

**CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA
TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL
SUR DE LA SABANA DE BOGOTA**



ING. DIEGO ROBERTO MARTINEZ PINEDA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AGRÍCOLA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA - ESTRUCTURAS
BOGOTA D.C.
2010**

**CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA
TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL
SUR DE LA SABANA DE BOGOTA**



ING. DIEGO ROBERTO MARTINEZ PINEDA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Magíster en Estructuras**

**ING. JORGE IGNACIO SEGURA FRANCO
Director Proyecto**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AGRÍCOLA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA - ESTRUCTURAS
BOGOTA D.C.
2010**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. Enero de 2010

A Dios por guiarme durante todos estos años por el camino del aprendizaje y por darme la sabiduría y fuerza necesarias, para culminar con éxito las metas que me he propuesto, me propongo y me propondré.

A mis padres y hermanos, por el cariño y apoyo incondicional que siempre me han otorgado. También a Luisa Fernanda por haber estado en los momentos en que la he necesitado.

A mis amigos, compañeros y profesores de la Universidad Nacional de Colombia, por haberme acompañado durante estos años en el cumplimiento de este gran sueño.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo, ejecución y finalización de la presente Tesis de Maestría, no fue posible sin contar con la participación de personas ó entidades que contribuyeron de forma directa o indirecta a la culminación de esta investigación; ya sea de forma académica, social, económica o moral.

Es importante aclarar que por la naturaleza compleja que implica un trabajo de investigación pionero en el país, fue necesaria la participación de personas relacionadas a diversas ramas interdisciplinarias de la ciencia de los materiales, que con sus aportes ayudaron al cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos. Para ustedes, mis más sinceros agradecimientos, ya que con sus contribuciones fue posible superar cada uno de los problemas que se presentaron en el desarrollo del presente trabajo.

Mención especial merece el ingeniero Jorge Ignacio Segura Franco, director del Proyecto de Investigación, a quien deseo agradecerle por depositar en mí su confianza para desarrollar este trabajo, y por el constante apoyo que me otorgó en todas las etapas del proyecto. Sinceramente creo, que él fue el directo responsable de la finalización exitosa de este trabajo, debido a su calidez humana, su constante apoyo moral y académico y al amor que siente por la Universidad Nacional de Colombia. También deseo agradecerle de forma enfática a la ingeniera Diana Carolina Rodríguez Ordóñez, quien me acompañó, asesoró y ayudó en toda la investigación y a la empresa Cementos ARGOS, que suministró toda la financiación del proyecto. Las personas que colaboraron en cada una de las etapas del proyecto fueron:

1. Consecución de un horno de quema con capacidad de llegar a 1300°C.

- Ing. Juan Guillermo Morales (investigador Cementos Argos S.A.).
- Ing. Juan Ernesto Vélez (asesor técnico de Argos S.A.).
- Ing. Claudia Villa (asesora comercial de Argos S.A.).
- Ing. Jorge Segura Franco (director del proyecto de investigación).

2. Consecución del Agregado Liviano de Venezuela (ALIVEN).

- Ella Cecilia Rodríguez; quien consiguió el ALIVEN en una Ferretería en Caracas (Venezuela) en momentos en que el material estaba bastante escaso, por lo que le agradezco de forma enfática y reiterada, por confiar en mí, a pesar de no conocerme.
- Leonel Tabares; quien envió el ALIVEN desde San Antonio del Táchira (Venezuela) hasta Bogotá D.C.

3. Consecución de materiales.

- Ing. Juan Ernesto Vélez, quien donó por medio de la planta de Cementos Argos S.A. en Fontibón (Bogotá), el cemento y la arena de río.
- Ing. Claudia Villa; quien donó por medio de la planta de Cementos Argos S.A. en Fontibón (Bogotá), el cemento y la arena de río.
- Ladrillera Landa de Soacha, la cual donó la arcilla de la investigación.
- Ing. Ramiro Tovar (Asesor Técnico de Sika-Colombia); quien donó el Incorporador de aire y el superplastificante.
- Ing. Jorge Segura Franco, Director del Proyecto de Investigación.

- Ing. Guillermo López.

4. Molienda y pulverización de la arcilla.

- Fernando Álvarez (Gerente de Arcillas y Gredas de Colombia); quien prestó sus instalaciones y equipos para triturar 500 kg de arcilla de Soacha.

5. Peletización y calcinación de la arcilla del sur de Bogotá.

- Ing. Juan Guillermo Morales; quien consiguió un horno con suficiente capacidad para calcinar 500 kg de arcilla a 1300°C.
- Grupo CORONA; empresa que prestó sus instalaciones en el municipio de Sabaneta para calcinar la arcilla.
- Yulián Quiroga; quien mostró el camino para el peletizado del material.

6. Información Académica.

- Ing. Juan Felipe Carvajal (Cementos Argos S.A.).
- Ing. Diana Carolina Rodríguez.
- Ing. Jorge Segura Franco.
- Ing. Gabriel Gómez.
- Tc. Julio Cesar Botia (Personal del Laboratorio de Hidráulica).
- Ing. Sergio Gaviria (Profesor asociado al Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia –Sede Bogotá-).
- Compañeros de la Maestría en Estructuras.

7. Ensayos químicos y mineralógicos.

- Ing. Sergio Gaviria.
- Marcela Pachón (personal de Ingeominas).
- Edward Salazar (personal de Ingeominas).

8. Ensayos de Laboratorio

- Ing. José Ricardo Martínez (director del laboratorio de estructuras y materiales); quien brindó su colaboración para la realización de los ensayos y siempre estuvo presto a ayudar ante cualquier dificultad.
- Tc. Pastor Riaño (personal del laboratorio de estructuras).
- Tc. Jorge Olarte (personal del laboratorio de estructuras).
- Tc. José López (personal del laboratorio de estructuras).
- Ing. Weimar García.
- Ing. Diego Velandia (Cementos Argos S.A.)

9. Análisis de Resultados y elaboración del informe.

- Ing. Jorge Segura Franco.
- Ing. Diana Carolina Rodríguez.

A todas estas personas, a los profesores de la Universidad Nacional, a mis amigos de la Maestría, por el apoyo moral que me dieron para finalizar con éxito la presente Investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	22
JUSTIFICACION	24
OBJETIVO GENERAL	25
OBJETIVOS ESPECIFICOS	25
ANTECEDENTES.....	26
1. MARCO TEORICO DE LOS AGREGADOS LIVIANOS.....	29
1.1 CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS LIVIANOS.....	29
1.1.1 AGREGADOS LIVIANOS NATURALES	29
1.1.2 AGREGADOS LIVIANOS ARTIFICIALES.....	30
1.1.3 AGREGADOS LIVIANOS ORGÁNICOS	32
1.2 TIPOS DE CONCRETO CON AGREGADOS LIVIANOS	32
2. MARCO TEÓRICO DE LAS ARCILLAS EXPANDIDAS TERMICAMENTE (AET)..	35
2.1 COMPOSICION DE LAS ARCILLAS	35
2.2 ARCILLAS EXPANDIDAS TERMICAMENTE (AET)	37
2.2.1 PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS EXPANDIDAS TÉRMICAMENTE	38
2.2.2 PROCESOS DE FABRICACIÓN INDUSTRIAL DE LAS ARCILLAS EXPANDIDAS TÉRMICAMENTE	41
2.2.2.1 Proceso Seco	42
2.2.2.2 Proceso Semihúmedo	43
2.2.2.3 Proceso Húmedo	43
2.2.3 ARCILLAS EXPANDIDAS TÉRMICAMENTE COMERCIALES	45
2.2.3.1 Aliven	45
2.2.3.2 Superlec	46
2.2.3.3 Arlita	46
2.2.3.4 Leca	47

2.2.4	REQUISITOS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS DE LAS ARCILLAS CON POTENCIAL DE EXPANDIR	48
2.2.4.1	Requisitos Químicos	48
2.2.4.2	Requisitos Mineralógicos	50
2.2.5	ADICIONES PARA INCREMENTAR LA EXPANSIÓN DE LAS ARCILLAS.....	55
2.2.6	PROCEDIMIENTOS DE EXPANSIÓN DE LAS ARCILLAS	56
2.2.6.1	Método de Pérsio de Suaza Santos	56
2.2.6.2	Método de Schellmann y Fastabend	56
2.2.6.3	Método de Viera de Suaza y Bergström Lourenço	57
2.2.6.4	Conclusiones de las investigaciones de Parra y Giraldo, con arcillas colombianas.	57
2.2.7	REQUISITOS DE LAS NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS, NTC 4045, PARA AGREGADOS LIVIANOS.....	58
3.	<u>MARCO TEORICO DEL CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL.....</u>	60
3.1	GENERALIDADES	63
3.1.1	DEFINICIÓN	63
3.1.2	REQUERIMIENTOS QUE DEBEN SATISFACER LOS AGREGADOS LIVIANOS.	63
3.1.3	VENTAJAS DE LOS CONCRETOS LIVIANOS.....	64
3.2	PROPIEDADES DEL CONCRETO LIVIANO FRESCO	65
3.2.1	MANEJABILIDAD.....	65
3.2.1.1	Factores que afectan la manejabilidad	65
3.2.1.2	Determinación de la manejabilidad	66
3.2.2	SEGREGACIÓN Y EXUDACIÓN	67
3.3	PROPIEDADES DEL CONCRETO LIVIANO ENDURECIDO	68
3.3.1	RESISTENCIA DEL CONCRETO LIVIANO	68
3.3.1.1	Resistencia a la Compresión.....	69
3.3.1.2	Resistencia a la Tracción	74
3.3.1.3	Módulo de Elasticidad	75
3.3.2	PESO UNITARIO DEL CONCRETO LIVIANO	77
3.3.3	CAMBIOS VOLUMÉTRICOS.....	78
3.3.3.1	Cambios volumétricos en estado plástico.....	79
3.3.3.2	Cambios volumétricos en estado endurecido.....	79

3.3.3.3	Deformación elástica y fluencia	81
3.4	DURABILIDAD DEL CONCRETO LIVIANO	82
3.4.1	PERMEABILIDAD	83
3.4.2	CONGELAMIENTO Y DESHIELO	84
3.4.3	CARBONATACIÓN Y CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO	85
3.4.4	PENETRACIÓN DEL IÓN CLORURO.....	86
3.4.5	RESISTENCIA A LOS ÁCIDOS.....	87
3.4.6	RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	88
3.4.7	RESISTENCIA AL FUEGO Y PROPIEDADES TÉRMICAS.....	89
3.4.8	CURADO.....	91
3.4.9	DETERMINACIÓN DE DURABILIDAD POR ENSAYOS.....	92
3.4.9.1	Ensayo de Absorción en frío, caliente y porosidad	92
3.4.9.2	Ensayo rápido de permeabilidad a los Cloruros	92
3.5	DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL.....	93
3.5.1	INFORMACIÓN REQUERIDA DE LOS MATERIALES	93
3.5.2	PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL.....	95
3.5.3	PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO.....	99
3.6	REQUISITOS DE LA NORMA TECNICA COLOMBIANA, NTC 4045, PARA CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL.....	100
4.	<u>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</u>	<u>102</u>
4.1	ARCILLAS EXPANDIDAS TERMICAMENTE DEL SUR DE BOGOTÁ	103
4.2	CONCRETO LIVIANO CON AGREGADOS LIVIANOS DE VENEZUELA (ALIVEN)	108
4.2.1	AGREGADOS LIVIANOS DE VENEZUELA (ALIVEN).....	108
4.2.2	CONCRETOS LIVIANOS ESTRUCTURALES CON ALIVEN.....	110
4.2.2.1	Materiales	110
4.2.2.2	Procedimiento.....	110
4.3	CONCRETO LIVIANO CON AGREGADOS LIVIANOS DEL SUR DE BOGOTÁ (ALISUR).....	113

