forma de una dispersión de resina sólida en agua, generalmente una emulsión de color blanca, que sirve como adhesivo para materiales porosos, papel, cartón, tela y especialmente madera.

Conocido, también como cola blanca, cola fría, o cola de carpintero. Para la formulación se utilizará el PVAc como agente estabilizante, producto que evitará la degradación de la calidad de la espuma en el transcurso del tiempo.



Fuente: www.cretefoamer.com/

Foto 4.5. Espuma con aditivo

Una vez definidos los componentes, se procede a la determinación de las cantidades que cada uno de ellos, en la formulación. La realidad nos muestra que la formulación a parte de representar un arte, es necesario el conocimiento y comportamiento físico y químico de los componentes. El formulador debe tomar en cuenta diversos factores que afectan tanto a las materias primas como a los elementos auxiliares. Sería muy extenso pretender analizar el conjunto de procedimientos llevados a cabo a lo largo de la preparación, y de la aplicación de los productos formulados y todo el cúmulo de conocimientos que se derivan de esta operación.

Dejaremos de lado estos procesos, que ciertos autores lo denominan como *ingeniería de formulación*, para exclusivamente dedicarnos a examinar las trabajos realizadas por otros investigadores y sacar nuestras conclusiones.

El mercado de Hormigones Celulares ha crecido considerablemente en toda Europa, donde el uso de este tipo de material está muy difundido y la oferta de agentes espumógenos es relativamente amplia. En los Estados Unidos, la industria de Hormigón Celular ha alcanzado un gran desarrollo, y cuenta con un sinnúmero de fabricantes de agentes espumógenos y maquinaria especializada. En el Ecuador, los vendedores de productos para la construcción desconocen totalmente el producto y sus aplicaciones, pocas personas saben del Hormigón Celular, entonces, no existe un mercado de agentes espumógenos, a menos que se ordene, a los fabricantes, en grandes volúmenes. El presente trabajo, como ya se mencionó, incluye el desarrollo de una solución espumosa elaborada a partir de un tensoactivo, un espesante y un estabilizante.

Para calcular el tiempo por metro cúbico y el peso unitario de la espuma, se carga el generador de espuma con la cantidad necesaria, se conecta el generador al compresor, calibrando debidamente, para obtener la cantidad de aire indispensable.

Usando un cronómetro, calibrar el generador de la siguiente manera;

- *Pesar un recipiente vacío y determinar su volumen*
- *Llenar el recipiente con espuma, medir el tiempo de llenado, luego pesar nuevamente el recipiente lleno de espuma.*
- *Sacar el exceso de espuma, enrasar, por medio de una regleta que cubra todo el borde del recipiente y pesar nuevamente el recipiente.*

Calcular:

Tiempo por metro cúbico de espuma: $T_1 = (T \times W_2) / (W_1 \times V)$

Peso unitario de la espuma: $W_{uf} = W_2 / V$

Tiempo de un volumen requerido de espuma $V_f T_1 = 1000 V_a T_1 / (1000 - W_{uf})$

Peso del volumen de la espuma requerida $W_f = V_f W_{uf}$

La densidad de la espuma W_{uf} esta generalmente entre 32 Kg/m³ y 64 Kg/m³

Donde:

T = Tiempo necesario para llenar el recipiente.

T₁ = Tiempo necesario para generar un metro cúbico de espuma.

V = Volumen del recipiente.

V_f = Volumen de espuma.

W₁ = Peso neto de la espuma en el recipiente antes de enrasar.

W₂ = Peso neto de espuma en el recipiente después de enrasar.

W_f = Peso de la espuma.

W_{uf} = Densidad de la espuma.

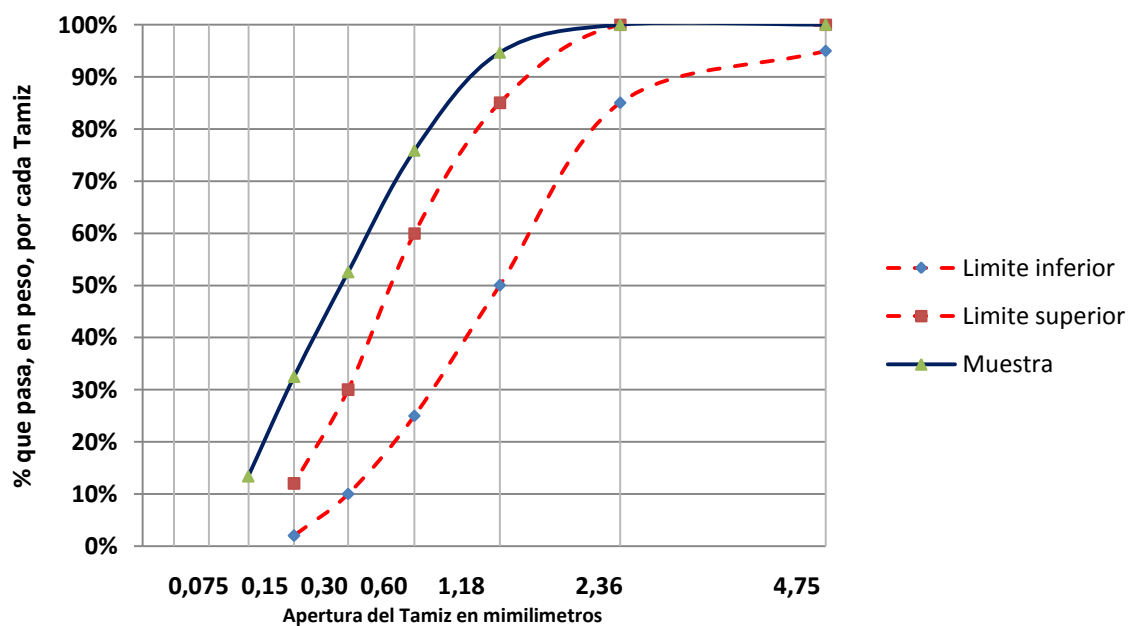
4.5. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

4.5.1. Muestra modificada San Antonio

Tamiz		Retenido en Gramos		Porcentaje en %	
ASTM	mm	Parcial	Acumulado	Retenido	Pasa
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,36	0,00	0,00	0,00	74,60
16	1,18	30,04	30,04	5,31	94,69
30	600µm	106,47	136,51	24,12	75,88
50	300µm	132,12	268,63	47,46	52,54
100	150µm	113,46	382,09	67,51	32,49
200	75µm	108,16	490,25	86,62	13,38
Fuente		75,75			
Suma			566,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6. Granulometría de muestra modificada San Antonio



Fuente: Elaboración propia

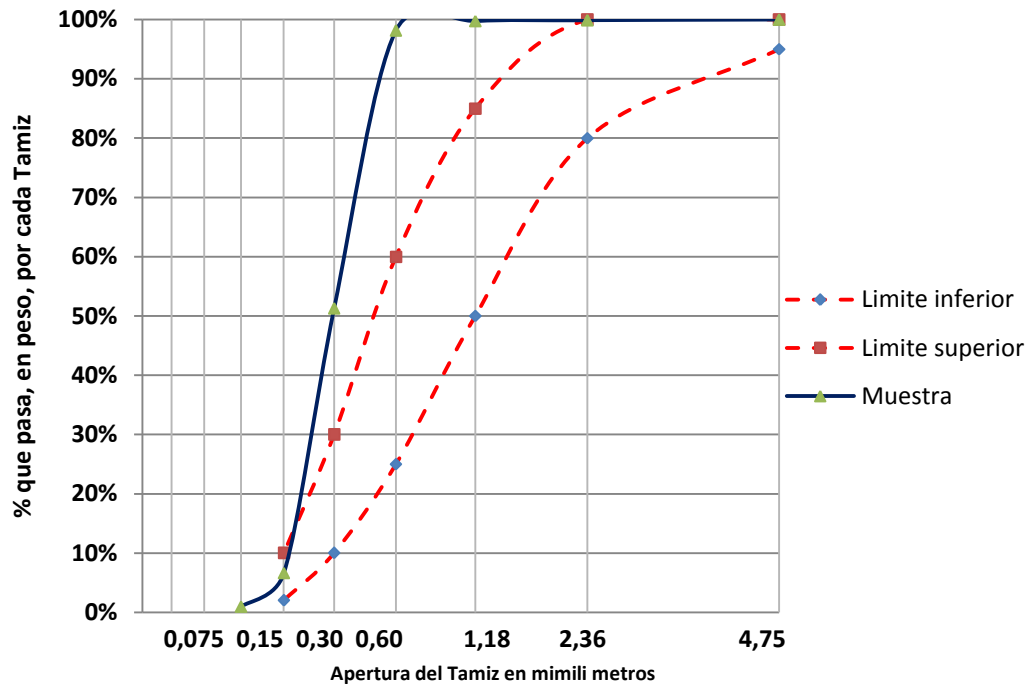
Gráfica 4.5. Curva granulométrica de muestra modificada San Antonio

4.5.2. Muestra Río Blanco

Tamiz		Retenido en Gramos		Porcentaje en %	
ASTM	mm	Parcial	Acumulado	Retenido	Pasa
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,36	0,70	0,70	0,11	99,89
16	1,18	0,79	1,49	0,23	99,77
30	600 μ m	10,45	11,94	1,84	98,16
50	300 μ m	304,80	316,74	48,73	51,27
100	150 μ m	290,09	606,83	93,36	6,64
200	75 μ m	36,94	643,77	99,04	0,96
Fuente		6,23			
Suma			650,00	100,00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.7. Granulometría de muestra Río Blanco



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.6. Curva granulométrica de muestra Río Blanco

4.5.3. Resultados del laboratorio

Muestra modificada San Antonio	
Peso unitario suelto	1379 Kg/m³
Peso unitario compacto	1603 Kg/m³
Modulo de finura	1,44
Gravedad específica seca	2,32
Gravedad específica saturada	2,42
Gravedad específica aparente	2,59
Porcentaje de absorción	4,54 %
Porcentaje de finos que pasa tamiz 200	7,17 %
Porcentaje de partículas livianas	4,876 %
Coefficiente de uniformidad	8,89

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.8. Resultados de muestra modificad San Antonio

Muestra Río Blanco	
Peso unitario suelto	1424 Kg/m³
Peso unitario compacto	1668 Kg/m³
Modulo de finura	1,44
Gravedad específica seca	2,56
Gravedad específica saturada	2,64
Gravedad específica aparente	2,78
Porcentaje de absorción	2,96 %
Porcentaje de finos que pasa tamiz 200	5,03 %
Porcentaje de partículas livianas	1,721 %
Coefficiente de uniformidad	2,33

Fuente: Elaboración personal

Tabla 4.9. Resultados de muestra Río Blanco

Analizados los resultados de las dos muestras, modificada San Antonio y Río Blanco, Figuras 4.8 y 4.9, se puede notar, en primer lugar, que las curvas granulométricas no se encuentran dentro de los límites previstos en el ASTM C 33.

El Módulo de finura en ambos casos es de 1,44 y tampoco esta dentro de límites exigidos por el ASTM C 125, como se sabe es un índice que nos describe en forma rápida la proporción de finos y gruesos presentes en la muestra, entre mayor sea el módulo de finura, mas grueso será el agregado, también es útil para estimar las proporciones de agregado fino y grueso de la mezcla.

Se calcula el coeficiente de uniformidad de conformidad según;

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

	Muestra modificada San Antonio	Muestra Río Blanco
<i>D60 (mm)</i>	0,418	0,353
<i>D10 (mm)</i>	0,047	0,151
<i>C_u</i>	8,89	2,33

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10. Determinación del coeficiente de uniformidad

Se confirma lo observado en las curvas granulométricas; la muestra modificada San Antonio es una curva bien graduada con mayor dispersión de tamaños ($C_u = 8,89$), mientras que la muestra Río Blanco ($C_u = 2,33$) presenta partículas, más bien, homogéneas. De acuerdo al tamaño de los granos se puede afirmar que se trata de muestras de arena fina.