4.3.1	ARCILLAS DEL SUR DE LA SABANA DE BOGOTÁ (ALISUR)	113
4.3.2	CONCRETOS LIVIANOS ESTRUCTURALES CON ALISUR	118
4.3.2.1	Materiales	118
4.3.2.2	Procedimiento	118
5.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	<u>123</u>
5.1	ARCILLAS EXPANDIDAS TERMICAMENTE DEL SUR DE LA SABANA DE BOGOTÁ.....	123
5.1.1	<i>PRUEBAS DE EXPANSIÓN</i>	124
5.1.2	<i>COMPARACIÓN DE LA ARCILLA 13.3 CON ALIVEN</i>	127
5.1.3	<i>ENSAYOS QUÍMICOS</i>	128
5.1.4	<i>ENSAYOS MINERALÓGICOS</i>	130
5.2	AGREGADOS LIVIANOS.....	134
5.2.1	<i>GRANULOMETRÍA</i>	134
5.2.2	<i>MASA UNITARIA</i>	136
5.2.3	<i>ABSORCIÓN</i>	138
5.2.4	<i>FACTOR DE GRAVEDAD ESPECÍFICA</i>	138
5.3	CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL.....	139
5.3.1	ENSAYOS SOBRE MATERIALES	139
5.3.2	ENSAYOS SOBRE CONCRETO	141
5.3.2.1	Resistencia a la Compresión.....	141
5.3.2.2	Resistencia a la Tensión Indirecta	145
5.3.2.3	Ensayo de absorción en frío, caliente y porosidad.....	148
5.3.2.4	Ensayo de Masa Unitaria.....	150
5.3.2.5	Ensayo de Modulo de Elasticidad y Relación de Poisson	153
5.3.2.6	Ensayo de asentamiento por el cono de Abrams	157
6.	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>158</u>
7.	<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>162</u>
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>163</u>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Tipos de Agregados Livianos Artificiales</i>	31
<i>Tabla 1.2. Clasificación de los concretos livianos</i>	33
<i>Tabla 2.1. Clasificación de los Minerales arcillosos según el tipo de empaquetamiento... 36</i>	36
<i>Tabla 2.2. Densidad y resistencia del Leca sueco para diferentes tamaños</i>	39
<i>Tabla 2.3. Granulometrías de aliven</i>	45
<i>Tabla 2.4. Granulometrías del Superlec.....</i>	46
<i>Tabla 2.5. Granulometrías y densidades de la Arlita</i>	47
<i>Tabla 2.6. Composición química ideal según varios autores</i>	49
<i>Tabla 2.7. Datos de minerales arcillosos típicos para lámina orientada.</i>	54
<i>Tabla 2.8. Requisitos de gradación para agregados livianos para concreto estructural.</i>	58
<i>Tabla 2.9. Requisitos de masa unitaria de agregados livianos para concreto estructural.....</i>	59
<i>Tabla 3.1. Clasificación de los concretos livianos</i>	63
<i>Tabla 3.2. Tipos de consistencia según asentamiento</i>	67
<i>Tabla 3.3. Factor de corrección del Modulo de Elasticidad según tipo de agregado liviano.</i>	77
<i>Tabla 3.4. Clases de densidades según el Eurocódigo.</i>	77
<i>Tabla 3.5. Clases de agresividad en los concretos. Adaptado.....</i>	83
<i>Tabla 3.6. Estimativo de tiempo en años para que la carbonatación alcance al acero de refuerzo</i>	86
<i>Tabla 3.7. Efecto de sustancias químicas comunes en el concreto</i>	88
<i>Tabla 3.8. Valores de conductividad térmica del hormigón liviano seco.</i>	90
<i>Tabla 3.9. Valores de absorción y porosidad típicos.....</i>	92
<i>Tabla 3.10. Valores típicos de penetración al ión cloruro</i>	92
<i>Tabla 3.11. Requerimientos de Masa Unitaria, Resistencia a la tensión y Resistencia a compresión de concretos livianos según NTC 4045.</i>	100
<i>Tabla 3.12. Requerimientos para concreto liviano estructural por la NTC 4045.</i>	101
<i>Tabla 4.1. Estaciones de arcillas estudiadas por INGEOMINAS en el sur de Bogotá.</i>	104
<i>Tabla 4.2. Composición química de las arcillas estudiadas por INGEOMINAS en el sur de Bogotá</i>	105
<i>Tabla 4.3. Puntos de extracción de muestras de arcillas en el sur de Bogotá.....</i>	106
<i>Tabla 4.4. Resultados de la mezcla de prueba de concreto con ALIVEN.....</i>	111
<i>Tabla 4.5. Dosificación por peso de mezclas de Concreto Liviano Estructural con ALIVEN para 1 m³ de concreto</i>	111
<i>Tabla 4.6. Diseño de mezcla prueba para relación a/mc de 0.59.</i>	119
<i>Tabla 4.7. Diseño de mezcla prueba para relación a/mc de 0.77.</i>	119
<i>Tabla 4.8. Resultados de las mezclas pruebas.....</i>	119
<i>Tabla 4.9. Diseño de mezcla definitiva para relación a/mc de 0.72.</i>	121
<i>Tabla 4.10. Diseño de mezcla definitiva para relación a/mc de 0.77.</i>	121
<i>Tabla 5.1. Identificación y localización de las arcillas del sur de la Sabana de Bogotá. .</i>	124

<i>Tabla 5.2. Resultados de expansión por quema rápida de las muestras del sur de la Sabana de Bogotá.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 5.3. Resultados de porcentaje de expansión por quema rápida y lenta de las arcillas 13.1, 13.3 y 0 a diferentes temperaturas.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 5.4. Resultados de porcentaje de expansión por quema rápida de las arcillas de referencia 13.3 para diferentes diámetros iniciales.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 5.5. Composición química de las arcillas seleccionadas del sur de la sabana de Bogotá y de la arcilla de ALIVEN.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 5.6. Comparación de la composición química de las arcillas de la investigación con las recomendadas por Kalb, Solovieva y Arlita.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 5.7. Resultados del análisis mineralógico a las arcillas del sur de Bogotá.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 5.8. Datos de Granulometría del agregado liviano de tamaño fino.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 5.9. Datos de Granulometría del agregado liviano de tamaño Medio.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 5.10. Datos de Granulometría del agregado liviano combinado.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 5.11. Datos de Masa Unitaria de los agregados.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 5.12. Datos de absorción de los agregados.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 5.13. Datos del factor de gravedad específica.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 5.14. Propiedades del cemento utilizado en la investigación.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 5.15. Datos de la arena de la investigación.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 5.16. Datos y resultados de resistencia a la compresión.....</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 5.17. Datos y resultados de resistencia a la tensión.....</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 5.18. Datos y resultados de absorción en frío, absorción en caliente y porosidad.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 5.19. Datos y resultados de Masa Unitaria.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 5.20. Datos y resultados de densidades por el método de la ASTM 642-06.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 5.21. Datos y resultados de modulo de elasticidad.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 5.22. Datos de Relación de Poisson.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 5.23. Datos del ensayo de Asentamiento.....</i>	<i>157</i>
<i>Tabla B.1. Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación.....</i>	<i>177</i>
<i>Tabla B.2. Agua aproximada de mezclado y requerimientos de aire contenido para diferentes asentamientos y tamaños máximos nominales de agregados.....</i>	<i>178</i>
<i>Tabla B.3. Máxima relación permisible de a/mc para concretos con exposiciones severas [1].....</i>	<i>178</i>
<i>Tabla B.4. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.....</i>	<i>179</i>
<i>Tabla B.5. Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone de menos de 30 ensayos.....</i>	<i>180</i>
<i>Tabla B.6. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.....</i>	<i>180</i>
<i>Tabla B.7. Relación aproximada de a/mc y resistencia a la compresión del concreto....</i>	<i>181</i>
<i>Tabla B.8. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.....</i>	<i>182</i>
<i>Tabla B.9. Primer estimativo de peso del concreto liviano fresco comprimido de agregado grueso ligero y agregado fino normal.....</i>	<i>182</i>
<i>Tabla B.10. Factor n, de la fórmula de fuller.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabla B.11. Coeficientes a y b de la resistencia de los agregados livianos.....</i>	<i>185</i>

<i>Tabla C.1. Datos del ensayo de penetración del ión cloruro a las muestras de ALISUR.....</i>	<i>190</i>
<i>Tabla D.1. Dosificación del Concreto Liviano de Alta Resistencia con ALISUR.....</i>	<i>193</i>
<i>Tabla D.2. Datos y resultados de resistencia a la compresión para Concreto Liviano de Alta Resistencia.....</i>	<i>194</i>
<i>Tabla D.3. Datos y resultados de absorción en frío, caliente y porosidad para Concreto Liviano de Alta Resistencia.....</i>	<i>195</i>
<i>Tabla D.4. Datos y resultados de Masa Unitaria para Concreto Liviano de Alta Resistencia.....</i>	<i>197</i>
<i>Tabla D.5. Datos y resultados de módulo de elasticidad a los 28 días para Concreto Liviano de Alta Resistencia.....</i>	<i>198</i>

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Representación esquemática de la capa tetraédrica y octaédrica.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2.2. Arcillas Expandidas Térmicamente (AET).</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.3. Horno rotatorio para producir AET</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.4. Proceso Seco para fabricar AET</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.5. Proceso Semihúmedo para fabricar AET</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2.6. Proceso húmedo para fabricar AET</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.7. Granulo de ALIVEN</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2.8. Granulo de Arlita</i>	<i>46</i>
<i>Figura 2.9. Granulo de Leca</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2.10. Diagrama de Riley</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2.11. Composición del mineral Esméctica: grupo 2:1</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2.12. Ley de Bragg</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.1. El Coliseo romano.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.2. Acueducto Pont Du Gard (Francia).</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.3. Edificio Australia Square Tower.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.4. Edificio Park Regis.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.5. Resistencia de los agregados, mortero y concreto para concreto normal y liviano.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.6. Clasificación de los concretos livianos por densidad y resistencia</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.7. Micrografía que muestra la capa de las burbujas de aire en la zona de transición, en la esquina de la parte superior a la derecha se encuentra el agregado liviano, y en la esquina de la parte inferior a la izquierda se encuentra la pasta de cemento</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.8. Influencia de la forma del espécimen de diferentes matrices en la resistencia a la compresión</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.9. Comparación gráfica de los módulos de elasticidad de un concreto liviano y uno de peso normal</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.10. Relación entre el módulo de elasticidad y resistencia a la compresión de diferentes matrices de cemento</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.1. Localización estaciones de muestreo Sabana de Bogotá por INGEOMINAS</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.2. Ubicación de las estaciones de las arcillas del sur de Bogotá en el diagrama de Riley.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4.3. GPS de la unidad de transportes de la Universidad Nacional –Sede Bogotá-.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.4. Cantera de arcilla del sur de la Sabana de Bogotá.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.5. Extracción manual de un punto seleccionado del Sur de la Sabana de Bogotá.</i>	<i>105</i>