Con todos estos datos parecería desalentador el proceso de selección del agregado fino, pero debemos recordar que el Hormigón Celular es un material nuevo y se sigue experimentando. Los parámetros previstos en las normas ASTM C 33 son para hormigones convencionales, donde hay presencia de agregado fino y también grueso, pero, el caso del Hormigón Celular solo utiliza agregado fino. Al tratarse de un hormigón sin agregado grueso, es decir simplemente un mortero, se podría pensar en referirnos a las normas ASTM C 144, donde se cubre los límites para agregado fino en morteros. Si bien mejora la relación, todavía es insatisfecha la granulometría para agregado fino usado en Hormigón Celular. La guía ACI 523.3R, que recomienda que para el agregado fino se refiera a las normas ASTM C 33, C 144, C 332 o C330, pero tiene la previsión que si el agregado no cumple con estas especificaciones y se ha comprobado con ensayos que es capaz de producir hormigón con peso unitario solicitado, resistentes, durables, resistentes al fuego y con cualidades para el desgaste, pueden ser usados bajo el ACI 318.

También queda la opción de referirnos a los parámetros elaborados por los fabricantes de Hormigón Celular, los hay muchos, y cuya experiencia, con toda seguridad, en el futuro, pasarán a formar parte de las nuevas normas que rijan la elaboración de este tipo de hormigón.

Luego de analizar posibilidades y siempre con referencia a información y trabajos realizados por fabricantes de Hormigón Celular, se procederá a los ensayos y pruebas pertinentes con los materiales, muestras modificada San Antonio y Rio Blanco, para comprobar si cumple con la densidad y resistencias finales.

4.6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

4.6.1. Costo Unitario de Subbase Convencional

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO : Disertación
FECHA : Octubre 2010
ITEM : 1
RUBRO : Conformación y Compactación Subbase Clase 1
UNIDAD : m³
RENDIMIENTO : 0.09

A.- EQUIPOS

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS-EQUIPO	COSTO / HORA	COSTO PARCIAL
Camión cisterna	1.00	0.09	20.00	1.80
Motoniveladora	1.00	0.09	40.00	3.60
Rodillo vibratorio	1.00	0.09	35.00	3.15
Subtotal Equipos				8.55

B.- MANO DE OBRA

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS-HOMBRE	COSTO / HORA	COSTO PARCIAL
Op. Motoniveladora	1.00	0.09	2.13	0.19
Op. Rodillo	1.00	0.09	2.13	0.19
Chofer 1° categoría	1.00	0.09	2.13	0.19
Ayudante maquinaria	1.00	0.09	2.13	0.19
Oficial	5.00	0.45	2.13	0.96
Subtotal mano de obra				1.73

C.- MATERIALES

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT	COSTO PARCIAL
Material fino cribado 3"	m ³	0.39	8.00	3.12
Material granular	m ³	0.86	6.00	5.16
Agua	m ³	0.04	0.60	0.02
Subtotal materiales				8.30

D.- TRANSPORTE

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	DISTANCIA (Km)	TASA	COSTO PARCIAL
Material de subbase clase 1	m ³	1	0.12	0.12
Subtotal transporte				0.12

Costo Directo A+B+C+D

18.70 dólares

4.6.2. Costo Unitario de Base Convencional

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO : Disertación
FECHA : Octubre 2010
ITEM : 2
RUBRO : Conformación y Compactación base Clase 1
UNIDAD : m³
RENDIMIENTO : 0.09

A.- EQUIPOS

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS-EQUIPO	COSTO / HORA	COSTO PARCIAL
Camión cisterna	1.00	0.09	20.00	1.80
Motoniveladora	1.00	0.09	40.00	3.60
Rodillo vibratorio	1.00	0.09	35.00	3.15
Rodillo tanden estático	1.00	0.09	35.00	3.15
Subtotal Equipos				11.70

B.- MANO DE OBRA

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS-HOMBRE	COSTO / HORA	COSTO PARCIAL
Op. Motoniveladora	1.00	0.09	2.13	0.19
Op. Rodillo	2.00	0.18	2.13	0.38
Op. Cargadora frontal	1.00	0.09	2.13	0.19
Chofer 1° categoría	1.00	0.09	2.13	0.19
Ayudante maquinaria	1.00	0.09	2.13	0.19
Oficial	5.00	0.45	2.13	0.96
Subtotal mano de obra				2.11

C.- MATERIALES

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT	COSTO PARCIAL
Material fino cribado 1"	m ³	0.46	10.00	4.60
Material triturado 1 ½ "	m ³	0.82	8.00	6.56
Agua	m ³	0.04	0.60	0.02
Subtotal materiales				11.18

D.- TRANSPORTE

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	DISTANCIA (Km)	TASA	COSTO PARCIAL
Material para base clase 1	m ³	1	0.12	0.12
Subtotal transporte				0.12

Costo Directo A+B+C+D

25.11 dólares

4.6.3. Costo Unitario de Hormigón Celular

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO : Disertación
FECHA : Octubre 2010
ITEM : 3
RUBRO : Subbase de Hormigón Celular
UNIDAD : m³
RENDIMIENTO : 0.10

A.- EQUIPOS

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS-EQUIPO	COSTO HORA	COSTO PARCIAL
Concretera a gasolina	1.00	1.00	2.50	2.50
Herramientas manuales 5%	1.00	0.03	0.05	0.00
Generador de espuma	1.00	0.50	1.50	0.75
Subtotal Equipos				3.25

B.- MANO DE OBRA

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS-HOMBRE	COSTO/HORA	COSTO PARCIAL
Maestro de obra	1.00	0.10	2.13	0.21
Albañil	1.00	0.10	2.13	0.21
Peón	1.00	0.10	2.13	0.21
Subtotal mano de obra				0.64

C.- MATERIALES

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT	COSTO PARCIAL
Cemento	1	6.70	6.60	44.22
Arena	m ³	0.16	5.00	0.81
Agente espumógeno	lit.	0.57	2.50	1.43
Agua	m ³	0.20	0.06	0.01
Subtotal materiales				46.46

D.- TRANSPORTE

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DISTANCIA (Km)	TASA	COSTO PARCIAL
	m ³	0	0.12	0.00
Subtotal transporte				0.00

Costo Directo A+B+C+D

50.35 dólares

CAPÍTULO 5

5. CONTROL DE CALIDAD

5.1. GENERALIDADES

Al igual que un hormigón convencional, el control de calidad al Hormigón Celular se realiza analizando las dos fases del material; plástica, donde se conocerán sus características; sólido o endurecido, para determinar sus cualidades y resistencias. En primer lugar se analizarán las propiedades en el estado plástico, fase en que el material se mezcla, distribuye, deposita e incluso se utiliza el mismo equipo como que se tratara de un hormigón convencional, solo diferenciado de éste, por la sustitución del agregado grueso por espuma preformada. La fase plástica más conocida como “*hormigón fresco*”, representa la parte fluida en la que el hormigón posee la facultad de ser moldeado, teniendo una vida útil variable (depende del tipo de cemento, cantidad de agua, temperatura, y aditivos utilizados), comprendida entre el momento en que la mezcla abandona la hormigonera, hasta el instante en que inicia el fraguado. En esta fase los componentes del hormigón se encuentran sueltos, pudiendo separarse con facilidad a causa de un mal manejo (transporte,

vertido), ocasionando los fenómenos conocidos como segregación y exudación. Mientras el hormigón esta en estado fresco, es conveniente comprobar las propiedades que determinan su utilización; consistencia, homogeneidad, docilidad, trabajabilidad, y peso específico. Por tratarse de un material que en su estado fresco se comporta como un hormigón, el análisis y los ensayos de laboratorio aplicables a la mezcla son los mismos que se ejecutan y se prueban para hormigones convencionales de baja densidad.

Luego de pasar de la fase plástica al estado sólido, el Hormigón Celular, suministrará un servicio determinado; se comportará y trabajará más como un suelo que como un hormigón. Por otro lado, se sabe que todo hormigón en un material que esta diseñado para trabajar a compresión, pero, en el caso específico del presente estudio, utilizado como base y subbase, también estará sometido a fuerzas de flexo tracción, y por tratarse de un material versátil con diferentes propiedades y usos, se requerirá de controles de calidad acorde con la importancia de las obras, el nivel de calidad de las mismas y de la experiencia que se tenga con el material.

El control de calidad puede ser tan simple, como una revisión visual del trabajo completo en el lugar donde se utilizan las mezclas típicas del material, o detallado, en casos que los materiales y la uniformidad del producto sean cuestionables. La extensión de un programa de control de calidad, depende del destino y aplicación que va a tener el Hormigón Celular. Cuando se lo usa en remplazo de la base y subbase granular, algunas de sus propiedades mecánicas deberán ser analizadas como si tratara de un suelo verdadero.

Para determinar las propiedades de una muestra del Hormigón Celular, será necesario someter la mezcla a ensayos programados para de obtener: en estado fresco, la consistencia o fluidez y la cantidad de aire contenido, y para el estado sólido, la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, densidad y absorción de agua. Por supuesto, no será necesario someter todas las mezclas de Hormigón Celular, a cada uno de los ensayos y pruebas señalados. Como ya se dicho con anterioridad, la extensión del programa de “control de calidad” depende del destino y aplicación que va a tener el material.

Las mezclas con alta fluidez, obtenidas a partir de elevados contenidos de agua, son susceptibles a perder su homogeneidad, propiciando que los elementos constitutivos de la mezcla se separen, e induciendo el fenómeno denominado segregación. La segregación, es un estado que se percibe a simple vista, y se presenta cuando existe exceso de agua, mal uso de aditivos o por una mala relación entre los elementos que componen la mezcla. Generalmente, la pasta, mezcla de agua con cemento, se vuelve muy líquida al separarse las partículas más pesadas de los elementos, que van al fondo de la mezcla, de las más livianas, muy solubles en agua, que van hacia la superficie. Este fenómeno se produce usualmente, por efectos de la gravedad.

Por definición, el Hormigón Celular utiliza en su composición solo agregado fino, elemento que favorece la cohesión con el cemento, de todas maneras, es recomendable tener mucho cuidado al momento de su dosificación, controlando siempre la relación agua-cemento y la relación arena-cemento, de tal modo de obtener un material con la debida cohesión, docilidad y que no presente ningún tipo

de segregación. En ciertos caso, se recomienda la utilización de finos tales como cenizas volantes o limos, en un máximo del 20% del total de los agregados, con el objeto de mejorar la cohesión a la mezcla.

Una vez endurecido, el material se somete a los ensayos que determinan sus características físicas y mecánicas, siendo la más representativa, la resistencia a la compresión, muy fácil de determinar, por medio pruebas previstas en las normas internacionales ASTM. Muchas de las propiedades del hormigón están estrechamente relacionadas con la resistencia, de forma, que conociéndola se tiene un índice de comportamiento frente a otras acciones. Otras características físicas importantes, que se pueden analizar son; la densidad seca, que permite visualizar su comportamiento físico y químico en el futuro, y la permeabilidad que determinará en gran parte, su capacidad para hacer frente a los elementos agresivos del tipo químico o físico, es decir su durabilidad.

El ACI y las normas ASTM no prevén ensayos de fluidez, ni tampoco, ensayos de CBR para Hormigón Celular. El presente trabajo considera adecuados realizarlos, por cuanto se trata de un material que va a ser utilizado como base y subbase, debiendo cumplir con determinados requerimientos. El Hormigón Celular posee características similares a los materiales de baja densidad y baja resistencia controlada (LD-CLSM), productos bastante estudiados que cuentan con abundante información y normativas, de forma que, pruebas de laboratorio que normalmente se aplican a estos materiales, de baja densidad y resistencia controladas, se pueden aplicar, con ciertas restricciones, a los Hormigones Celulares.

5.2. HORMIGÓN FRESCO

5.2.1. Consistencia o fluidez de la mezcla

La plasticidad o fluidez, es la propiedad que distingue al Hormigón Celular de otros hormigones convencionales, representa la cualidad que permite fluir al material, auto-compactarse, auto-nivelarse y llenar completamente los vacíos, en moldes y encofrados, sin la necesidad de utilizar equipo adicional de distribución y compactación, como sucede con los materiales granulares de las bases y subbases tradicionales, que deben ser colocadas en capas y luego compactado mecánicamente.

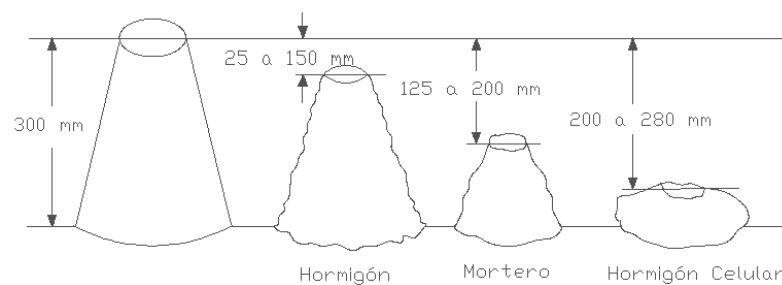
La plasticidad del Hormigón Celular puede variar desde espesa hasta muy fluida, el material de consistencia plástica (espesa), cuyo rango de asentamiento recomendado por la norma se encuentra entre 150 y 200 milímetros, suele ser colocada en bases y subbases de pavimentos que requieren pendientes cercanas al 2%, de forma de controlar el drenaje y el agua en su superficie. El material de consistencia muy fluida es ideal para trabajar en áreas ajustadas, con espacios reducidos o con accesos difíciles, tal el caso de; cavernas, pozos y zanjas, donde la compactación de un relleno granular sería complicada, peligrosa y hasta imposible.

La habilidad para fluir se incrementa con el contenido de agua y aire de una mezcla, y disminuye con el incremento de agregado fino utilizado. En estado fresco siempre se podrá ajustar la fluidez, tiempo de fraguado y resistencias, con rangos de acuerdo a los usos y aplicaciones. La determinación de la medida de consistencia o fluidez de mezclas de Hormigón Celular, se realiza por medio de ensayos muy sencillos que se

los puede hacer inclusive en obra, sin la utilización de equipos costosos ni personal especializado, proporciona resultados satisfactorios, razón por la cual se han hecho muy populares, tanto que, se utiliza en casi todo el mundo.

La forma más adecuada para medir la consistencia del Hormigón Celular es el ensayo de fluidez modificado, conforme a la norma ASTM D 6103-97, “Consistencia de flujo en material de resistencia baja controlada”. El ensayo consiste en la utilización de un cilindro de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura abierto en ambos extremos (Figura 5.2). Se alcanza una buena fluidez cuando no se note segregación y el material se disperse en un diámetro no menor a 200 mm.

Por facilidad y costumbre, se utiliza con mucha frecuencia el método alternativo de ensayo conforme a la norma ASTM C 143. “Asentamiento de hormigón de cemento portland” (Figura 5.1). Método del cono de asentamiento o *Cono de Abrams*, molde metálico troncocónico de 300 mm de alto, 100 mm de diámetro superior y 200 mm de diámetro inferior, que evalúa la consistencia cuando se esperan revenimientos menores a 200 mm que se enmarcan dentro de los siguientes parámetros:



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5.1. Asentamientos en Cono de Abrams

- *Baja fluidez* = *150 mm o menos*
- *Fluidez normal* = *entre 125 a 200 mm*
- *Alta fluidez* = *superior a 200 mm*

El procedimiento en ambos casos es el siguiente; se colocan los dos moldes, cono de Abrams y cilindro estandarizado, sobre una superficie plana, horizontal, firme, no absorbente y ligeramente humedecida. Seguidamente se llenan los moldes hasta rebozar, sin necesidad de compactar, recordar que se trata de es un material auto-compactante. Enseguida se procede a golpear ligeramente sobre los costados de los moldes para evitar la formación de vacios (aire en la mezcla). Luego se retiran los moldes y se mide el diámetro en que se dispersa la mezcla.

Fabricantes de agentes espumógenos sugieren, también, la utilización del ensayo de fluidez de acuerdo con la norma ASTM C 939 “*Fluidez de mortero para hormigón con agregados precolados*”. Este ensayo es recomendable cuando se espera muestras con desplazamientos superiores a 200 mm, con un tamaño máximo de árido de 6 mm y tiempo máximo para el paso del material por el cono de flujo de 35 segundos.



Fuente: www.iscyc.net

Figura 5.1. *Fluidez ASTM C 143*



Fuente: www.iscyc.net

Figura 5.2. *Fluidez ASTM D 6103*

5.2.2. Porcentaje de aire incorporado

Normalmente, el Hormigón Celular lleva entre el 20 a 60% de aire incorporado en la mezcla, una variación del 5% de aire modifica la cantidad de cemento de la mezcla entre 8 y 12 Kilos por metro cúbico, aumentando o reduciendo el volumen de la mezcla en alrededor de 50 litros por metro cúbico. Esto determina que se deba controlar, el rango estimado de error de la cantidad de aire incorporado. Existen varios métodos para determinar el aire incorporado en el hormigón convencional fresco; ASTM C 173 (*Método Volumétrico*), ASTM C 138 (*Método Gravimétrico*), ASTM C 231 (*Método de Presión*), entre otros. Para el presente estudio se tomará el método de ensayo ASTM D 6023 "*Método de ensayo para Peso Unitario, Contenido de Aire y Rendimiento en Material de Baja Resistencia Controlada*", método basado en el ensayo ASTM C 138 "*Peso unitario, rendimiento y contenido de aire del hormigón fresco*", que cubre el proceso para determinar el contenido de aire de una muestra elaborada con cualquier tipo de agregado, sea denso, celular o liviano. Se mide el contenido de aire de la fracción del mortero, independiente del aire que pudiera estar presente en las partículas del agregado.

El ensayo inicia con la selección de un recipiente metálico de forma cilíndrica, con capacidad aproximada de $0,014 \text{ m}^3$, el cual se procede a llenarlo con Hormigón Celular hasta rebosar, a pesar de ser un material fluido el llenado se lo hace en dos capas, para evitar la formación de cámaras de aire, y se debe golpear levemente los costados, repitiendo esta acción en cada capa. Enseguida se retira el exceso de material, utilizando una llana se enrasa, recordando pesar el molde antes y después del llenado. Por medio del procedimiento de ensayo recomendado en el método

normalizado ASTM D 6023, se determina el peso unitario de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$PUV = \frac{\text{Peso Total} - \text{Peso del Recipiente}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

Peso por unidad de volumen o densidad, resulta de dividir el peso neto del hormigón para el volumen de recipiente cilíndrico. El peso neto del hormigón es el resultado de la resta del peso total del hormigón, menos el peso del recipiente vacío. Con estos datos se procede al cálculo del porcentaje de aire contenido en la mezcla, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\% \text{ aire} = \frac{PUV_t - PUV}{PUV_t}$$

Donde:

PUV_t = *Peso por unidad de volumen teórico de la mezcla.*

PUV = *Peso por unidad de volumen real de la mezcla.*



Fuente: Fotografía propia

Figura 5.3. Consistencia de la mezcla



Fuente: Fotografía propia

Figura 5.4. Cálculo de PUV

5.2.3. Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado es una variable (medida en el tiempo) que cambia, usualmente, de acuerdo a las necesidades constructivas. Retardar en inicio del fraguado de la mezcla por la distancia, o acelerar el fraguado y utilizar en el menor tiempo la estructura con sobrecarga. El tiempo de fraguado es el período requerido por el Hormigón Celular, para pasar del estado plástico a un estado más endurecido, y ser capaz de soportar el peso de una persona. Una guía práctica para saber el estado de endurecimiento, es observar la cantidad de agua exudada, ya que los materiales al no usarla en su hidratación dejan la mezcla, donde las partículas sólidas se reacomodan, volviendo a la mezcla cada vez más rígida.

El tiempo de fraguado depende de varios factores:

- Tipo y cantidad de material aglomerante
- Tipo de agregado
- Permeabilidad y saturación del suelo donde se vierte la mezcla
- Grado de fluidez de la mezcla
- Temperatura ambiente y temperatura de la mezcla
- Humedad del ambiente
- Profundidad de la mezcla

Para determinar el tiempo de endurecimiento de la mezcla se utiliza el método normalizado ASTM C 403 *“Método estándar para el Tiempo de Fraguado por Resistencia a la penetración para mezclas de Hormigón”*. El tiempo normal de fraguado está entre 3 a 5 horas, se puede apresurar por medio del uso de acelerantes.

El método normalizado ASTM C 403 evalúa las resistencias de los hormigones tamizados por medio del tamiz N° 4, cuando la mezcla esta fresca, a intervalos regulares de tiempo se mide la resistencia del hormigón por medio de un penetrómetro, al cual se le colocan diferentes agujas especialmente calibradas para determinar la dureza de la mezcla. El penetrómetro mide la fuerza necesaria para lograr penetrar la muestra, y las agujas miden el área de aplicación. Los datos obtenidos determinan la presión o resistencia, que la mezcla desarrolla de acuerdo al tiempo transcurrido.

Con este ensayo se obtiene el grado de dureza del Hormigón Celular. El Departamento de Tránsito de California requiere un mínimo de penetración de 650 antes de proceder a colocar el hormigón hidráulico sobre la base o subbase, dependiendo de la aplicación, el número de penetraciones pueden variar, desde 500 hasta 1500.



Fuente: www.cementopanama.com

Figura 5.5. Equipo para determinación del Tiempo de Fraguado

5.3. HORMIGÓN SÓLIDO

Luego de la etapa plástica, el Hormigón Celular utilizado como base o subbase, se endurece y pasa a desempeñar funciones de un suelo, de forma que, para cierto tipo de propiedades deberá ser tratado como tal. Para otras propiedades, seguirá siendo un hormigón de baja densidad. Es necesario seguir las recomendaciones de las normas; ASTM C 495 *“Método normalizado para determinar la resistencia a la compresión en hormigones livianos”*, ASTM C 796 *“Método normalizado para agentes espumógenos para uso en Hormigón Celular que utiliza espuma preformada”*, ASTM C 869 *“Especificaciones normalizadas para agentes espumógenos usados en la elaboración de Hormigones Celulares”*, ASTM D 1883 *“Método estandarizado para determinación de CBR en el laboratorio”*.

Cuando se usa Hormigón Celular como base y subbase, la densidad debe estar comprendida entre 600 a 1800 Kg/m³, densidades inferiores a 600 Kg/m³, implican el uso solamente de cemento y espuma, en estas circunstancias el material endurecido, no falla bajo el ensayo previsto para un hormigón convencional, en este caso, se aconseja recurrir a las recomendaciones diseñadas por los fabricantes de agentes espumógenos. Las muestras representativas del material, se toman de acuerdo a la norma ASTM D 5971, en cilindros de 150 mm x 300 mm, debidamente normalizados, llenados hasta rebosar, desde los extremos hacia el centro, golpeando levemente en los costados, para evitar la formación de vacíos. Terminado este proceso, se procede a sellar los cilindros con plástico, para evitar evaporación y contaminación.

5.3.1. Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión de un elemento no confinado, representa una medida de la capacidad de carga del elemento, y como se ha dicho con anterioridad, las propiedades de los materiales están en relación directa con su densidad. El Hormigón Celular es usado en una diversidad de aplicaciones con diferentes densidades, dependiendo de la dosificación y de materiales utilizados, por lo tanto, también, existen una extensa variedad de resistencias a la compresión. Se ha procurado reunir en grupos representativos, que incluso pueden ser más pequeños, que esta de acuerdo a la densidad y la resistencia mínima necesaria en cada caso (Tabla 5.1).

De todas maneras, se puede afirmar que Hormigón Celular con una resistencia a la compresión de entre 0.3 MPa a 0.7 MPa, equivale a la capacidad de carga de un suelo granular bien compactado. La toma de muestras en probetas, preparación y ensayo para la resistencia a compresión, se realizará de acuerdo a lo descrito en las normas internacionales ASTM C 495 y ASTM C 617.

Tipo	Densidad seca en Kg/m ³	Mínima resistencia a la compresión MPa
I	290 a 380	0,1
II	380 a 480	0,3
III	480 a 580	0,6
IV	580 a 670	0,8
V	670 a 800	1,1
VI	800 a 1300	2,2
VII	1300 a 1900	3,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1. Resistencias típicas del Hormigón Celular en función de su densidad.

Los cilindros, de 150 mm x 300 mm, para los ensayos de resistencia a la compresión deben ser dos, al menos, por cada valor de resistencia, son llenados hasta rebosar sobre una superficie horizontal rígida y nivelada, libre vibración y otras perturbaciones, deben ser preparados tan cerca como sea posible del lugar donde serán almacenados, durante los primeros cuatro días, es recomendable llenar los moldes en dos capas golpeándolos levemente a los costados, con fin de evitar la formación de bolsas de aire, en el interior de la mezcla.