<i>Figura 4.6. Arcilla natural almacenada en laboratorio.</i>	105
<i>Figura 4.7. Molienda de arcilla en molino de mandíbulas del IEI.</i>	106
<i>Figura 4.8. Trituración de arcilla de gran dureza por medio manual.</i>	106
<i>Figura 4.9. Arcilla de referencia 11.1 molida pasa tamiz 100.</i>	107
<i>Figura 4.10. Esferas de arcilla después de moldeadas.</i>	107
<i>Figura 4.11. Curvas de quema rápida y lenta utilizadas para los ensayos de calcinación con el horno suministrado por Cementos Argos S.A.</i>	107
<i>Figura 4.12. Vista interior del horno donado por ARGOS.</i>	108
<i>Figura 4.13. Muestras de arcilla del sur de Bogotá, al ser sometidas a quema rápida.</i>	108
<i>Figura 4.14. Saco de ALIVEN de 50 lts de tipo Fino.</i>	109
<i>Figura 4.15. Saco de ALIVEN de 50 lts de tipo Medio.</i>	109
<i>Figura 4.16. Agregado tipo Fino de ALIVEN.</i>	109
<i>Figura 4.17. Agregado tipo Medio de ALIVEN.</i>	109
<i>Figura 4.18. Descargue de la Arena de río donada por ARGOS.</i>	110
<i>Figura 4.19. Descargue del Cemento donado por ARGOS.</i>	110
<i>Figura 4.20. Proporcionamiento esquemático de mezcla con ALIVEN.</i>	111
<i>Figura 4.21. Fabricación de Concreto Liviano con ALIVEN.</i>	111
<i>Figura 4.22. Estado final del concreto antes de ser colocado.</i>	111
<i>Figura 4.23. Ensayo de compresión de Concreto Liviano con ALIVEN.</i>	112
<i>Figura 4.24. Ensayo de Tensión Indirecta de Concreto Liviano con ALIVEN.</i>	112
<i>Figura 4.25. Ensayo de Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson.</i>	112
<i>Figura 4.26. Ensayo de Masa Unitaria.</i>	112
<i>Figura 4.27. Tipos de arcilla del sur de Bogotá, sin calcinar.</i>	113
<i>Figura 4.28. Comparación entre arcilla de referencia 13.3, inicial y expandida.</i>	113
<i>Figura 4.29. Extracción del material en la cantera de Soacha.</i>	113
<i>Figura 4.30. Almacenamiento de la arcilla para trasladarla a Guatavita.</i>	113
<i>Figura 4.31. Máquina de molienda de la arcilla utilizada en Guatavita.</i>	114
<i>Figura 4.32. Traslado de la arcilla molida de Guatavita hasta la Universidad Nacional.</i>	114
<i>Figura 4.33. Arcilla molida.</i>	114
<i>Figura 4.34. Prehumedecimiento -con agua- de la arcilla para formar pellets.</i>	114
<i>Figura 4.35. Pellets de arcilla introducidas en una mezcladora para darle una forma redondeada.</i>	114
<i>Figura 4.36. Descarga del material de la mezcladora para ser tamizado.</i>	114
<i>Figura 4.37. Tamizado del agregado.</i>	115

<i>Figura 4.38. Almacenamiento de los distintos tipos de agregado de arcilla en bolsas.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.39. Diagrama de flujo del peletizado del Agregado Liviano del Sur de Bogotá.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.40. Horno estático del grupo CORONA.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.41. Colocación del agregado en el horno estático.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.42. Dispositivo de control del horno del grupo CORONA.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.43. Quemado del material a 1300°C.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.44. Curva de quema del horno del grupo CORONA.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.45. Diferenciación del material en granulometría fina y media, después de calcinado en Medellín.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.46. Material de granulometría fina ya tamizado, después de haberle eliminado los finos.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.47. Gráfica de mezcla prueba: Resistencia Compresión vs Densidad a los 7 días.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 4.48. Gráfica de mezcla prueba: Resistencia Compresión vs. Relación a/mc a los 7 días.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 4.49. Ensayo de compresión de Concreto Liviano con ALISUR.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 4.50. Ensayo de Tensión Indirecta de Concreto Liviano con ALISUR.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 4.51. Superficie de falla de la probeta en el ensayo de Tracción indirecta.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 4.52. Ensayo de Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson de Concreto Liviano con ALISUR.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 4.53. Ensayo de Masa Unitaria de Concreto Liviano con ALISUR.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 4.54. Ensayo de Absorción de Concreto Liviano con ALISUR.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 5.1. Porcentajes de expansión de las arcillas con quema rápida a 1300°C.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 5.2. Expansión de las muestras del sur de la Sabana de Bogotá por quema rápida a diferentes temperaturas y quema lenta a 1300°C.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 5.3. Comparación de la arcilla de referencia 13.3 antes y después de la quema con ALIVEN.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 5.4. Interior arcilla de referencia 13.3 e interior de ALIVEN.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 5.5. Diagrama de Riley con las arcillas del sur de Bogotá.</i>	<i>129</i>
<i>Figura 5.6. Difractogramas de análisis de polvo no orientado y de lámina orientada para la arcilla 13.3.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 5.7. Granulometría del agregado liviano de tamaño fino.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 5.8. Granulometría del agregado liviano de tamaño medio.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 5.9. Granulometría del agregado liviano combinado.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 5.10. Curvas de gradación de la arena de la investigación.</i>	<i>140</i>
<i>Figura 5.11. Resistencia a la compresión del concreto liviano en el tiempo.</i>	<i>142</i>

<i>Figura 5.12. Relación resistencia a la compresión vs relación a/mc.</i>	142
<i>Figura 5.13. Falla típica a compresión de concretos con ALIVEN.</i>	144
<i>Figura 5.14. Falla típica a compresión de concretos con ALISUR.</i>	144
<i>Figura 5.15. Esquema de la falla interior del concreto con ALIVEN.</i>	145
<i>Figura 5.16. Esquema de la falla interior del concreto con ALISUR.</i>	145
<i>Figura 5.17. Diagrama de barras de resistencia a la tensión experimental y según NTC 4045.</i>	146
<i>Figura 5.18. Relación Resistencia Tensión vs Relación a/mc.</i>	146
<i>Figura 5.19. Relación Tensión/Compresión para el concreto liviano.</i>	147
<i>Figura 5.20. Comparación de absorción en frío, absorción en caliente y porosidad para las mezclas de concreto liviano.</i>	149
<i>Figura 5.21. Comparación de absorción en frío, absorción en caliente y porosidad para las mezclas de concreto liviano.</i>	149
<i>Figura 5.22. Comparación de masa unitaria experimental, NTC 4045 y Secada al horno a 110°C.</i>	151
<i>Figura 5.23. Relación resistencia vs masa unitaria a los 28 días.</i>	152
<i>Figura 5.24. Familia de curvas de esfuerzo-deformación para determinar el modulo de elasticidad.</i>	154
<i>Figura 5.25. Relación Modulo de elasticidad vs Resistencia Compresión.</i>	155
<i>Figura 5.26. Relación de Poisson.</i>	156
<i>Figura C.1. Probetas impermeabilizadas lateralmente</i>	190
<i>Figura C.2. Olla de despresurización</i>	190
<i>Figura C.3. Probetas dentro de la olla de despresurización</i>	190
<i>Figura C.4. Montaje del ensayo de penetración al ión cloruro</i>	190
<i>Figura C.5. Corriente vs. Tiempo para el ensayo de penetración de cloruros</i>	191
<i>Figura D.1. Resistencia a la compresión del Concreto Liviano de Alta Resistencia en el tiempo.</i> ..	195
<i>Figura D.2. Modo de falla a los 28 días del Concreto Liviano de Alta Resistencia</i>	196
<i>Figura D.3. Comparación de absorción en frío, caliente y porosidad para Concreto Liviano de Alta Resistencia</i>	197
<i>Figura D.4. Comparación de masa unitaria experimental, NTC 4045 y Secada al horno a 110°C.</i>	198
<i>Figura D.5. Familia de curvas a 28 días de modulo de elasticidad para Concreto Liviano de Alta Resistencia</i>	199
<i>Figura D.6. Ensayo de asentamiento para Concreto Liviano de Alta Resistencia</i>	200

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Resumen de algunas de las normas aplicadas.....	170
ANEXO B: Procedimientos de Diseño de Mezclas de Concretos Livianos por los Métodos de la Aci 211.2 y de Chandra & Berntsson.....	175
ANEXO C: Ensayo Rápido de Penetración al Ión Cloruro para las Muestras de ALISUR.....	188
ANEXO D: Ensayos con Concretos Livianos de Alta Resistencia con agregado liviano ALISUR.....	192
ANEXO E: Hojas Técnicas de los Productos.....	202
ANEXO F: Difractogramas del análisis mineralogico de las arcillas	206

RESUMEN

El proyecto de investigación se enfocó en la obtención de Concretos Livianos Estructurales compuestos por agregados livianos de tipo Arcilla Expandida Térmicamente, cuyo material se extrajo de canteras de arcillas del Sur de la Sabana de Bogotá.

Para obtener el agregado liviano, se realizó un estudio de capacidad de expansión térmica de forma natural, sin adición de agentes expansores, a muestras de arcilla de los sectores de Mochuelos, San Cristóbal y Soacha. Este estudio se caracterizó por someter a las arcillas a procedimientos de quema rápida a 1150°C, 1200°C y 1300°C y a un procedimiento de quema lenta a 1300°C. Los resultados de las prueba de expansión, determinaron que la muestra de arcilla de referencia 13.3, localizada en una cantera del municipio de Soacha, presentó la mayor expansión de manera natural a una temperatura de 1300°C por el procedimiento de quema rápida, por lo que con este material se realizó el Agregado Liviano del Sur de la Sabana de Bogotá (ALISUR).

Igualmente, se procedió a realizar una mezcla patrón de concreto liviano con una Arcilla Expandida Térmicamente de uso comercial, con el objeto de comparar este concreto liviano, utilizado en la construcción, con el Concreto Liviano hecho con ALISUR. El agregado liviano comercial correspondió un Agregado Liviano de manufactura venezolana, ALIVEN, del cual se importaron 11 sacos de este material. Tanto al ALIVEN como al ALISUR, se les realizaron los ensayos de caracterización de los agregados requeridos para efectuar los diseños de mezcla de hormigón.

En el caso de los concretos livianos fabricados con ALIVEN, se estudiaron mezclas de concreto con relaciones a/mc de 0.67, 0.59, 0.55 y 0.52, obteniendo resistencias a la compresión entre 19.3 MPa y 25.2 MPa. Para los Concretos Livianos con ALISUR, se estudiaron hormigones con relación a/mc de 0.77 y 0.72, obteniendo resistencias a la compresión de 29 MPa y 37 MPa, respectivamente. Adicionalmente, para ambos tipos de concreto se estudiaron las propiedades referentes a: resistencia a la tensión, durabilidad, masa unitaria, modulo de elasticidad y relación de Poisson. Con los resultados de estos ensayos se realizó un análisis que permitió obtener las conclusiones que se expresan al final de este informe.