Una vez enrasados y limpios se sellan los cilindros con plástico, para evitar contaminaciones. Posterior, se almacenan en un lugar adecuado durante cuatro días a una temperatura de entre 16°C a 27°C. El día del ensayo, se retiran con mucho cuidado los moldes, permitiendo que los cilindros reposen en aire fresco por el lapso de 4 a 8 horas, si la parte superior del cilindro no esta horizontal, se deberá utilizar un cepillo de alambre para alisar la superficie, luego de procede a poner una capa protectora, cabecear, a base de yeso, de acuerdo con la práctica ASTM C 617.

Se coloca el cilindro de prueba sobre la mesa o placa de la máquina de ensayo, se alinea cuidadosamente el eje del cilindro con el centro del cabezal del bloque con asiento esférico, procurando que el cilindro quede asentado uniformemente, si es posible ayudándose con las manos.

Se aplica la carga de ensayo de manera continua y sin golpe, la aplicación constante permite que el cilindro falle en no menos de dos minutos. No se debe hacer ajustes en los controles de la máquina cuando un espécimen esta cediendo rápidamente,

inmediatamente antes de la falla, aplicar la carga hasta que el cilindro falle, registrando la máxima carga alcanzada por el cilindro durante el ensayo. Es recomendable aplicar carga adicional, en algún cilindro, de manera que se quiebre lo suficiente para observar la apariencia del interior del espécimen; bolsas de aire, aparente segregación, uniformidad y otros.

Luego de registrados los resultados se calcula según la siguiente fórmula:

$$C = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi D^2}$$

Donde:

C = resistencia a la compresión
A = área del cubo
D = diámetro nominal el cilindro
P = carga máxima



Fuente: Fotografía propia

Figura 5.6. Máquina para el ensayo de Resistencia a la Compresión

5.3.2. Valor Relativo de Soporte o CBR

Como se mencionó en el Capítulo 2 del presente trabajo, esta prueba se ejecuta para encontrar el valor de soporte de un suelo, para ser utilizado en obras viales. El ensayo puede ser realizado en laboratorio o en sitio, y el objetivo es obtener un valor de resistencia de suelos naturales o suelos mejorados. El CBR (California Bearing Ratio) de los suelos establece en forma indirecta, una medida de resistencia al corte, el ensayo de laboratorio, para determinar el CBR o valor relativo de soporte, que se realizará, es el contemplado en método de prueba ASTM D 1883.

El valor relativo de soporte se define como; la relación entre el esfuerzo necesario para penetrar un pistón de 3 pulgadas cuadradas de área a una velocidad de 0,05 pulgadas por minuto hasta una profundidad en intervalos de 0,1 pulgadas hasta llegar a 0,5 pulgadas. Los resultados de carga sobre área, presión en PSI, se comparan para la misma penetración en una muestra patrón obtenida de piedra triturada de alta calidad que para una penetración de 0,1 pulgadas corresponde 1000 PSI, (para el Sistema Métrico será en 2,5mm la carga patrón de 6,9 MPa). De tal forma que si a un determinado material debemos aplicar 360 libra de carga para penetrar 0,1 pulgadas, dividido para el área del pistón tendremos 120 PSI de presión, que al dividir para el patrón 1000 PSI, tendremos un CBR de 12% o simplemente 12.

Para el ensayo de CBR en Hormigón Celular, es necesario considerar la diferencia entre los componentes granulares convencionales, utilizados en la base o subbase tradicional, y los materiales utilizado en el Hormigón Celular, ligante hidráulico.

Esta diferencia de materiales incide tanto en la resistencia a la compresión como en la penetración del pistón que mide la capacidad de soporte.

Para la determinación del valor relativo de soporte, se escogió seis probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm previamente preparadas y curadas al ambiente, tanto para 7 días como para 28 días. El molde se asienta en la máquina y seguidamente se ejerce presión con la prensa, los valores tanto de penetración como de carga son tabulados gráficamente para determinar el valor relativo de soporte.

Como en todas las muestras, la costumbre es realizar los ensayos a los 28 días de elaborado el material, cuando se considera que la resistencia ya alcanzó un valor suficientemente alto como para prestar el servicio a que esta destinado. Si bien, el Hormigón Celular, tiene la tendencia a que la resistencia siga creciendo en el tiempo, en especial si se fabrica con cemento puzolánico, se debe tener presente que la densidad, contenido de aire de la mezcla y la cantidad de cemento utilizada afectan la capacidad de desarrollar resistencia en el tiempo.



Fuente: Fotografía propia

Figura 5.7. Cilindro para CBR



Fuente: Fotografía propia

Figura 5.8. Máquina para CBR

Para un hormigón que va a ser utilizado como suelo (base y subbase), resulta importante realizar una comparación entre la ganancia de resistencia a la compresión, prueba destinada a hormigones, y el CBR, prueba destinada a encontrar la capacidad de soporte de un suelo en servicio.

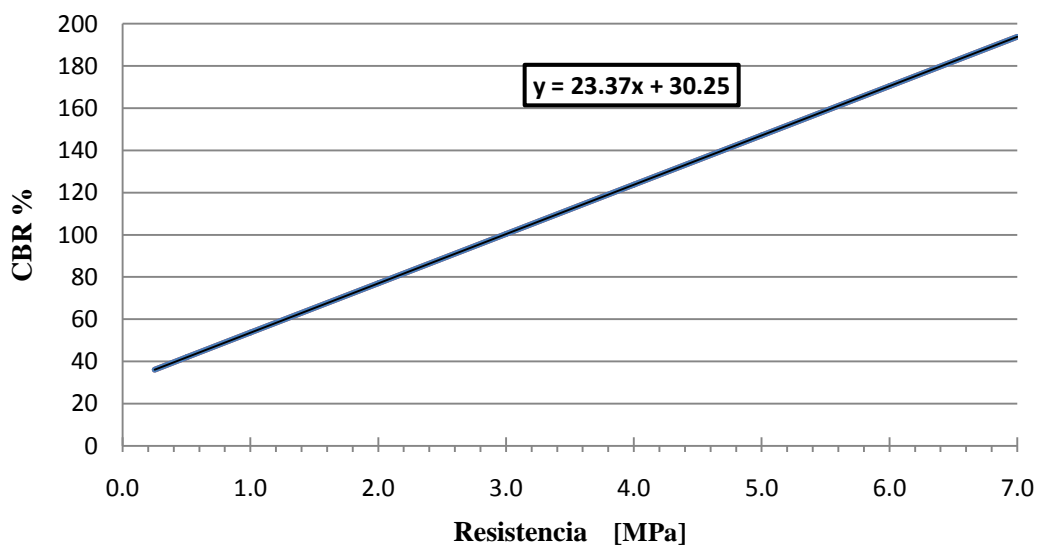
Algunos autores, encuentran una excelente correlación entre el CBR y la resistencia a la compresión. Lo que permite asegurar que es una buena práctica estimar el CBR a partir de la resistencia a la compresión, mediante la siguiente fórmula:

$$CBR = 23,37f'c + 30,25$$

Donde:

CBR = Valor Relativo de Soporte

f'c = Resistencia a la compresión del Hormigón Celular.



Fuente: www.imcyc.com

Gráfico 5.2. Relación entre CBR y resistencia a 28 días

5.3.3. Densidad seca

La densidad real de un hormigón, depende fundamentalmente de la densidad, granulometría y volumen de sus componentes. En el Hormigón Celular, la densidad real (densidad seca al aire representa las condiciones del material en sitio) está controlada básicamente por la cantidad de espuma preformada introducida en la mezcla y se puede afirmar que la densidad tiene una estrecha relación con el resto de sus propiedades. La Tabla 5.1 muestra una de dichas relaciones.

Pruebas de laboratorio, también, han demostrado que la resistencia en seco tiene relación con la densidad del material fresco, la densidad seca es usualmente 80 Kg/m³ menor que la densidad del material fresco. Pero, se acostumbra a calcular la densidad seca al horno y de esta manera determinar ciertas propiedades adicionales del Hormigón Celular, para determinar la densidad seca al horno con suficiente precisión, asumiendo que el agua para hidratación el cemento sea el 20% del peso del cemento, se debe aplicar la siguiente fórmula ¹⁰:

$$D = [1, 2C + A]$$

Donde:

D = Densidad seca al horno

C = Peso del cemento del hormigón

A = Peso del agregado del hormigón.

De todas maneras, con la finalidad de completar el análisis de la densidad seca, se requerirá que los especímenes estén de acuerdo con las recomendaciones descritas en las normas ASTM C 796 y ASTM C 495.

5.3.4. Resistencia a la Tracción

La norma ASTM C 796 recomienda utilizar el método de prueba escrito en la norma ASTM C 496 / C 496M “*Método de Ensayo Normalizado Para Resistencia a la Tracción Indirecta de Especímenes Cilíndricos de Concreto*”.

El ensayo consiste en aplicar una fuerza compresiva diametral a lo largo de un espécimen cilíndrico de hormigón, con un valor dentro de un rango establecido, hasta que ocurra la falla. La carga aplicada induce esfuerzos de tensión en el plano que contiene la carga y esfuerzos de compresión relativamente altos en el área inmediatamente alrededor de la carga aplicada. La falla por tensión ocurre en lugar de la falla por compresión porque las áreas de aplicación de carga, están en un estado de compresión triaxial. Se calcula la resistencia a la tracción en base a la siguiente fórmula:

$$f'_t = \frac{2P}{\pi ld}$$

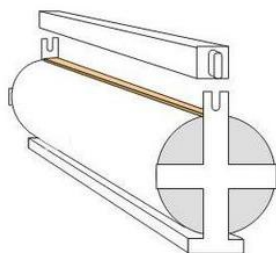
Donde:

f'_t = Resistencia a la tracción indirecta

P = La máxima carga de rotura.

l = longitud de la muestra.

d = diámetro de la muestra.



Fuente: www.theconstructor.org

Grafico 5.3. Preparación de la muestra



Fuente: www.theconstructor.org

Figura 5.9. Ensayo ASTM C 496

CAPÍTULO 6

6. PROPIEDADES Y PRUEBAS

6.1. MATERIALES UTILIZADOS EN LA MEZCLA

6.1.1. Agregado fino

Durante el desarrollo del presente trabajo, nuevas regulaciones gubernamentales ocasionaron el cierre de la mina Río Blanco en Quinindé, por lo que solo se utilizará la muestra modificada San Antonio, para la elaboración del Hormigón Celular.

Resultados de muestra modificada San Antonio	
Peso unitario suelto	1379 Kg/m³
Peso unitario compacto	1603 Kg/m³
Modulo de finura	1,44
Gravedad específica seca	2,32
Gravedad específica saturada	2,42
Gravedad específica aparente	2,59
Porcentaje de absorción	4,54 %
Porcentaje de finos que pasa el tamiz 200	7,17 %
Porcentaje de partículas livianas	4,876 %
Coefficiente de uniformidad	8,89

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.1. Resultados de laboratorio muestra modificada San Antonio

Tamiz		Retenido en gramos		Porcentaje %	
ASTM	mm	Parcial	Acumulado	Retenido	Pasa
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,36	0,00	0,00	0,00	74,60
16	1,18	30,04	30,04	5,31	94,69
30	600µm	106,47	136,51	24,12	75,88
50	300µm	132,12	268,63	47,46	52,54
100	150µm	113,46	382,09	67,51	32,49
200	75µm	108,16	490,25	86,62	13,38
Pasa N° 200		75,75	75,75		
Suma		566,00	566,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.2. Granulometría muestra modificada San Antonio

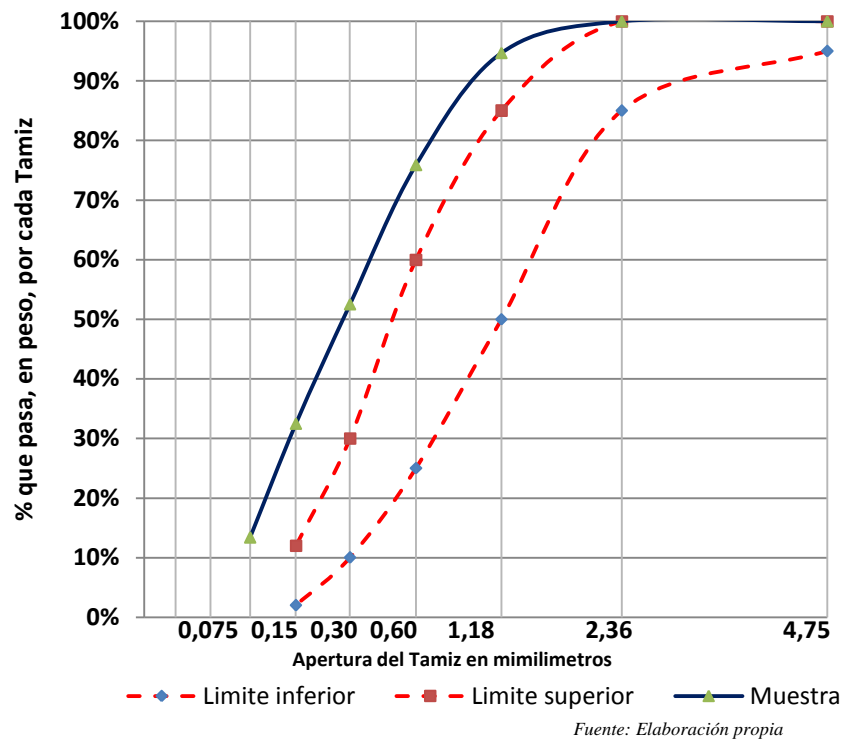


Gráfico 6.1. Curva granulométrica de muestra modificada San Antonio

6.1.2. Agua

El agua utilizada para la elaboración del Hormigón Celular, tanto para el amasado como para la preparación de la solución espumante, fue agua potable proporcionada por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento, que cumple con las normas internacionales y a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108.

PARÁMETRO	UNIDAD	LÍMITE MAXIMO	VALOR
Temperatura	°C	–	10,30
pH	–	–	7.04
Color	UTC	15	0
Turbiedad	NTU	5	0,33
Solidos totales disueltos	mg/l	–	79
Alcalinidad	mg/l	–	27
Dureza Total	mg/l	–	40
Calcio	mg/l	–	8,5
Magnesio	mg/l	–	4,6
Manganeso	mg/l	0,4	0
Aluminio	mg/l	–	0,11
Hierro Total	mg/l	–	0,06
Fluor	mg/l	15	0,15
Cloruros	mg/l	–	5,7
Amoníaco	mg/l	–	0,13
Nitritos	mg/l	3	0
Nitratos	mg/l	50	0,8
Sulfatos	mg/l	–	10
Cloro Libre Residual	mg/l	0,3 - 15	1,28

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.3. Calidad del agua

6.1.3. Solución Espumosa

Por varias ocasiones se procuró obtener espumógenos de las compañías dedicadas a la venta de productos para la construcción, lamentablemente no se logró conseguir e incluso desconocían de su existencia. Se intentó, más tarde con los fabricantes de químicos, en otros países producen agentes espumógenos tales como; Rheocell 30, Adipor, Aspan, Provoton, pero siempre argumentaron que, muestras no es posible traer, pero si en cuanto se refiere a volumen. Sin embargo, se realizaron pruebas con varias formulaciones de solución espumosa, partiendo de experiencias realizadas por otros autores. La solución espumosa que mejor resultado produjo, fue la que incorpora un agente tensioactivo, un espesante y un estabilizante de espuma.^[6]

El agente espumógeno escogido, fue un tensioactivo noanionico (Sulfonato de Alquilbenzeno), los aditivos utilizados fueron; como espesante, CMC (Carbo Metil Celulosa), y como estabilizantes, PVA (Poli Vinil Acetato).

La solución espumosa esta constituida por la siguiente relación;

- | | |
|--|------------|
| ▪ <i>Porcentaje de tensoactivo en la solución acuosa</i> | <i>8%</i> |
| ▪ <i>Porcentaje de espesante en la solución</i> | <i>8%</i> |
| ▪ <i>Porcentaje de estabilizante el la solución</i> | <i>6%</i> |
| ▪ <i>Agua</i> | <i>78%</i> |

Por otro lado, se tiene la relación en peso por unidad de volumen;

- | | |
|---|---------------------|
| ▪ <i>Proporción de tensoactivo en la solución</i> | <i>2,1 gr/litro</i> |
| ▪ <i>Proporción de espesante en la solución</i> | <i>2,1 gr/litro</i> |
| ▪ <i>Proporción de estabilizante en la solución</i> | <i>150 gr/litro</i> |

Con estos dos parámetros, se calcula la cantidad de cada componente para elaborar un metro cúbico de solución espumógena:

- *Tensoactivo* $2,1\text{gr/litro} \cdot 1000 \text{ litros} \cdot 0,08 = 168 \text{ gr/m}^3$
- *Espesante* $2,1\text{gr/litro} \cdot 1000 \text{ litros} \cdot 0,08 = 168 \text{ gr/m}^3$
- *Estabilizante* $150\text{gr/litro} \cdot 1000 \text{ litros} \cdot 0,06 = 9000 \text{ gr/m}^3$
- *Agua* $1000 \text{ litros} \cdot 0,78 = 780 \text{ litros/m}^3$

Las normas ASTM C 796 y ASTM C 869, contienen regulaciones con relación a las espumas utilizadas en el Hormigón Celular. Cuando se trate de un agente espumógeno, adquirido en el mercado, se deberá encontrar la disolución correcta con el fin de obtener una buena solución espumosa, se sugiere empezar con una relación 1:40 esto es, un litro de agente espumógeno por 40 litros de agua.

CARACTERISTICAS	VALORES TÍPICOS	ESPECIFICACIÓN
Apariencia	Líquido viscoso	–
Substancia activa	89	88 – 90
Ácido sulfurico libre %	6,0	5,5 – 6,5
Materia insulfonada %	0,6	máximo 1,0
Índice de acidez	160	–
Densidad a 25 °C	1,08	–
Biodegradabilidad ASTM D 2667	98%	mínimo 96%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.4. Características del agente tensioactivo

6.2. DISEÑO DE LA MEZCLA

En la actualidad, no existe un método específico de dosificación para el Hormigón Celular, los métodos que se utilizan para morteros y hormigones convencionales no son apropiados, sin embargo, la guía ACI 523.3R, considera que los Hormigones Celulares deben ser tratados como hormigones elaborados con agregados pétreos, ya que algunas de las características estructurales son las mismas. Las propiedades en algunos casos, son también función del esfuerzo a la compresión, además, la relación entre el esfuerzo a la compresión y las propiedades de fuerza y rigidez del Hormigón Celular, son en general, las mismas que las de un hormigón convencional.

Para el diseño de la mezcla del Hormigón Celular se comienza con la designación de dos parámetros básicos; la densidad final deseada y la resistencia a la compresión. A diferencia de una mezcla convencional de hormigón, donde las cantidades y proporciones apropiadas de los materiales están basados en el volumen absoluto, los elementos de la mezcla de Hormigón Celular, están fundamentados en el peso de los materiales y deben incluir tanto el peso unitario húmedo como el peso unitario seco, como también, el esfuerzo final a la compresión.

Las proporciones de la mezcla, inicia con la selección del peso por unidad de volumen del hormigón fresco (densidad), el contenido de cemento y la relación agua cemento, siempre en peso, de acuerdo a la fuente utilizada. La guía ACI 523.3R-93 provee una tabla denominada “*Esfuerzo a la compresión típica del Hormigón Celular utilizando cemento portland Tipo I*”. Tabla 6.5.

DENSIDAD EN Kg/m ³	RELACION		CEMENTO Kg/m ³	COMPRESIÓN EN Kg/cm ²
	ARENA	AGUA		
800	0,79	0,60	335	17,20
800	0,55	0,50	390	20,70
800	0,29	0,50	446	27,60
960	1,27	0,60	335	24,10
960	0,96	0,50	390	27,60
960	0,65	0,50	446	34,50
1120	1,75	0,60	335	31,00
1120	1,37	0,50	390	34,50
1120	1,06	0,45	446	41,40
1280	2,22	0,60	335	41,40
1280	1,78	0,50	390	44,80
1280	1,42	0,45	446	48,30
1440	2,85	0,45	335	75,90
1440	2,19	0,50	390	75,90
1440	1,78	0,45	446	8,97
1600	3,18	0,60	335	86,20
1600	2,65	0,45	390	117,30
1600	2,14	0,45	446	124,10
1760	3,66	0,60	335	137,78
1760	3,06	0,45	390	179,40
1760	2,44	0,50	446	172,40
1920	3,32	0,60	390	228,90
1920	2,80	0,50	446	240,27

Fuente: Tomado de ACI 523

Tabla 6.5. Compresión típica del Hormigón Celular ACI 523

Si bien es una guía clara y fácil de manejar, los fabricantes de Hormigones Celulares y de agentes espumógenos simplifican y proporcionan tablas con diversos tipos de dosificaciones, partiendo del peso por unidad de volumen, densidad, y las proporciones en peso tanto del cemento, el agua y la arena, mientras que la cantidad de espuma necesaria es medida en volumen. De acuerdo con las especificaciones de la Tabla 6.5, se procede al diseño del Hormigón Celular.

Se desea elaborar un m³ de Hormigón que tenga un peso específico unitario fresco de 960 Kg/m³ para obtener una densidad seca de 800 Kg/m³ y resistencia a la compresión de 24,1 Kg/m² (2,36 MPa). Valor suficiente para conformar una base

Cálculos:

De la Tabla 6.5, (guía ACI 523), se tiene; para una densidad fresca de 960 Kg/m³, se utiliza 335 Kg/m³ de cemento, la relación agua cemento es $a/c = 0,60$, para un diseño, con resistencia a la compresión final, de 24,10 Kg/cm².

- Calibración del generador de espuma para:

<i>Salida de espuma</i>	<i>0,15 m³/min.</i>
<i>Densidad de la espuma</i>	<i>50 Kg/m³</i>
<i>Salida de aire</i>	<i>0,14 m³/min.</i>

- $\frac{\text{Salida de espuma}}{\text{Salida de aire}} = \frac{0,15 \text{ m}^3/\text{min}}{0,14 \text{ m}^3/\text{min}} = 1,0714$

- Datos generales:

<i>Peso específico del cemento</i>	<i>3,15</i>
<i>Peso específico de la arena</i>	<i>2,64</i>
<i>Peso específico del agua</i>	<i>1000 Kg/m³</i>

- Pesos y volúmenes para un metro cubico

$$\text{Mezcla} = 1 \text{ m}^3 \times 960 \text{ Kg/m}^3 = 960 \text{ Kg peso total}$$

$$\text{Cemento} = 335 \text{ Kg} * \frac{1}{3,15 * 1000 \text{ Kg/m}^3} = 0,106 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua} = 0,60 * 335 \text{ Kg} = 201,0 \text{ Kg} * \frac{1}{1000 \text{ Kg/m}^3} = 0,201 \text{ m}^3$$

<i>Totales:</i>	<i>En Peso</i>	<i>335 Kg + 201,0 Kg = 536,0 Kg</i>
	<i>En Volumen</i>	<i>0,106 m³ + 0,201 m³ = 0,307 m³</i>

- Arena requerida: Peso total de la mezcla – peso de cemento + agua

$$960 \text{ Kg} - 536,0 \text{ Kg} = 424,0 \text{ Kg}$$

$$424,0 \text{ Kg} * \frac{1}{2,64 * 1000 \text{ Kg/m}^3} = 0,161 \text{ m}^3$$

- Volumen total cemento+agua+arena = $0,307\text{m}^3 + 0,161 \text{ m}^3 = 0,468 \text{ m}^3$

$$\text{Aire requerido} = 1 \text{ m}^3 - 0,468 \text{ m}^3 = 0,532 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de espuma} = 0,532 \text{ m}^3 * 1,0714 = 0,570 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua en la espuma} = 50 \text{ Kg/m}^3 * 0,570 \text{ m}^3 = 28,50 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua en la arena (se asume 2\%)} = 0,02 * 424,0 \text{ Kg} = 8,48 \text{ Kg}$$

- Corrección de agua = $201,0 \text{ Kg} - 28,50 \text{ Kg} - 8,48 \text{ Kg} = 164,02 \text{ Kg}$

- Corrección de arena = $424,0 \text{ Kg} + 8,48 \text{ Kg} = 432,48 \text{ Kg}$

- Mezcla final para un metro cúbico de Hormigón Celular, de acuerdo con el diseño y realizada las correcciones debidas:

$$\text{➤ Cemento} \quad \quad \quad \mathbf{335,00 \text{ Kg}}$$

$$\text{➤ Agua de amasado} \quad \quad \quad \mathbf{164,02 \text{ Kg}}$$

$$\text{➤ Arena} \quad \quad \quad \mathbf{432,48 \text{ Kg}}$$

$$\text{➤ Espuma} = \frac{0,570 \text{ m}^3}{0,15 \text{ m}^3/\text{min}} = \mathbf{3,80 \text{ minutos}}$$

Con esta dosificación, para el diseño de Hormigón Celular con Espuma, se prepararon las probetas, según las normas ASTM, las mismas que sirvieron para las respectivas pruebas y ensayos.