Palabras Clave: Concreto Liviano Estructural, Agregado Liviano, Arcillas Expandidas Térmicamente, Expansión, Sur de la Sabana de Bogotá, ALIVEN, ALISUR, Comercial.

ABSTRACT

This research project was focused on obtaining Structural Lightweight Concrete with lightweight aggregate consisting of Thermally Expanded Clay, whose material was extracted from quarries located in the South of the Bogota Valley.

To obtain the lightweight aggregate, a study of thermal expansion of capacity in a natural way was made, without the addition of additives, to clay samples from the sectors of Mochuelos, San Cristobal and Soacha. This study was characterized by subjecting the clay to fast burning procedures to 1150°C, 1200°C and 1300°C and a slow burning process at 1300 ° C. The test results, determined that the clay sample 13.3, located in a quarry from Soacha, introduced the fastest growing naturally at a temperature of 1300°C by the procedure of fast burning. With this material was made the lightweight aggregate of the South of Bogota Valley (ALISUR).

Afterwards, it proceeded to standard mixture of lightweight concrete with a commercial Thermally Expanded Clay, in order to compare with lightweight concrete made with ALISUR, the commercial lightweight aggregate corresponded to the lightweight aggregates from Venezuela (ALIVEN), of which were imported an amount of 11 material bags. Both the ALIVEN as the ALISUR, tests were performed to characterize the aggregates required to complete the concrete mix designs.

For the lightweight concrete manufactured with ALIVEN, the mixtures were studied with relationships w/mc of 0.67, 0.59, 0.55 and 0.52. It was obtained compressive strengths between 19.3 MPa and 25.2 MPa, for the lightweight concrete with ALISUR were studied with relation w/mc of 0.77 and 0.72, obtaining compressive strengths of 29 MPa and 37 MPa, respectively. Additionally, for both types of concrete were studied the properties of: tensile strength, durability, unit weight, elastic modulus and Poisson's ratio. With the results was made an analysis that allowed to obtain the conclusions expressed by the end of this report.

Key Words: Structural Lightweight Concrete, Lightweight Aggregate, Thermally Expanded Clay, Expansion, South Bogota's Savanna, ALIVEN, ALISUR, Commercial

Firma del director: _____

Ing. Jorge Ignacio Segura Franco

Firma del director del Posgrado de Estructuras: _____

Ing. Dorian Luis Linero Segrera Ph. D.

Autor: Ing. **DIEGO ROBERTO MARTINEZ PINEDA**

INTRODUCCION

El estudio del proceso para la obtención de concretos livianos no es reciente. Hay evidencia de que este material se comenzó a utilizar en la construcción de la ciudad de Babilonia. Posteriormente, en Europa, el concreto con agregado liviano de origen natural, fue empleado por los romanos (300 A.C.) como material de construcción para algunas de las obras de ingeniería más espectaculares de todos los tiempos: el Panteón, los Acueductos y el Coliseo Romano.

En efecto, a pesar de esa utilización inicial del concreto liviano, su desarrollo no se potenció y se tuvo que esperar hasta el año de 1824, cuando se desarrolló y patentó un cemento que se denominó Portland, que permitió la extensión y fabricación en el mundo, del nuevo material denominado Concreto u Hormigón, el cual se encontraba compuesto por una mezcla de gravas, arenas, cemento Portland y agua.

Es por ésto, que desde su origen el hormigón ha sido el material utilizado por excelencia en la construcción, debido principalmente a la versatilidad en cuanto a forma (se puede moldear), la facilidad de su producción y a la economía que resulta de su utilización como material estructural y no estructural. Lo anterior, posibilitó un desarrollo acelerado en el estudio del proceso para obtener concretos más resistentes, manejables y durables, resultando en la fabricación de los aditivos químicos y de las adiciones naturales o artificiales, que mejoran las propiedades del concreto.

Con la demanda creciente y en vista de que cada vez se desarrollaba más la tecnología del hormigón, fue evidente la necesidad cada vez más apremiante de conseguir materiales más livianos pero de la misma forma resistentes, que permitieran una importante disminución global en costos de una estructura y que garantizaran una adecuada seguridad. Esta búsqueda, condujo al desarrollo de los Concretos Livianos Estructurales¹, en los cuales se conjugaban las propiedades de resistencia y durabilidad del concreto de peso normal² y además contaban con una ventaja adicional: su ligereza.

Por lo anterior, el Concreto Liviano Estructural se comenzó a industrializar en Estados Unidos y en Europa, a través de la fabricación de los agregados livianos artificiales, que por su naturaleza eran los adecuados para participar como componente de este tipo de hormigón. Entre los agregados livianos artificiales, la Arcilla Expandida Térmicamente es la más utilizada en el mundo, debido a sus buenas propiedades mecánicas.

Es por ésto, que desde hace ya varias décadas el Concreto Liviano Estructural se ha empleado en otros países de forma exitosa y ha mostrado múltiples ventajas respecto a los concretos elaborados con agregados de peso normal. Estas ventajas hacen de ésta tecnología una alternativa atractiva como material de construcción en el sector industrial. Además, sumando que Colombia se encuentra en vísperas de la actualización de las

¹ Según la ACI 213R-03, son aquellos que tienen una resistencia a la compresión a los 28 días mínimo de 17.5 MPa y una densidad en estado seco menor a 1920 kg/m³.

² Se entiende por concreto de peso normal a aquellos que presentan una densidad en estado seco entre 2200 y 2400 kg/m³.

Normas Sismo Resistentes Colombianas, NSR, que reglamentarán y permitirán el uso de Concretos Estructurales Livianos, se hace manifiesta la necesidad del planteamiento de un proyecto que permita la fabricación de Concreto Liviano Estructural en el país.

En ese contexto, el presente proyecto de investigación busca suplir la deficiencia que ha existido en materia investigativa en el país, relacionada con el Concreto Liviano Estructural, por lo que se pretende la fabricación de un Concreto Liviano Estructural con arcilla del Sur de la Sabana de Bogotá³.

En la fabricación de este agregado liviano colombiano, fue necesario el estudio y puesta en práctica de diversos procedimientos utilizados para la expansión de forma natural de la arcilla, que se resumieron básicamente en los procesos denominados como quema lenta y quema rápida, los cuales se explican en el capítulo 2, que corresponde al Marco Teórico de las Arcillas Expandidas Térmicamente.

Así mismo, para la fabricación del Concreto Liviano Estructural con arcillas del sur de la Sabana de Bogotá, fue necesaria la producción de un Concreto Liviano Estructural con un agregado liviano elaborado de forma industrial y utilizado como material de construcción en algún país, por lo que se optó por traer a Colombia el Agregado Liviano de Venezuela (ALIVEN), el cual actuó como material patrón de las mezclas de concreto liviano con agregado colombiano, ayudó a calibrar la producción del agregado colombiano y otorgó la experiencia necesaria para fabricar este tipo de hormigón.

En vista de lo anterior, fue indispensable para la fabricación del Concreto Liviano Estructural Colombiano, un estudio detallado de la información existente sobre el tema en mención, por lo que esta se resumió en el capítulo 3: Marco Teórico del Concreto Liviano Estructural. Dicha información otorgó los parámetros teóricos necesarios para la producción del concreto con agregado colombiano.

Igualmente, en el capítulo 4 se explica la metodología llevada a cabo en la investigación y en el capítulo 5, se muestran el análisis de los resultados del agregado liviano colombiano, el agregado liviano venezolano, del Concreto Liviano Colombiano y el Concreto Liviano con ALIVEN.

Finalmente, como anexos de la investigación principal, se presentan dos investigaciones paralelas, que se realizaron con el objeto de conocer mejor las propiedades de los concretos livianos con ALISUR. En ese contexto, en el anexo C se muestran los ensayos de penetración al Ión Cloruro, realizados a las muestras de concreto de ALISUR, que tenían la idea de ilustrar con una mayor claridad la permeabilidad al paso de cloruros de estos hormigones. Así mismo, en el anexo D, se enseñan los resultados de las propiedades de un concreto fabricado con ALISUR, compuesto por humo de sílice, cuyo objeto principal era el de obtener Concretos Livianos de Alta Resistencia.

³ La localización de la arcilla se debió principalmente a la abundancia que presenta este material en canteras localizadas en esa parte de la ciudad.

JUSTIFICACION

A pesar del auge que se vivió en el planeta en la década de los cincuenta, relacionado con el desarrollo e implementación de los concretos livianos, este tipo de tecnología -en pleno siglo XXI- apenas comienza en Colombia.

Lo anterior, sitúa a la nación en un escaño atrás de otras naciones de la región como Venezuela, Argentina y Brasil, países que desde hace algunos años adoptaron y adaptaron la tecnología de los concretos livianos a su medio de producción local, mostrando hoy en día edificaciones íntegras con este tipo de material.

Aparte de lo mencionado, a continuación se señalan las razones por las cuales se emprendió este proyecto de investigación:

- En Colombia, no se ha producido de forma industrial Concreto Liviano Estructural básicamente por desinformación y falta de investigación en ese tema.
- El Concreto Liviano Estructural, es un material mecánicamente apto como el de peso normal, pero presenta la ventaja de una disminución en su peso unitario, lo que acarrea importantes ahorros de costos en un proyecto a nivel global.
- Es viable la producción industrializada del agregado liviano para este tipo de concreto, debido a que se necesita un proceso parecido al que se desarrolla en las plantas cementeras que operan actualmente en el país.
- La Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR) se va a actualizar este año, incluyendo como novedad, la utilización de los concretos livianos estructurales como material de construcción.
- Este tipo de concreto se fabrica con un agregado liviano a base de arcilla; material abundante en el país, por lo que representa una alternativa de desarrollo de agregados diferente a la convencional.
- Existen en el país hormigones de baja densidad en el mercado que no cumplen con los requisitos mecánicos para ser utilizados como concretos estructurales livianos.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y estudiar las propiedades del Concreto Liviano Estructural con Arcilla Expandida Térmicamente del Sur de la Sabana de Bogotá, que garantice su viabilidad para ser producido de forma industrial.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Producir un Concreto Liviano Estructural compuesto por un Agregado Liviano comercial y estudiar sus propiedades.
- Determinar el procedimiento adecuado para tratar la arcilla con el fin de asegurar su expansión de forma natural.
- Identificar la composición mineralógica y química de las arcillas del sur de la Sabana de Bogotá, que las caracterice como aptas para expandir de forma natural por medio de temperatura.
- Establecer una granulometría adecuada del agregado liviano para ser utilizada en el diseño de mezcla de Concreto Liviano Estructural.
- Establecer una dosificación apropiada del Concreto Liviano Estructural con Arcillas del sur de la Sabana de Bogotá, que permitan tener una resistencia a la compresión mínima de 17.5 MPa y una masa unitaria seca en equilibrio menor a 1920 kg/m³.
- Estudiar las propiedades de resistencia, densidad y permeabilidad del Concreto Liviano Estructural compuesto por arcillas del sur de la Sabana de Bogotá.
- Estudiar la factibilidad de producción de concretos estructurales con agregados livianos de tipo arcilla expandida térmicamente en Colombia.