6.2.1. Elaboración de la mezcla

Una vez que se ha diseñado, se procede a la elaboración del Hormigón Celular, se pesan los materiales; cemento, arena. Se prepara; el compresor que debe disponer de al menos 4 bars de presión, con salida constante; el generador de espuma; el recipiente calibrado; y por supuesto, la solución espumosa.

Se introduce la solución espumosa en el generador de espuma, se conecta la línea de aire al generador y se empieza a producir espuma. Se llena de espuma el recipiente calibrado, (ver proceso la página 147) que posteriormente se pesa para el cálculo de la densidad de la espuma que podrá estar entre 32 Kg/m^3 y 64 Kg/m^3 .

En la mezcladora se introduce, $\frac{3}{4}$ del agua de amasado, la arena y el cemento, formando una masa homogénea. Enseguida se incorpora el resto del agua y la espuma producida en el generador, el tiempo necesario previsto en el diseño, las cantidades de material están en relación con la capacidad de la mezcladora.



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.1. Generador de espuma



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.2. Espuma en la mezcla

6.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

6.3.1. Arena

Analizados los resultados de la muestra modificada San Antonio, como se observa en el Gráfico 6.1, que la curva granulométrica no se encuentra dentro de los límites previstos en el ASTM C 33, sin embargo, presenta una distribución apropiada de partículas. El módulo de finura es de 1,44 y tampoco esta dentro de límites previsto por la norma ASTM C 125 (2,3 a 3,1).

Se calcula el coeficiente de uniformidad de acuerdo al gráfico de granulometría y según la siguiente fórmula;

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

	Muestra San Antonio Modificada
<i>D60 (mm)</i>	0,418
<i>D10 (mm)</i>	0,047
<i>C_u</i>	8,89

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.6. Determinación del coeficiente de uniformidad

Se confirma lo observado en la curva granulométrica; la muestra modificada de San Antonio, grafica una curva bien graduada con mayor dispersión de tamaños, teniendo un valor de $C_u = 8,89$, con estos datos y acuerdo al tamaño de los granos se puede afirmar que se trata de una arena fina.

6.3.2. Consistencia de la mezcla

Para la determinación de la consistencia, se adoptó los procedimientos previstos en la norma ASTM D 6103. Como se ha repetido en varias ocasiones a lo largo del presente estudio, el Hormigón Celular es un material autocompactante, de baja resistencia, con una consistencia fluida que se pretende usar como alternativa a la base y subbase compactadas, de material pétreo. La fluidez en el Hormigón Celular, es muy importante, ya que la mezcla debe fluir en el lugar y consolidarse de acuerdo a su propia consistencia, sin necesidad de vibración o agitación con maquinaria.

En el procedimiento se utilizó un cilindro de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura, abierto en ambos extremos. Una vez lleno el cilindro, se procedió a vaciar el material sobre una placa plana metálica, horizontal, ligeramente humedecida (Figura 6.3.), enseguida se midió el diámetro en que se dispersó la muestra, el valor se alcanzó fue de 200 mm, el ideal para este tipo de material.



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.3. Ensayo de consistencia del Hormigón Celular

6.3.3. Aire incorporado a la mezcla

El Hormigón Celular es un material que incorpora aire que va desde el 20% al 60%, siempre es necesario controlar este porcentaje, debido principalmente, a la relación que existe entre la densidad y la cantidad de aire que se llegue a introducir en la mezcla. Se mencionó anteriormente que una variación del 5% de aire modifica la cantidad de cemento entre 8 y 12 Kg/m³, aumentando o reduciendo el volumen de la mezcla en 50 litros/m³.

Para la determinación del porcentaje de aire incorporado de acuerdo a la norma ASTM D 6023 (método gavimétrico), se procedió, en primer lugar, al cálculo del peso por unidad de volumen. Para el efecto se empleó un recipiente cilíndrico metálico de aproximadamente 7000 cm³, el cual se llenó con Hormigón Celular en dos capas, con leves golpes laterales, para evitar se formen cavidades en el interior de la mezcla y garantizar que el material tome la forma del recipiente. El recipiente fue pesado antes y después de llenado. Figuras 6.4 y 6.5.



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.4. Llenado del recipiente



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.5. PUV

El Peso por Unidad de Volumen se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$PUV = \frac{\text{Peso Total} - \text{Peso del Recipiente}}{\text{Volumen del Recipiente}}$$

$$PUV = \frac{10.28Kg - 3.54Kg}{0.00702m^3} = 960,11 Kg/m^3$$

- Densidad de la espuma calculada 54 Kg/m³
- Valor del PUVt calculado 1458,45 Kg/m³

El porcentaje de aire se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de aire} = \frac{PUVt - PUV}{PUVt} \times 100$$

$$\% \text{ de aire} = \frac{1458,45 - 960,11}{1458,45} \times 100 = 34,17\%$$

Ya se refirió, anteriormente, la importancia de controlar el porcentaje de aire incorporado a la mezcla, se mencionó, que toda variación modifica la cantidad de cemento, disminuyendo o aumentando el volumen de la mezcla, por este argumento, se requiere la comprobación del resultado obtenido, sondeando por medio de otro método. El procedimiento alternativo, es el que se describe en la norma ASTM C 173, denominado *método volumétrico*, y que se inicia llenando un recipiente cilíndrico, compuesto de dos partes, una inferior y otra superior que encaja en la anterior por medio de un empaque y abrazadera, esta con una sección en forma de cuello transparente, graduado, cuyo extremo superior roscado, permite el ajuste hermético de un tapón, para prevenir el derrame del contenido cuando se lo invierte o se lo

hace rodar, completamente armado y lleno del hormigón. Una vez listo el recipiente, se procede a incorporar agua, alcohol isopropilo, y nuevamente agua hasta que aparezca, en el cuello, la cantidad del líquido añadido. Se tapa herméticamente el medidor y se empieza a invertirlo y agitarlo alternativamente hasta lograr que el hormigón se desprenda de la base, enseguida, con una mano se lo toma por el cuello, mientras la otra mano, lo agita con movimiento de rotación. Luego de esto, se coloca al medidor sobre una mesa, se destapa permitiendo que el aire suba hasta que se estabiliza. Por medio de una taza calibrada, se agrega agua, por el cuello del recipiente, hasta obtener la medida del contenido de aire. Figuras 6.6 y 6.7

MATERIAL	UNIDAD	Valor	
		ASTM D 6023	ASTM C 173
PUV	Kg/m ³	960,11	960,11
% de aire calculado	%	34,17	43,00
ASTM D 6103	m	0,20	0,20
Relación a/c	—	0,60	0,60

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.7. Propiedades de Hormigón Celular fresco



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.6. Recipiente lleno



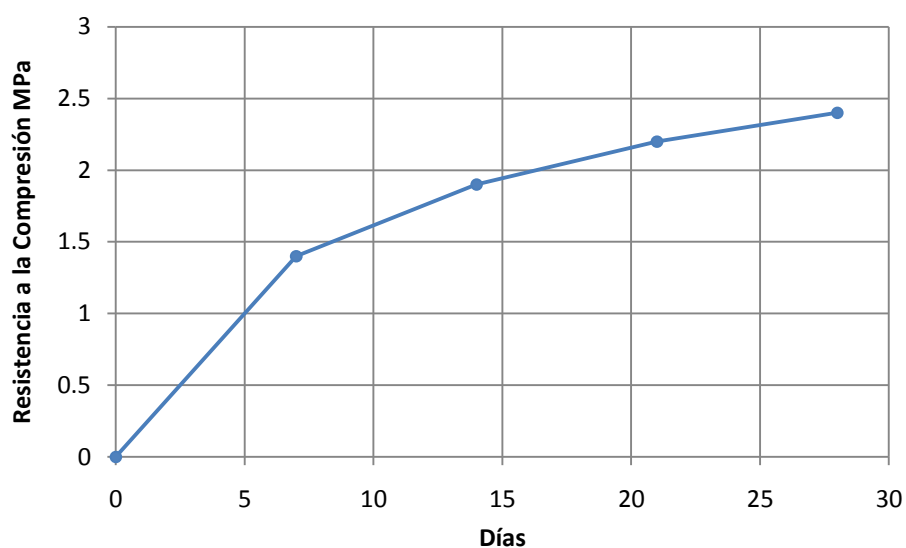
Fuente: Fotografía propia

Figura 6.7. Medición de contenido de aire

6.3.4. Resistencia a la compresión

Para encontrar la resistencia a la compresión del Hormigón Celular, se seleccionó probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm normalizadas, las mismas que fueron llenadas en tres capas, proporcionando pequeños golpes laterales a los cilindros para evitar se creen cavidades con el aire atrapado y forzando al material a tomar la forma del recipiente. Las probetas fueron ensayadas en intervalos de 7 días, 14 días y 28 días luego de elaboradas, preparadas y curadas de conformidad con las normas ASTM C 39.

En los tiempos previstos para los ensayos, se retiraron los cilindros correspondientes de las cámaras de humedad y luego de esperar un tiempo prudencial se procedió a realizar las pruebas de resistencia a la compresión de las probetas. Los resultados obtenidos, fueron debidamente analizados, tomando los valores promedios registrados en cada probeta ensayada y representados en el Gráfico 6.2.



Fuente:Elaboración propia

Gráfico 6.2. Evolución de la Resistencia a la Compresión

Al observar el Gráfico 6.2, se puede deducir que los resultados promedios obtenidos en el ensayo, están dentro de los parámetros esperados. Durante el análisis de los resultados, se observó algunos valores de resistencia ligeramente superiores, fenómeno que se podría explicar por el tipo de curado, la humedad, cantidad de agua en los poros, hace que al momento del ensayo existan pequeñas variaciones.

En las Figuras 6.6. y 6.7, se observa con bastante claridad el fenómeno que sucede, y el tipo de falla que se presenta en las probetas al momento del ensayo. Al aplicar carga, inicialmente se produce un aplastamiento y luego empieza a romperse en la parte superior, si se continúa aplicando carga, la falla ocurre a lo largo de la probeta, paralela a la carga (Figura 6.7.), mientras que en la Figura 6.8, se distingue la falla en la parte superior, y la apariencia interna del espécimen, donde se puede observar con bastante claridad los espacios o cavidades dejados por la espuma preformada en el interior del Hormigón Celular.



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.8. Inicio de falla



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.9. Al continuar la carga



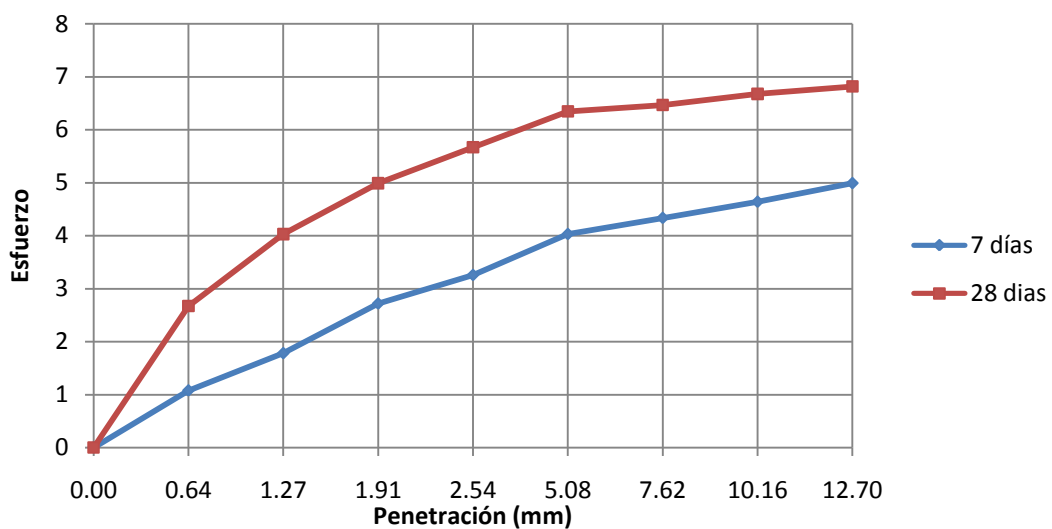
Fuente: Fotografía propia

Figura 6.10. Falla típica

6.3.5. Valor de Soporte Relativo, CBR

En la determinación del valor de soporte relativo, se utilizaron doce cilindros normalizados, diseñados para determinar el CBR de suelos mejorados con materiales pétreos. Antes de empezar el llenado de los cilindros, se procedió al retiro del collar superior, el Hormigón Celular se vertió en los moldes hasta rebosar y luego se enrasaron y almacenaron en un lugar fresco (al aire), hasta el momento mismo del ensayo del CBR, a los 7 días y 28 días, después de haber sido elaborados.