ANTECEDENTES

Como se ha mencionado, el concreto liviano estructural, es un material que existe hace mucho tiempo, por lo que a nivel internacional existe bastante documentación. A nivel Colombia, al existir un déficit investigativo en este campo, es poco lo que se conoce. A continuación se muestra una serie de trabajos nacionales relacionados con el objeto de la presente investigación.

A Nivel Nacional

- Tesis de grado de las ingenieras químicas Diana Guevara y Vilma Lizarazu: *Estudio de los procesos para la obtención de concretos ligeros*. Investigación desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá-, en el año 1999.

En este trabajo se establecieron las propiedades funcionales de los concretos ligeros, así como un costo comparativo con respecto a materiales de construcción competitivos. Se fabricaron concretos compuestos por material aligerante como poliestireno expandido en mezcla con agentes espumantes. Dió como resultado un concreto que puede ser utilizado como material no estructural.

- Tesis de grado de la ingeniera Diana Parra: Estudio preliminar de la expansión térmica de arcillas a escala de laboratorio. Investigación desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín en el año 2000.

La investigación se concentró en estudiar la expansión de forma natural de las arcillas del Valle de Aburrá, por medio de unos procedimientos de quema lenta y rápida hasta una temperatura de 1200°C. Obtuvo muestras de arcillas que presentaron una leve expansión, recomendando estudiar estos especímenes a temperaturas superiores.

- Tesis de grado de la ingeniera Diana Giraldo: *Estudio experimental sobre la expansión térmica de las arcillas*. Investigación desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín en el año 2006.

La investigación estuvo encaminada al ensayo de muestras y mezclas de arcillas con cenizas volantes o con carbonatos de calcio para la determinación de la aptitud a la expansión térmica. En el ensayo hubo variación en los procedimientos (quema lenta y rápida) y en las temperaturas de quemado (entre 1100°C y 1250°C).

- Tesis de grado del ingeniero José Acevedo Ramos: *Caracterización de fuentes de extracción de arcillas expansivas para la elaboración de agregado liviano mediante cocción*. Investigación desarrollada en la Universidad Cooperativa de Colombia - Sede Medellín-. En este trabajo se muestra un marco teórico amplio, acerca de las

propiedades de las arcillas y realiza ensayos de laboratorio, como límites de Atterberg, para clasificar a las arcillas con carácter expansivo de las no expansivas.

- Artículo técnico “*Árido ligero expandido a base de residuos: Aspectos técnicos y económicos*” de la revista BORSI Marzo de 2001, redactado por Xavier Elías Castells, se presentan las ventajas y propiedades especiales de los áridos ligeros que permiten que sean materiales con diversas aplicaciones (como en la construcción) y sean amigables con el medio ambiente, resaltando el uso de residuos industriales en la producción de áridos livianos.
- Artículo técnico “Posibilidades del concreto liviano en Colombia”, del ingeniero Jesús Humberto Arango Tobón. Medellín. En este documento se mencionan las propiedades fundamentales de los distintos tipos de agregados livianos, así mismo explica las diferentes características de los concretos livianos. Finalmente, hace una perspectiva del desarrollo de este tipo de material de forma industrial en el país.
- Presentación en la Reunión del Concreto de 1988, titulada: “hacia la introducción de concretos ligeros en Colombia”, del ingeniero químico Carlos Schlubach. En esta exposición se realiza una descripción detallada de las principales características de los agregados livianos y de los concretos livianos con arcilla expandida térmicamente.

NOTACIONES

a/mc= Relación agua-material cementante.

ACI= American Concrete Institute.

AET= Arcilla Expandida Térmicamente.

ALIVEN= Agregado Liviano de Venezuela.

ALISUR= Agregado Liviano del Sur de la Sabana de Bogotá.

CAL= Concreto de Agregado Liviano.

NSR= Norma Sismo- Resistente Colombiana

NTC= Norma Técnica Colombiana.

1. La notación a otros apartados del libro se realizan por su número. P. ej.: “Véase 3.3.1...”.
2. La notación para ecuaciones se realizan por capítulo y en paréntesis. P. ej: (Ec. 3.3.), corresponde a la tercera ecuación del capítulo 3.
3. La notación entre corchetes indica referencias bibliográficas. P. ej: [22], corresponde a la 22 referencia bibliográfica global del texto.

1. MARCO TEORICO DE LOS AGREGADOS LIVIANOS

En una mezcla de concreto normal, los agregados ocupan normalmente entre un 60% y un 80% del volumen total y constituyen una parte fundamental de la resistencia mecánica y de la densidad final de la mezcla. Sánchez de Guzmán [71] define a los agregados o áridos como *“aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento Portland en presencia de agua conforman un todo compacto (piedra artificial) conocido como concreto u hormigón”*.

La definición técnica de este material se puede tomar de la norma sismorresistente colombiana, NSR – 10, que define al agregado liviano (lightweight aggregate) como al: *“agregado que cumple con los requisitos de la NTC 4045 (ASTM C330) y con una densidad cuando está suelto y seco de 1120 kg/m³ o menos, determinado según la ASTM C29”*.

En el caso de los agregados livianos, estos se diferencian de los de peso normal (gravilla, grava ó piedra) por una diferencia amplia de densidades, que influye directamente en el peso final del concreto.

En las investigaciones realizadas a diferentes tipos de agregado liviano en su uso como componente de reemplazo del agregado grueso, se han encontrado que existen muchas clases de este material, los cuales debido a sus características intrínsecas dan una densidad y resistencia diferentes en la mezcla final. Por lo tanto, es conveniente estudiar el origen y naturaleza de estos agregados, ya que todas sus partículas provienen de procesos diferentes. Los agregados livianos se pueden clasificar como orgánicos e inorgánicos, naturales o artificiales, y de granulometría continua o discontinua; pero siempre conservan su característica principal que consiste en su alta porosidad.

1.1 CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS LIVIANOS

Con base a las Ref. [13], [36] y [74], se puede clasificar en agregados livianos naturales, artificiales y orgánicos.

1.1.1 Agregados livianos naturales [74]

Estos áridos corresponden a aquellos que provienen de la explotación de fuentes naturales, los cuales han sido sometidos a procesos tales como el intemperismo y la abrasión, o mediante la trituration mecánica por el hombre, por lo que la gran mayoría de sus propiedades y características son originales, es decir sin alterar y por lo tanto se pueden emplear tal como se encuentran en la naturaleza. Algunos ejemplos de áridos livianos de este tipo son los siguientes:

- **Pumicita o Piedra pómez**

Son rocas de origen volcánico, las cuales se encuentran en muchas partes del mundo. Son lo suficientemente ligeras y resistentes para ser usadas como agregados livianos. Su ligereza es debido al gas que se escapa de la lava fundida cuando

erupcionan desde las profundidades de la tierra. La piedra pómez se presenta usualmente de color clara o blanca y tiene una textura de celdas interconectadas.

Este material es uno de los más viejos tipos de agregados livianos, el cual inclusive ha sido usado en estructuras romanas. La pumicita es explotada, lavada y luego usada. En el caso de que se requiera un agregado de mayor capacidad resistente, la piedra pómez debe ser sinterizada al punto de fusión incipiente.

- **Diatomita**

Esta es una roca silícica amorfa derivada de los restos de las plantas acuáticas microscópicas, que se forman cerca de la corteza profunda del océano. La diatomita en forma pura tiene un peso promedio de 450 kg/m^3 , pero debido a las impurezas, la diatomita es normalmente usada como un agente para dar mayor manejabilidad y también como un material puzolanico. La diatomita o tierra diatomácea también puede ser sinterizada en hornos rotatorios para hacer agregados livianos artificiales.

- **Escoria**

Es también un agregado liviano de origen volcánico, cuyo color es usualmente oscuro y contiene celdas de formas largas e irregulares no conectadas entre si. Además es ostensiblemente más débil que la pumicita.

Otros agregados livianos naturales son las puzolanas, tobas volcánicas, conchas machacadas.

1.1.2 Agregados livianos artificiales

Los áridos livianos artificiales se obtienen a través de un tratamiento térmico -a elevadas temperaturas- a determinados productos que poseen la propiedad de desprender gas al tiempo que se reblandecen, con lo cual expanden. Por efecto de la temperatura la capa superficial se vitrifica y el gas queda encerrado en el interior. Una vez enfriado se obtiene un material liviano y duro de superficie lisa y forma más o menos regular. Los más corrientes son las arcillas expandidas, las pizarras o esquistos expandidos y las cenizas volantes calcinadas.

La densidad aparente de estos áridos oscila entre los 300 y 1000 kg/m^3 . La absorción de agua de estos agregados, varían según la materia prima, el proceso de fabricación y el tamaño del grano; el intervalo de variación oscila entre un 8 y 25 por ciento sobre el peso deseado de los áridos mayores. Pueden dar lugar a una amplia gama de hormigones, de densidades inferiores a los 1850 kg/m^3 y resistencias máximas cercanas a los 600 kg/cm^2 (60 Mpa).

A continuación, en la tabla siguiente se procede a hacer una breve descripción de estos tipos de áridos:

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

Tipo de Agregado	Descripción	Densidad del agregado (kg/m ³)	Densidad del concreto obtenido (kg/m ³)	Propiedades funcionales del concreto
Piedra Pómez	Vidrio volcánico espumoso de color claro.	500 a 900	800 a 1200	Buen comportamiento de aislamiento térmico, alta capacidad de absorción de agua 30 al 50% en peso.
Escorias de Lava porosa	Piedra eruptiva de color pardo o rojizo de una estructura de poros muy grandes variables.	750 a 1700	1100 a 1500	poco sensibles a la retracción, reducida absorción de agua, resistencia moderada.
Escorias de caldera	Escorias resultantes de la combustión del carbón, se usan las más dura, es decir las que contienen menos cantidad de cenizas.	1150 a 1500	1200 a 1600	Puede contener sustancias agresivas para el hormigón. Escasa tendencia a la retracción, el grano de escoria absorbe poca agua.
Escorias de alto horno	Producto de la colada del alto horno, la generación de vapor infla la escoria que aún está en estado plástico, de modo que se endurece en forma porosa. Debe estar libre libre de fracciones que produzcan descomposición cálcica o férrica.	400 a 1100	950 a 1750	Bloques con resistencias entre 250 y 50 kg/cm ² .
Pómez siderúrgica	Se obtiene luego que la escoria fundida incandescente se envía a dispositivos de espumación, donde se enfría violentamente y se contrae quedando solidificada.	600 a 900	1000 a 1800	Proporcionan resistencias de 20 a 30 kg/cm ² .
Arcilla, esquisto y pizarra expandidas	Se obtiene calentando cada una de las materias primas en un horno rotatorio hasta fusión (1000 a 1200°C), el gas generado queda atrapado en la masa que al enfriarse produce el material poroso.	300 a 650	1400 a 1800	Elevada trabajabilidad, resistencias mayores que las alcanzadas usando otro tipo de agregado ligero.
Vermiculita o mica esponjada	Material de estructura laminar que cuando se calienta (650°C a 1000°C) se expande varias veces su tamaño, hasta 30 veces, por exfoliación de sus delgadas láminas.	60 a 130	300 a 800	Muy baja resistencia, contracción elevada, excelente aislante de calor.
Perlita expandida	Es una roca vítrea volcánica, cuando se calienta rápidamente (900 a 1100°C) se expande por la evolución de vapor formando el material celular.	30 a 240	400 a 1100	Baja resistencia, contracción al secado muy elevada, empleando principalmente como aislante térmico. Se ca rápidamente y puede dársele un acabado diligente.
Clinker	Residuos bien quemados de horno industrial de alta temperatura, sinterizados o aglomerados.	1000	1100 a 1400	Resistencia moderada, para aumentar la trabajabilidad de la mezcla se utiliza arena natural.