Si bien la prueba del CBR no es la más indicada para evaluar el desempeño del Hormigón Celular, se realizó este ensayo para tener una referencia entre la resistencia a la compresión, con el método tradicional usado en vías, para medir la capacidad de soporte de un suelo. De las seis probetas ensayadas a los 7 y 28 días respectivamente, se obtuvieron los promedios para dibujar la curva del Gráfico 6.3, donde se observa la evolución los esfuerzo unitarios.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 6.3. Esfuerzo a la penetración promedio a los 7 días y 28 días

$$CBR = \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{\text{Carga Unitaria Patrón}} \times 100$$

Para 2,5 mm de penetración

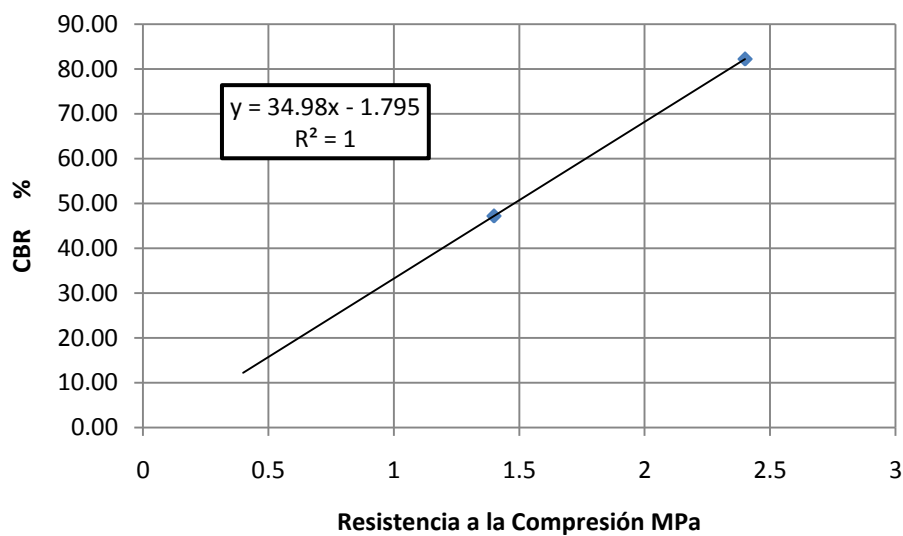
a 7 días $CBR = \frac{3,26 \text{ Mpa}}{6.9 \text{ Mpa}} \times 100 = 47,18\%$

a 28 días $CBR = \frac{5,67 \text{ MPa}}{6.9 \text{ MPa}} \times 100 = 82,17\%$

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS		
Edad días	Resistencia a compresión MPa	CBR %
7	1.4	47,18
14	1.9	
28	2.4	82,17

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.8. Resultados de ensayos a Compresión y CBR



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 6.4. Correlación Resistencia a la Compresión-CBR

En el Gráfico 6.4 se puede advertir la buena correlación que existe entre el CBR y la resistencia a la compresión para Hormigón Celular. En el ajuste de la recta de regresión, sobre los valores obtenidos, el valor del coeficiente de regresión es 1, el valor máximo, entonces, se puede asegurar que para encontrar el CBR de una

muestra de Hormigón Celular, de la misma densidad, bastará con aplicar la relación encontrada durante los ensayos, esto es:

$$CBR = 34,98x - 1,795$$

De acuerdo a los resultados obtenidos es importante comentar, que si bien, el método aplicado, ASTM D 1883, muestra el comportamiento bajo carga del Hormigón Celular, similar a un suelo bien compactado, no proporciona en detalle las propiedades y características del material. El ensayo de CBR se debería tener como referencia pero no necesariamente, realizar la prueba. En el presente estudio se justifica el ensayo pensando, siempre, que el Hormigón Celular, una vez endurecido, va a prestar un servicio funcionando como un suelo compactado. Para futuras experiencias con Hormigón Celular, se recomienda buscar otras alternativas que permitan encontrar mejores resultados en cuanto se refiere a comportamiento, características y propiedades.



Fuente: Fotografía propia

Figura 6.11. Ensayo de CBR

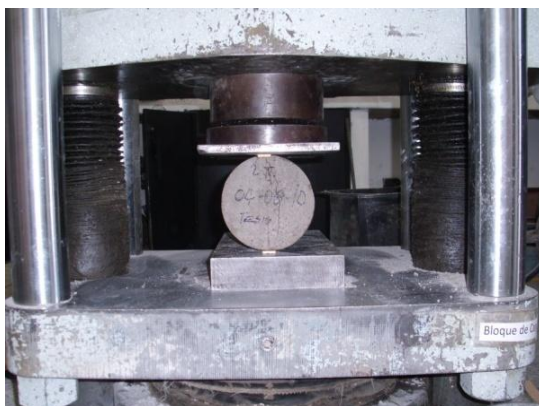


Fuente: Fotografía propia

Figura 6.12. Penetración en la probeta

6.3.6. Resistencia a la Tracción Indirecta

La prueba de tracción indirecta se realizó con cilindros de 150 mm x 300 mm de acuerdo con la norma ASTM C 496 a los 7 días, 14 días y 28 días. En primer lugar, se determinó el diámetro del espécimen, luego se realizó la medición de la longitud y posteriormente, el peso de los especímenes, además se dibujó la correspondiente diagonal en cada uno de los extremos del cilindro, para permitir el centrado correcto en la máquina. Se procedió a colocar las regletas de madera contrachapada de 3 mm en los extremos, superior e inferior de la probeta, justamente por la línea del diámetro trazado. Luego se alineó y centró el cilindro perfectamente, de manera que quedó directamente bajo el centro de empuje de la máquina, Figura 6.13. Una vez verificado que el indicador de carga estaba en cero, se aplicó carga continua sin parar, a una velocidad constante, dentro del rango de 1,7 MPa a 1,4 MPa por minuto, se provocó la falla por fatiga de la probeta, los resultados obtenidos se representan mediante el dibujo de una curva (Gráfico 6.5.)



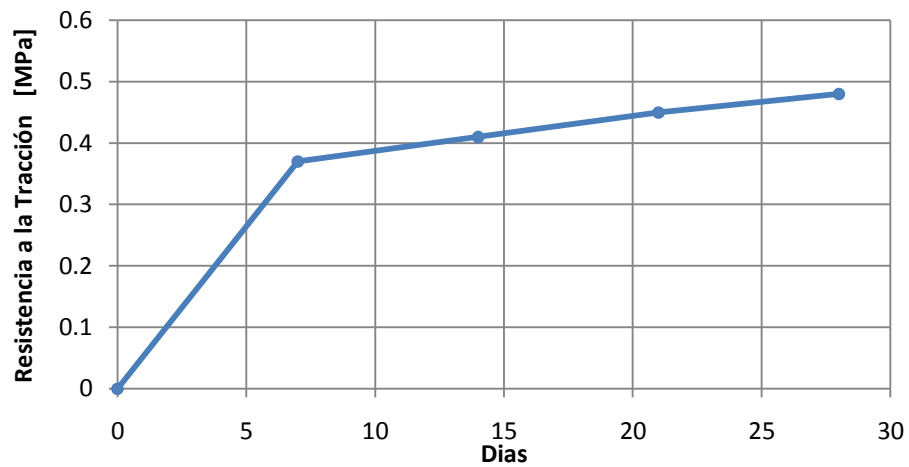
Fuente: Fotografía propia

Figura 6.13. Preparación del ensayo



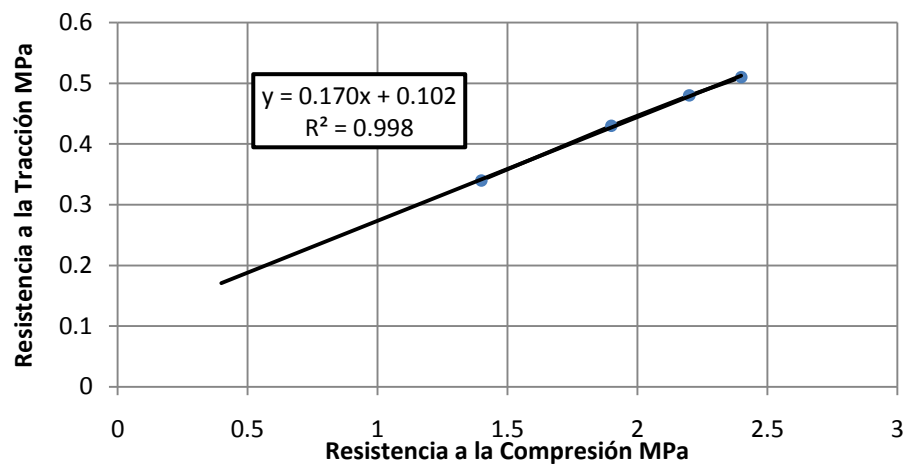
Fuente: Fotografía propia

Figura 6.14. Falla por el diametro



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 6.5. Evolución de la resistencia a tracción



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 6.6. Relación entre resistencia a la tracción y la compresión

De manera similar a la relación entre el CBR y la resistencia a la compresión, se puede desarrollar una correlación entre la tracción indirecta y la resistencia a la compresión Gráfica 6.6. De manera que, cuando se requiera encontrar la tracción, bastará con calcular, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\text{Tracción} = 0.170x + 0.102$$

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se desarrolló Hormigón Celular con Espuma para llegar a encontrar, sus propiedades físicas y mecánicas. Se estudió la aptitud de este material para ser utilizado como alternativa a la base y subbase granular, en un pavimento rígido o flexible, tomando en cuenta las propuestas alcanzadas en otros estudio relacionados, fuera del Ecuador, que les ha permitido emitir normas y recomendaciones, con relación al tema de Hormigones Celulares.

En la preparación y elaboración de las muestras, destinadas a las pruebas normalizadas de laboratorio, fue necesario el conocimiento previo de los componentes que conforman este material; cemento, arena, agua, y espuma preformada. Una vez encontrada la dosificación adecuada, se preparó el material, que luego de ser ensayado, se alcanzó información importante sobre su comportamiento en estado fresco y endurecido.

Con los resultados obtenidos se puede deducir lo siguiente:

- El resultado de los ensayos convencionales para compresión, ASTM C 39, solamente proporciona datos cuando las cargas son bajas. Por lo contrario para cargas más altas no captura detalles del comportamiento del Hormigón Celular debido a la iniciación temprana de fisuras, cuando esto ocurre la máquina universal para automáticamente, ya que considera que es una falla.
- Los valores máximos; de resistencia a la compresión llegan a 2,4 MPa, de tracción indirecta a 0,48 MPa, el CBR a 82%, para especímenes ensayados a los 28 días, parámetros adecuados para remplazar la base y subbase.
- El tiempo y tipo de curado influye en desarrollo de las resistencias.