Tabla 1.1. Tipos de Agregados Livianos Artificiales [42].

Otros tipos de agregados livianos artificiales son:

- **Vermiculita**

La vermiculita exfoliada es un árido muy liviano (50 a 125 kg/m³), de color amarillo claro a marrón oscuro, que se obtienen por cocción de ciertos filosilicatos a temperaturas entre 900 y 1100°C. Se presenta en forma de un apilamiento de láminas inelásticas, de dureza similar a la mica (1.5 a 2.5 en la escala de MOHS) [57].

- **Ladrillos triturados**

Son utilizados como agregados en ciertas partes donde los agregados naturales son escasos o muy costosos. Los agregados de ladrillos triturados son producto de los desechos de fabricación de la industria ladrillera, los desperdicios de las obras de construcción y los resultantes de las demoliciones.

Cuando se busca obtener densidades bajas se castiga fuertemente la resistencia y por ello los concretos livianos con base en ladrillos triturados no son casi empleados en elementos estructurales sino más bien en muros y aislamientos térmicos y rellenos, Sus principales ventajas son su escasa retracción y gran aislamiento para densidades bajas.

- **Sintoporita**

Es un producto de silicato cálcico fundido que se obtiene como residuo de la fabricación del ácido fosfórico inyectándole aire a una masa líquida de dicho silicato a temperaturas muy elevadas. Se parece a las escorias férricas de altos hornos. La densidad de los granos gruesos de este material esta entre 870 y 1150 kg/m³. Las resistencias de los

concretos hechos con estos áridos es baja, sus densidades oscilan entre 950 y 1200 kg/m³ y presentan una retracción baja.

1.1.3 Agregados livianos orgánicos

Dentro de éstos, se pueden mencionar los siguientes:

- **Cascarilla de arroz**
Su utilidad radica en el hecho de que las partículas de la cascarilla tienen una forma aconchada que permiten atrapar aire, aligerando la masa del concreto. Entre sus componentes se encuentra un contenido alto de sílice, provocando que sea compatible con la composición química del cemento. Además si ésta se calcina se puede utilizar como puzolana o como adición de mezclas de concreto. Se recomienda mineralizarla (con cal) antes de ser utilizada.
- **Viruta de madera**
Es el agregado natural más utilizado en la producción de concreto liviano. Se debe someter a un tratamiento que consiste en una mineralización por inmersión de la viruta en una lechada de cal, de cemento, silicato potásico o cloruro potásico para mejorar su resistencia y evitar su putrefacción. Los concretos compuestos por este agregado tienen escasa resistencia, alta retracción y su curado debe ser muy intenso y duradero. La aplicación principal es en divisiones que requieren aislamiento térmico y acústico sin alta capacidad portante.
- **Poliestireno Expandido**
Está formado por resinas espumosas de poliéster. Se incluye un agente de incorporación que consiste en poliestireno, cuyas perlas esféricas al ser calentadas por el vapor, se expanden.

Este tipo de concreto está compuesto por poliestireno, agua, arena y cemento, donde el icopor ocupa cerca del 70% de la masa. Tiene una resistencia baja, retracción alta, alto poder de aislamiento térmico y acústico. Debido a la última característica, su principal aplicación está en bloques aislantes.

1.2 TIPOS DE CONCRETO CON AGREGADOS LIVIANOS

Los concretos livianos se clasifican por diferentes criterios, entre los cuales están: su densidad o sus componentes. A continuación se explican en detalle cada uno de los mencionados tipos.

1. De acuerdo a su densidad. La ACI 213R-03 menciona que los concretos livianos son aquellos que tienen una densidad en estado seco por debajo de 1920 kg/m³, por lo tanto esta clasificación se puede subdividir en varios grupos:

Densidad de 300 a 800 kg/m³: Son concretos livianos con alto poder de aislamiento térmico pero con moderada resistencia.

Densidad de 800 a 1200 kg/m³: Son concretos livianos de mediano poder de aislamiento térmico pero con resistencias de tipo medio.

Densidad de 1200 a 1800 kg/m³: Son concretos livianos de mayor resistencia a la compresión con limitado poder aislante de calor.

2. De acuerdo con sus componentes. Esta clase se puede subdividir en tres subgrupos, entre los cuales se encuentran los concretos sin finos, los concretos de agregados de peso liviano y los concretos aireados.

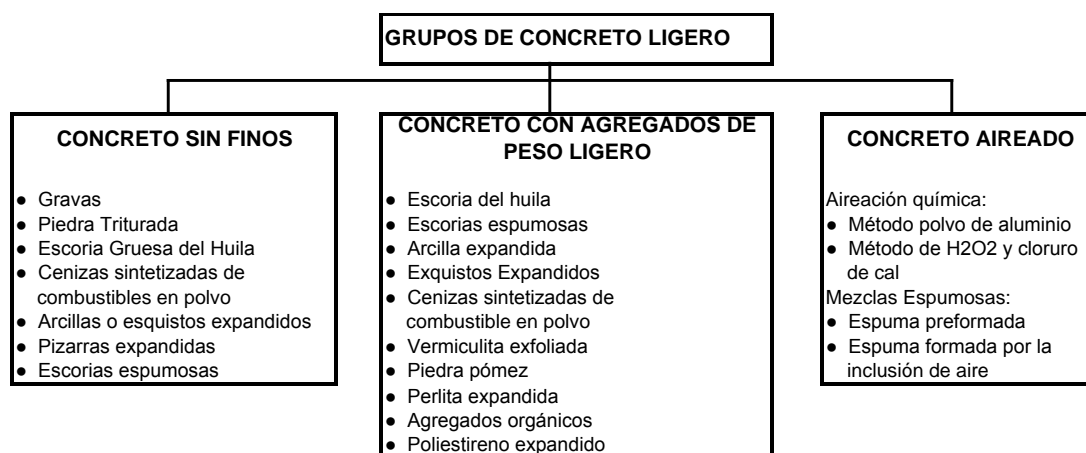


Tabla 1.2. Clasificación de los concretos livianos [75].

Concretos sin finos: Esta mezcla es constituida por agregado grueso, cemento y agua; prescindiendo parcial o totalmente del agregado fino.

Estos tipos de concretos son compuestos por agregado grueso normal, presentan una densidad que fluctúa entre 1600 y 2000 kg/m³, donde el tamaño de las partículas está limitado entre 9.5 y 19 mm, evitándose material menor de 4.76 mm. La resistencia varía entre 14 y 141 kg/m² y la relación agua-cemento está comprendida en un rango de 0.38 a 0.52.

Concretos de agregado liviano: Existen muchos tipos diferentes de agregados, con la particularidad de que son livianos pero porosos. Así mismo algunos de éstos son de difícil consecución en el país, pero a manera de reseña, las clases más importantes se mencionan en la Tabla 1.2.

Las características más importantes de esta clase de concreto, corresponde a que según al tipo de agregado que se use, la densidad del mismo estará comprendida en un rango entre 300 y 1850 kg/ m³ con resistencias a la compresión entre 35 kg/cm² y 422 kg/cm².

La mayoría de los agregados livianos tienen absorción rápida y elevada de agua, lo cual disminuye su propiedad de aislamiento térmico, por lo que se recomienda

impermeabilizar el material con un recubrimiento bituminoso. Si se utilizan estos componentes en concreto reforzado, es importante proteger el acero de refuerzo contra la corrosión (cuyo riesgo es el doble en comparación con un agregado normal) [36].

Concretos Aireados: Se caracterizan porque dentro del concreto se introducen burbujas de un gas (oxígeno, aire, hidrógeno) para obtener elementos livianos, lo cual desemboca en un material de estructura celular. Se subdividen en dos:

- a) Concreto con gas: Este tipo de concreto se produce por reacción química y se incorpora en el concreto fresco de manera que al fraguar, las burbujas quedan atrapadas dentro de la mezcla. Actualmente este tipo de tecnología está en desuso. Se emplea polvo de aluminio finamente dividido en una proporción del orden del 0.2 % del peso del cemento. La reacción del polvo activo con hidróxido de calcio o álcali libera hidrógeno, que forma las burbujas; también puede emplearse una aleación de zinc en polvo o aluminio y algunas veces se emplea peróxido de hidrógeno, que genera oxígeno.
- b) Concreto espumoso: Se produce por la adición de un agente espumante a la mezcla, que introduce y estabiliza las burbujas de aire durante el mezclado a alta velocidad. El concreto aireado puede contener o no agregado. Las mezclas más comunes tienen densidades entre 500 y 1400 kg/m³. La resistencia a la compresión en este mismo intervalo corresponde a valores de 30 a 141 kg/cm². Normalmente el módulo de elasticidad de un concreto aireado es de 1.8×10^4 a 3.5×10^4 kg/cm².

El material aireado tiene gran movimiento térmico, elevada contracción y considerable movimiento de humedad (más elevado que el concreto con agregado liviano de la misma resistencia), aunque un adecuado curado al vapor a alta presión disminuye la acción de estos fenómenos y su influencia en la resistencia.

En general, todos los tipos de agregados estudiados sirven para fabricar concreto liviano, pero no todos estos funcionan para fabricar un hormigón estructural, es por esto, que según la literatura especializada, los agregados que logran en el concreto una resistencia a la compresión adecuada y una densidad para ser catalogados como estructurales, corresponden a aquellos que son fabricados de forma artificial, tales como escorias de alto horno, puzolanas y principalmente arcillas, esquistos o pizarras expandidas. De los cuales la Arcilla Expandida Térmicamente es la que mejor se comporta y se usa en el mundo como agregado liviano para concretos estructurales.

2. MARCO TEÓRICO DE LAS ARCILLAS EXPANDIDAS TERMICAMENTE (AET)

Las arcillas son materiales que se pueden definir de varias maneras, pero cuya connotación principal se caracteriza por el tamaño de sus partículas. Es por ende que normalmente el término arcilla, se le adjunta a las partículas que tienen un tamaño de grano inferior a $2\mu\text{m}$, sin importar sus componentes mineralógicos, a pesar de que en una gran parte se encuentran compuestas por filosilicatos (morfología laminar) y otros minerales en menor proporción como cuarzo, feldespatos etc [31].

Las arcillas corresponden a rocas sedimentarias, en la mayor parte de los casos de origen dendrítico, que son constituyentes esenciales de los suelos y sedimentos, puesto que son los productos finales de la meteorización de los silicatos que formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

Entre las muchas aplicaciones industriales de las arcillas se pueden mencionar la industria de la construcción, para la que se utilizan arcillas comunes⁴, a la que va destinada cerca del 90% de las arcillas comerciales, cuyos principales usos corresponden a la producción de tejas, ladrillos, tubos, baldosas, como adición en cementos, como fuente de alúmina y sílice, y en la fabricación de los denominados agregados livianos (arcillas expandidas). A continuación se procederá a explicar la composición de las arcillas desde un punto de vista mineralógico y posteriormente se explicarán las Arcillas Expandidas Térmicamente, como agregado liviano de un Concreto Estructural.

2.1 COMPOSICION DE LAS ARCILLAS [31], [51]

Las arcillas son materiales que están compuestos por una estructura cristalina que esta formada principalmente por dos grupos: grupos de sílice tetraédricos y grupos de alúmina octaédricos. Estos se muestran en la siguiente figura:

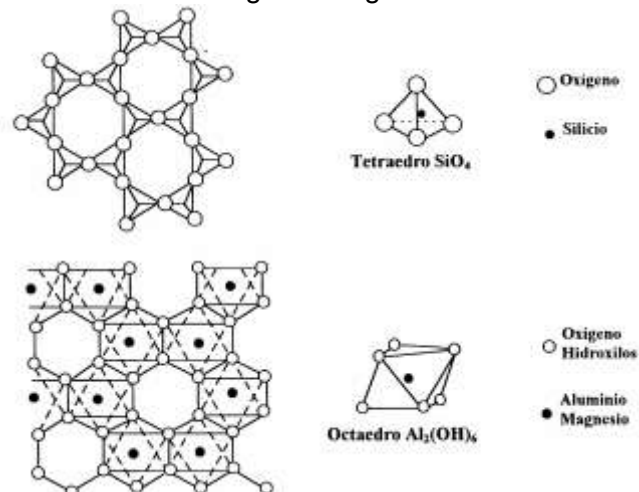


Figura 2.1. Representación esquemática de la capa tetraédrica y octaédrica [51].

⁴ Son arcillas compuestas por dos o más minerales de arcilla, generalmente ílita y esméctica, con cantidades apreciables de minerales diferentes a los filosilicatos.

2.2 ARCILLAS EXPANDIDAS TÉRMICAMENTE (AET)



Figura 2.2. Arcillas Expandidas Térmicamente (AET).

Corresponden a una clase especial de arcilla en estado natural, ya que todas las arcillas comunes no expanden, extraída de canteras a cielo abierto que presentan una aptitud a la expansión de forma natural cuando se lleva el material granulado a elevadas temperaturas (entre 1100°C y 1300°C), caracterizándose porque expande, debido a los gases de combustión internos, entre un 20% y un 400% veces su tamaño inicial, dependiendo si el material fue mezclado con o sin adiciones⁵. Las Arcillas Expandidas Térmicamente, AET, se caracterizan por ser esferas o partículas irregulares con un recubrimiento exterior sinterizado, brillante en ocasiones, con una superficie externa cerrada, poco porosa y de preferencia vitrificada. En contraste, el interior del árido presenta un color negro calcinado y una gran porosidad, que es la responsable del carácter liviano del agregado.

Generalmente un producto expandido sea de arcilla, limo, arcilla esquistosa o esquisto arcilloso tiene dos denominaciones de acuerdo a la forma. La primera corresponde a granulados de arcilla expandida, que son los granos aproximadamente esféricos de forma redondeada o con aristas suaves; mientras que los irregulares con ángulos y aristas agudos corresponden a los denominados ripios de arcilla expandida.

Características de la AET:

- Resistencia Mecánica Adecuada.
- La densidad varía entre 300 y 1120 kg/m³.
- Porosidad Alta.
- Color marrón claro.
- Forma redondeada.
- Superficie rugosa.

⁵ Las adiciones facilitan el desprendimiento de los gases internos, responsables de la expansión de las arcillas; entre los productos más usados están los carbonatos de calcio, las cenizas volantes y los productos inflamables como el ACPM y aceite usado.

- Material aislante continuo, sin puentes térmicos.
- Resistente al fuego.
- No es corrosivo ni se pudre.
- No produce gases.

Condiciones de fabricación [65]

La expansión de los granos se debe a un desprendimiento gaseoso producido en la misma materia arcillosa. Como consecuencia del aumento de la temperatura, dicha materia se vuelve viscosa y se producen en ella reacciones químicas que provocan desprendimientos de gases (gas carbónico, óxido de carbono, anhídridos sulfurosos y sulfúricos). La formación de pequeñas cavidades en la arcilla genera como resultado una estructura celular en la materia.

Las condiciones requeridas para la expansión son por lo tanto:

- La presencia en cantidades suficientes dentro la arcilla, de productos minerales u orgánicos, susceptibles de provocar desprendimientos gaseosos a la temperatura de fusión.
- La aparición a una temperatura determinada, de una fase de fusión cuya viscosidad sea suficientemente alta para poder retener los gases que se escapan.
- La vitrificación de la superficie exterior del grano debe ser suficiente para que dicho cascarón esté totalmente cerrado y sin poros.
- Con el fin de evitar los estallidos, es preferible introducir exclusivamente productos secos en los hornos.
- Los desprendimientos gaseosos empiezan alrededor de 600°C, pero la fase viscosa se produce únicamente entre los 1100 y 1300°C.
- Para evitar que los desprendimientos gaseosos escapen, la película vitrificada tiene que estar ya constituida. Esta condición, elimina cualquier proceso de calentamiento lento.
- Se debe tener cuidado, que los granos una vez vitrificados no permanezcan mucho tiempo en este estado, puesto que se pueden aglutinar los unos con los otros.

De acuerdo con Owens (1993) los gases se pueden producir por [25]:

- Volatilización de los sulfatos desde una temperatura de 400°C.
- Descomposición del agua de cristalización de los minerales de la arcilla aproximadamente a 600 ° C.
- Combustión de los componentes a base de carbono a aproximadamente 700°C.
- Descarbonatización de los carbonatos a aproximadamente 850°C.
- Reacción del Fe_2O_3 , causando la liberación de oxígeno desde 1100°C.

2.2.1 Propiedades de las Arcillas Expandidas Térmicamente [59]

Las Arcillas Expandidas Térmicamente, se diferencian de los agregados de peso normal, por numerosas propiedades que garantizan un menor peso unitario en comparación con estos. Entre éstas, las características más importantes corresponden a las que se mencionan a continuación:

Densidad o Peso Unitario: Es la propiedad fundamental de los áridos livianos. La expansión, en su grado máximo, alcanza 5 veces el volumen inicial lo que representa una densidad 5 veces inferior a los agregados naturales, aproximadamente 300 kg/m^3 en la arcilla expandida más ligera y 1120 kg/m^3 en la arcilla con un grado muy incipiente de expansión. En cambio, el peso unitario de los agregados naturales oscila entre 1440 y 1760 kg/m^3 , por lo que la diferencia entre pesos unitarios de las AET y de los agregados de peso normal, repercutirá directamente en la densidad final del concreto liviano [63].

La flexibilidad de la fabricación permite realizar áridos livianos de distintas densidades dependiendo del tipo de concreto que se requiera. Las arcillas expandidas de densidades más bajas se utilizan con fines aislantes, mientras que las de densidades superiores ($500 - 700 \text{ kg/m}^3$) se aplican a la fabricación de concretos livianos estructurales.

Resistencia a la compresión del agregado [81]: La resistencia propia del agregado, se puede determinar por varias formas, entre ellos:

- Por rotura individual de varios granos.
- Por compresión lenta y a una carga determinada, de una cantidad de árido introducida en un mortero cilíndrico, de acero, con un embolo que ajusta suavemente y cuya parte superior esta dispuesta para recibir el esfuerzo de compresión de una prensa de las corrientemente empleadas para el ensayo de cementos [82].
- Por un ensayo comparativo de dos hormigones: uno preparado con agregados tradicionales y otro con el árido liviano que se quiere ensayar.

Es importante aclarar que para un mismo tipo de agregado liviano, su resistencia está ligada directamente a su densidad. Esto significa que para alcanzar una cierta resistencia del hormigón es preciso utilizar áridos con una densidad mínima, por debajo de la cual no resulta económico, ni en ocasiones físicamente posible, conseguir dicha resistencia [18]. Por lo general, la forma del grano influye grandemente en la resistencia propia del agregado, por lo que debe ser lo más esférica posible. Weigler y Karl [82] dan los siguientes valores de resistencia a la compresión, para gránulos de Arcillas expandidas Térmicamente comerciales:

Árido "Leca Giesche": 6.5 MPa

Pizarra Expandida "Berwilit": 14.5 MPa

Arcillas expandidas "Detoon" y "Liapor 8": 27.2 MPa

Así mismo, valores de resistencia del grano cambian, dependiendo del tamaño del agregado. En la Tabla 2.2, se muestran valores de resistencia registrados para el Leca sueco:

Tamaño mm	Densidad kg/m^3	Resistencia a la Compresión, Mpa
2-6	400	1.50
4-10	310	1.15
4-12	300	1.15
8-14	270	0.85
8-20	260	0.85
12-20	260	0.75

Tabla 2.2. Densidad y resistencia del Leca sueco para diferentes tamaños [17].

Absorción: Los agregados de peso normal comúnmente presentan absorciones de un 1% a 2% de agua por peso del agregado seco, por lo que la cantidad de agua absorbida, para realizar una mezcla con concreto de peso normal, se puede ajustar fácilmente.

En comparación, la alta absorción de agua es una característica intrínseca de los agregados livianos. La mayoría de los agregados livianos puede absorber de un 5% a 15% de agua por peso de material seco, valor que aumenta a un 20% para áridos con densidades por debajo de 600 kg/m^3 , valor de absorción en el que hay concordancia, que se debe limitar como máximo del árido liviano [63], [18].

En general, la alta absorción de los agregados livianos indica que éstos toman una parte importante del agua de mezcla, por lo que la literatura recomienda que los agregados deben utilizarse prehumedecidos pero no saturados, ya que la uniformidad del concreto depende de una parte importante de la uniformidad del contenido de humedad de los agregados. Así mismo, se recomienda que el humedecimiento previo debe realizarse varias horas antes del mezclado, para dar tiempo a que la absorción tenga lugar; por lo general se recomiendan 24 horas antes.

Forma y tamaño de la partícula: La forma, textura superficial y el tamaño de los agregados livianos puede influir en el costo, la trabajabilidad, el acabado, y la densidad del concreto. Muchos agregados livianos expandidos son angulares y tienen superficies irregulares, El tamaño máximo del agregado grueso raramente excede los 2 cm. Los agregados con estas características requieren un porcentaje mayor de finos para proveer el mortero adicional para una trabajabilidad adecuada. Este aumento de finos puede ser menor cuando se usan agregados “preformados” [63].

Aislamiento Térmico y Acústico [57]: El aire en reposo es el mejor aislante que se conoce. La fina estructura reticular de la arcilla expandida conforma multitud de cámaras microscópicas de aire que confieren a la arcilla su capacidad aislante, con conductividades térmicas de hasta $0.073 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C}$.

La arcilla expandida es un magnífico aislante acústico, sobre todo ante ruidos de impacto que se propagan por vibraciones de baja frecuencia. La estructura porosa del material amortigua las vibraciones, disipando la energía acústica.