Conociendo estas propiedades se evalúa el material llegando a las siguientes resultados:

- Existe una relación directa densidad-resistencia de forma que al aumentar la densidad aumenta también la resistencia. Hay una correlación entre la resistencia a la compresión, CBR y la resistencia a la tracción indirecta.
- Para mejores resultados, el módulo de finura de la arena, debe estar entre 1,4 a 1,7, y el porcentaje de absorción menor o igual a 2, sin embargo, sirven arenas con porcentaje de absorción mayor a 2.
- Al aumentar de relación arena-cemento, se incrementa la densidad y por lo tanto, mayor resistencia final. El material mantiene densidad uniforme, cuando la espuma preformada se mantiene estable.
- La relación agua-cemento debe mantenerse alrededor de 0,60 para evitar segregación y disminución en resistencias finales.

Con todo lo mencionado se llega a la conclusión final que:

1. El Hormigón Celular con Espuma, desarrollado en el presente estudio, cumple con las expectativas planteadas, con parámetros ajustados a los requerimientos y normas para la construcción, por lo tanto, se considera un material apto para ser usado como alternativa a la base y subbase convencionales, conformadas con materiales pétreos.
2. El Hormigón Celular forma una nueva estructura con mejores características y propiedades. La capa de rodadura del pavimento, se reduce debido a que la nueva estructura, posee mejores cualidades de resistencia que la base y subbase de material pétreo.
3. Si bien, por el costo inicial relativamente alto, comparado con los costo de base y subbase, se pueden llegar a encontrar alternativas que economicen y optimicen el uso de materiales, por ejemplo, la utilización de cenizas volantes, para reemplazar parte del cemento.
4. Al eliminar un componente (base o subbase), repercute en los costos y representa un ahorro considerable en el presupuesto de las obras viales.
5. El Hormigón Celular representa un ahorro en el mantenimiento, y permite realizar excavaciones en futuras reparaciones.



Fuente:Elaboración propia

Figura: 7.1. Corte transversal de un pavimento con Hormigón Celular

7.2. RECOMENDACIONES

Debido al trabajo experimental desarrollado, en el presente estudio, se pueden enumerar algunas recomendaciones.

- Mucha precaución al momento de elaborar la espuma preformada, la cantidad agente espomógeno, de agua, y sobre todo, la cantidad de aire utilizados son claves para la obtención de una densidad optima.
- Es preferible aumentar poco a poco la cantidad de espuma, hasta alcanzar la consistencia deseada, que echar a perder la mezcla por exceso de agua.
- Para obtener una mejor homogenización de la mezcla, planificar el tiempo de mezcla del cemento con la arena y el agua, y posteriormente también, con la espuma. Si es necesario se recomienda modificar la mezcladora, poniendo láminas sólidas (plástico, caucho, madera o metal) con el objeto de sellar el espacio existente entre las aspas.
- Siempre que se utilice arena localizada cerca a las obras, será necesario evaluar y realizar las pruebas necesarias para determinar su idoneidad, de todas maneras, la utilización de agregado fino próximo a los proyectos, repercutirán en los costos finales.
- Controlar detenidamente la dosificación del Hormigón Celular con Espuma, la relación agua-cemento, la densidad y calidad de espuma incorporada, de esto dependerá, en gran medida, el éxito o el fracaso.
- De acuerdo con el tipo de proyecto, se sugiere realizar un análisis costo beneficio comparando con los métodos tradicionales, de tal manera de tomar la mejor alternativa.

En la presente disertación, se incluye una comparación de costos entre un pavimento convencional y otro con Hormigón Celular con Espuma, de acuerdo al análisis de precios unitarios elaborado.

En ambos casos no se toma en cuenta los costos indirectos, se entiende que representarán el mismo porcentaje. Cuando se trata de un pavimento convencional, el transporte significará un rubro importante, si se tiene en cuenta la distancia del proyecto a las fuentes de provisión de los materiales pétreos necesarios, para la conformación de la base y la subbase. En el caso del Hormigón Celular los materiales se mezclan en el mismo lugar donde se desarrollan las obras.

➤ **Pavimento convencional:**

<i>Precio Unitario de Subbase</i>	<i>18,70 dólares</i>
<i>Precio Unitario de Base</i>	<i>25,11 dólares</i>
<i>Total</i>	<i>43,81 dólares.</i>

➤ **Pavimento con Hormigón Celular:**

<i>Precio Unitarios de la estructura</i>	<i>50,35 dólares</i>
<i>Total</i>	<i>50,35 dólares</i>

Existe una diferencia, la cual representa un valor mínimo que seguramente se puede diluir al momento de incluir el costo del transporte de los materiales, aparte de otros beneficios: rapidez en la ejecución, facilidad de colocación y apertura temprana de las vías ejecutadas.

7.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

7.3.1. Ventajas

Las ventajas del uso del Hormigón Celular con Espuma Preformada, en comparación con la base y subbase tradicionales, se pueden resumir de la siguiente manera:

- Propiedades estructurales superiores. Usar Hormigón Celular como base y subbase forma una estructura de pavimento extremadamente rígida, extendiendo la vida de la vía y reduciendo los costos de mantenimiento.
- Si bien el costo inicial no representa un atractivo, sí lo es el tiempo de aplicación y la habilidad de llegar a rincones peligrosos y poco accesibles.
- Velocidad en construcción. Sin esperar que la base y subbase se consoliden, no necesita remover ni reemplazar el suelo existente, mínima excavación, reduce o elimina la necesidad de consolidar la subrasante, elimina la necesidad de compactar con maquinaria pesada.
- Facilidad de colocación. El Hormigón Celular puede ser vertido en el suelo natural y se lo puede nivelar a los espesores requeridos.
- Menos excavación. El Hormigón Celular generalmente reemplaza de dos a tres veces el espesor de la base y subbase granular, de esta manera menos suelo para formar la subrasante, deberá ser excavado.
- Protección contra el clima. El Hormigón Celular usado como base y subbase protege y evita que el agua de las lluvias ingrese y deteriore la subrasante.
- Reduce la alteración de la subrasante. La compactación de la base y subbase granular provocan alteración y debilitamiento del subsuelo, el Hormigón Celular se nivela por sí mismo, sin necesidad de compactación ni vibración.

7.3.2. Desventajas

- En mucho ayuda la información internacional para la obtención y elaboración de este novedoso material, pero no existe normativa nacional.
- No se encuentra agentes espumógenos en el mercado local.
- El agregado fino debe ser tamizado previamente a partículas iguales o menores a 2 mm. Con este tamaño tiene mejor desempeño.
- Por su baja densidad y resistencia son limitadas las aplicaciones estructurales con este material.
- Debido a la porosidad, propia del Hormigón Celular, no se aconseja utilizar refuerzo de hierro.
- El Hormigón Celular con Espuma Preformada, no tiene una alta resistencia a la abrasión, por lo que siempre será necesario utilizar un recubrimiento. En el presente estudio, la estructura deberá estar revestida con una capa de hormigón asfáltico u hormigón hidráulico.
- El hormigón para resistir fuerzas horizontales debe poseer cierto peso, al momento del diseño tener sumo cuidado en la dosificación ya que la pérdida del peso inicial, debido al secado, puede llegar hasta un 25%.
- Por su fluidez, en su vertido y colocación son necesario encofrados para evitar que el material se disperse. Precaución al momento del vertido, las burbujas se destruyen con facilidad.
- Ciertos elementos constructivos, tales como tuberías, podrían flotar en el Hormigón Celular, por lo tanto será necesario anclarlos, antes del vertido.
- El Hormigón Celular no está diseñado para resistir, congelamiento, erosión por elementos naturales, a las acciones abrasivas, o el ataque de químicos.

7.4. LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

En el presente trabajo se ha desarrollado el estudio para el conocimiento general del Hormigón Celular con Espuma Preformada, con el fin de encontrar los requisitos y propiedades que debe poseer el material para ser utilizado como base y subbase, en vías de comunicación, sin embargo, siempre quedarán inquietudes para lo que corresponderá realizar estudio posteriores. Sería muy interesante se lleguen a concluir todos los temas relacionados con el Hormigón Celular, de manera de disponer de un material altamente estudiado, debidamente probado, y, ante todo, establecer normas y procedimientos propios para su elaboración.

A continuación se enumeran algunos temas para investigaciones futuras;

- Comportamiento de la interfase Hormigón Celular-pavimento en condiciones de humedad y acción de diferentes tipos de cargas.
- Estudio físico-químico más profundo sobre estabilidad de las espumas.
- Investigar la incidencia en la resistencia a la compresión del tamaño de los poros dejados por la espuma preformada.
- Factibilidad de la fabricación de Hormigón Celular con Espuma a gran escala, en plantas especializadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. TERZAGHI V. Karl., PECK Ralph B. "Soil Mechanics in Engineering Practice", editorial John Willey & son (1997).
2. BOWLES Joseph E. "Foundation Analysis and Design", editorial McGraw-Hill (1977).
3. CRESPO VILLALAS Carlos. "Mecánica de suelos y cimentaciones", Limusa (2004).
4. CHOISY Auguste. "El arte de construir en Roma" (1999).
5. NEWMAN J.B., CHOO B.S. "Advanced Concrete Technology" Butterworth-Heinemann (2003)
6. GUERRA PANTOJA F.-FERNANDEZ R. "El Hormigón Celular como Alternativa de Construcción de Viviendas en Nuestro Medio". Tesis PUCE (1994)
7. DHIR, Ravindra K., HENDERSON Neil A. "Specialist Techniques and Materials for Concrete Construction". Conferencia Internacional en la Universidad de Dundee Escocia, Reino Unido, 8 – 10 de septiembre de 1999.
8. HENN Raymond W. "Practical Guide to Grouting and Underground Structures" editorial Thomas Telford (1996).
9. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S). "Structural foams" Building Research Institute. Tema III "Foamed Concrete" (1991).
10. PRUD'HOMME, Robert K., KHAN Saad A. "Foams: Theory, Measurements, and Applications, Volumen 1995, pág. 315
11. RAMACHANDRAN, Vanguipuram S. "Concrete Admixtures Handbook: Properties, science, and technology" (1995), pág. 518
12. LAMOND Joseph F., PIELERT J.H. "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials" ASTM International (2006). Capítulo 47 pág. 561
13. AASHTO T 27 "Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates"
14. AASHTO T 89 "Standard Method of Test for Determining The Liquid Limit of Soils.
15. ASTM D 422 "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils" (2007).
16. ASTM D 4318-10 "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils"
17. ACI 523.1R-06 "Guide for Cast-in-Place Low-Density Cellular Concrete", (2006)
18. ACI 523.2R-96 "Guide for Precast Cellular Concrete Floor, Roof, and Wall Units" (1996)
19. ACI 523.3R-93 "Guide for Cellular Concretes Above 50 pcf, and Aggregate Concretes Above 50 pcf with Compressive Strengths Less Than 2500 psi", (1993)

20. ACI 318M-02 “Building Code Requirements For Structural Concrete”, (2001)
21. CELLULAR CONCRETE LLC “Method for Sampling and Testing Low Density Cellular Concrete Cylinders”. Technical Bulletin. www.cellular-concrete.com
22. ASTM C 776-04 “Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam”, (2004)
23. ASTM C 869-91 “Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete”, (2006)
24. ASTM C 495-07 “Standard Test Method for Compressive Strength Of Lightweight Insulating Concrete”, (2007)
25. NATINAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. “Guide Specifications for Controlled Low Strength Materials (CLSM)” <http://flowablefill.org> (2008)*
26. FOAM CONCRETE LIMITED. “Foam Concrete Basis” www.foamconcrete.co.uk
27. LIGHT CONCRETE LLC. “High-Strength Structural Light Weight Concrete” www.lighconcrete.com/image/LightConcrete.pdf (2008)*
28. 1593 MONOGRÁFICO CENTENARIO. www.docs.google.com (2008)*
29. SHUBMAM ENGINEERS. www.shubhameng.com/lightweight.html (2008)*
30. FOAMED CONCRETE. www.foamconcrete.co.uk (2008)*
31. CELLULAR CONCRETE. www.cematrix.com (2008)*
32. PAN PACIFIC ENGINEERING PTY LTD. “Manual Técnico Concreto Aireado Liviano” www.litebuild.com (2008)*
33. PROVOTON FOAM CONCRETE. www.provoton.com (2008)*
34. *CEFOCON* www.cellularfoamconcrete.com (2008)*
35. CEMENT ADMIXTURES ASSOCIATION www.admixtures.org.uk (2008)*
36. CRETEFOAMER BLOG. www.CreteFoamer.com (2008)*

Nota: * Año de consulta