Resistencia al fuego: La arcilla expandida es un material cerámico y refractario. Tiene un punto de fusión superior a los 1200°C y, además, la ausencia de materia orgánica en su composición (ya que está se volatiliza durante el proceso de fabricación) anula la emisión de gases tóxicos a altas temperaturas. La AET es un material completamente inerte, completamente estable a los ataques químicos, y resistente a las heladas [57].

Factor de gravedad específica: La gravedad específica bruta para los agregados livianos es generalmente entre 1.0 y 2.4. La gravedad específica bruta para cualquier agregado aumentará usualmente si el tamaño máximo de las partículas disminuye [63].

Reacción Alkali-Agregado [17]: Esta es una reacción que se produce entre los álcalis presentes en la fase intersticial del concreto (procedentes no sólo del cemento, sino del agua o de los áridos también) y determinadas variedades de áridos que contengan sílice

amorfa como pueden ser los minerales opalinos, ciertas rocas volcánicas con un alto contenido de sílice (andesitas o riolitas), algunas pizarras y filitas con elevado contenido en hidrómicas y zeolitas del tipo heulandita.

El producto de estas reacciones es un gel que absorbe agua, alcanzando un volumen muy superior al de sus materias primas. Esta expansión produce tensiones internas en el hormigón que pueden llegar a disgregarlo. Para que se produzca la reacción deben presentarse las siguientes condiciones:

1. Exceso de humedad.
2. Alto contenido alcalino del cemento.
3. Un contenido crítico de silicatos en el agregado.

La mejor impermeabilidad de los concretos livianos reduce el riesgo de humedad. Por otra parte, la arcilla expandida es un árido completamente inerte y carece de silicatos en su composición. El concreto de peso normal se hace usando agregados de piedra naturales, los cuales pueden ser sensitivos al álcali, ocasionando que el concreto se pueda deteriorar debido a la reacción álcali-agregado. En el caso de los concretos con agregados livianos, los cuales se hacen con áridos de distinta clase, se ha encontrado que agregados artificiales como las Arcillas Térmicamente Expandidas, no son sensitivas al álcali del cemento.

2.2.2 Procesos de Fabricación Industrial de las Arcillas Expandidas Térmicamente

Los agregados livianos a base de arcilla, se pueden explotar en canteras de arcillas por medio de equipos mecánicos tales como excavadoras, retroexcavadoras, o en caso de ser necesario, el arranque se realiza con explosivos.

Con respecto a las arcillas expandidas térmicamente (AET), las actividades de calcinación y expansión de este material, son mayoritariamente realizadas en hornos rotatorios a temperaturas de 1100 a 1300°C. Estos hornos son bien conocidos en la industria cementera y son los equipos más adecuados para este procedimiento por calor. La expansión depende del proceso de quema, de tal manera que las densidades de las AET varían produciendo unas arcillas expandidas más ligeras unas que otras.

Horno Rotatorio

El tipo de horno utilizado para fabricar las AET es similar al empleado en la industria cementera. Este consiste de un cilindro largo alineado con ladrillos refractarios y con capacidad de rotar alrededor de su eje longitudinal, el cual está inclinado a un ángulo de 5° con respecto a la horizontal. La longitud del horno depende de la composición del material grueso a ser procesado y es usualmente entre 30 y 60 metros.

El material preparado es depositado dentro del horno, mientras el quemado toma lugar en la parte más baja final. Como el material se mueve a la zona de calor, la temperatura de las partículas gradualmente se incrementa y la expansión toma lugar. El material es luego

descargado en un enfriador rotatorio, donde el agregado es enfriado por la entrada de aire frío.

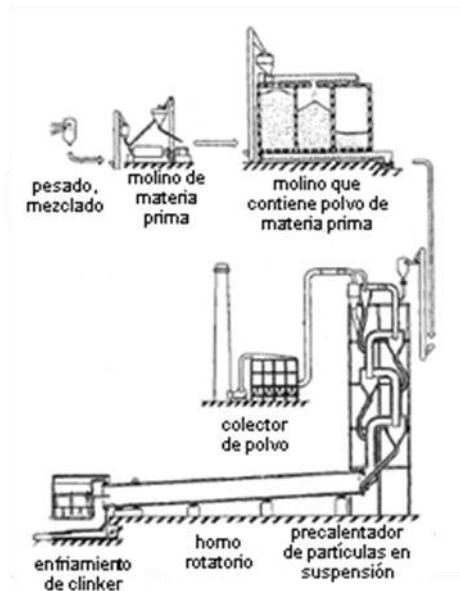


Figura 2.3. Horno rotatorio para producir AET [17].

De acuerdo al tipo de horno rotatorio utilizado, se pueden identificar los siguientes procedimientos:

2.2.2.1 Proceso Seco [17], [32]

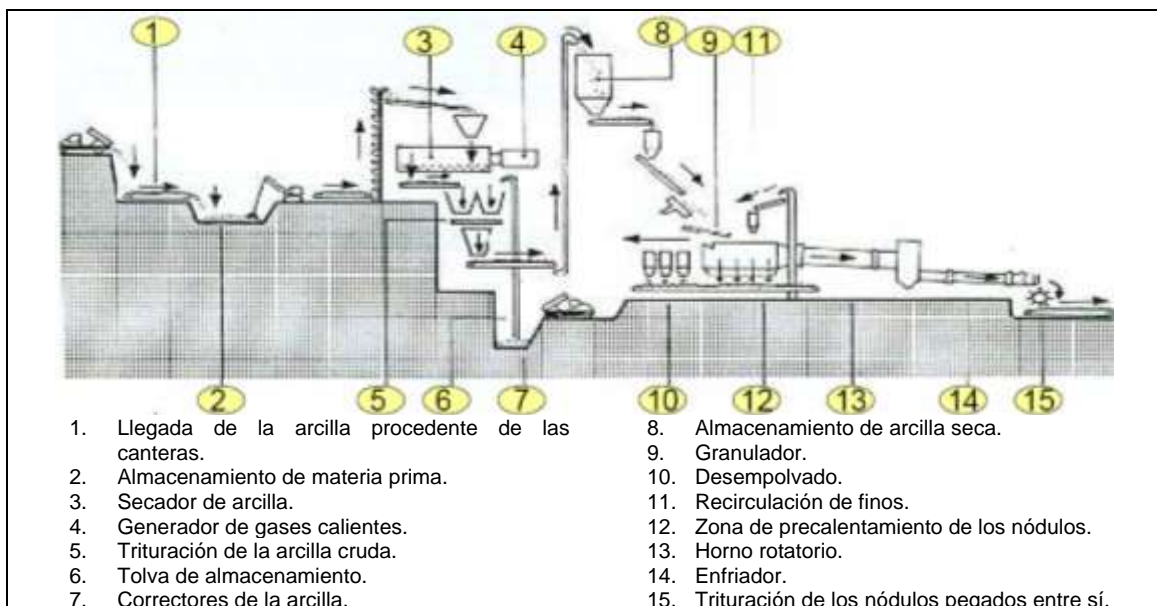


Figura 2.4. Proceso Seco para fabricar AET [65].

Este proceso es el representado en la figura anterior, y es muy conocido por las fábricas de cemento. La arcilla inicialmente tiene un 20 % de humedad y posteriormente se seca

hasta alcanzar un nivel entre un 7 y 10 %; posteriormente se realiza una pulverización del material, se precalienta, se granula por tamizado y se envía a un horno rotatorio donde el choque térmico provoca la expansión y la vitrificación de la superficie de las esferas; al final el material pasa por un tambor de enfriamiento. El material esféricamente formado se denomina "pellet", cuyos tamaños dependen de que tan finamente se haya molido la arcilla, es decir del tamaño de los gránulos, y del grado de homogenización del producto.

2.2.2.2 Proceso Semihúmedo [32],[62]

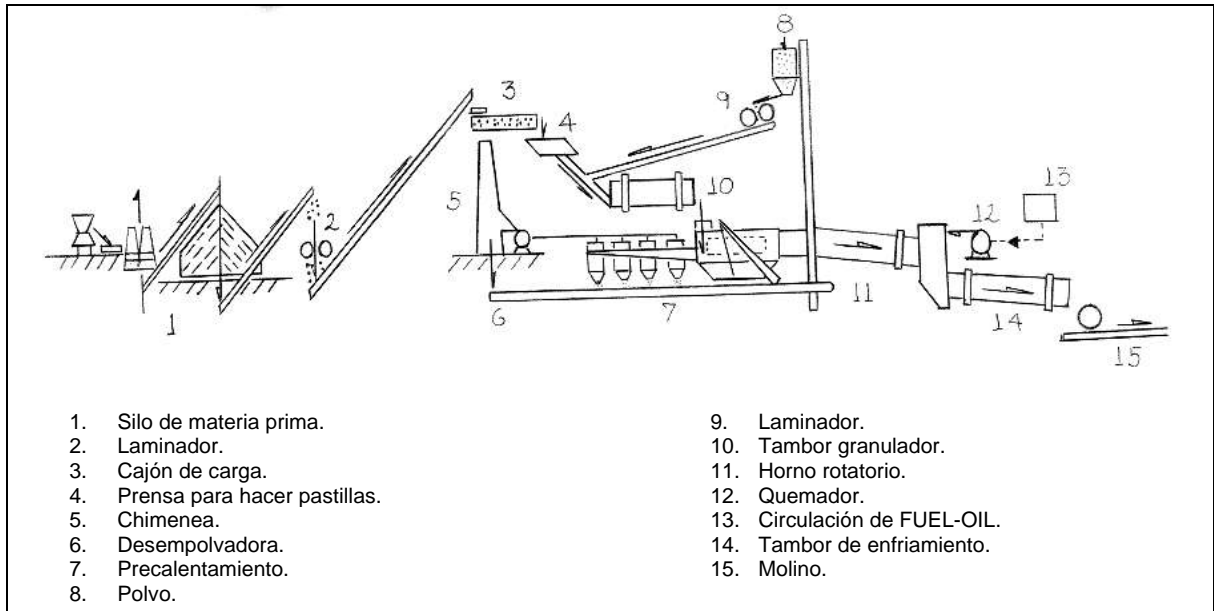


Figura 2.5. Proceso Semihúmedo para fabricar AET [32].

Este procedimiento consiste en que la materia prima, a la cual se le adicionan agentes que favorecen la expansión o agentes reguladores –para obtener homogenización-, recorre el trazado de la Figura 2.5, de tal manera que ésta pasa inicialmente por una “criba” con perforaciones circulares, que resultan en cilindros que son cortados automáticamente en forma de “pequeños corchos” por la rotación de hilos de acero a alta velocidad. Estos trozos de arcilla son cortados con una longitud de 10 a 12 mm de largo. El material moldeado se lleva previamente a un canal de secado o a un tambor secador. El hecho de que se pueda controlar el tamaño de los agregados de arcilla por medio del corte de las tiras, ha ocasionado que este método sea cada día más utilizado.

2.2.2.3 Proceso Húmedo [17], [32]

Este proceso es el más usado en el mundo para la fabricación de Arcillas Expandidas térmicamente (AET). Los agregados livianos de arcilla expandida se producen en un horno rotatorio de quema, donde previamente se introduce la arcilla con una humedad aproximada de un 25 % en forma de finas láminas en un horno de secado, con el fin de formar los gránulos de arcilla, evaporar el contenido de agua y precalentar el material antes de pasar al horno de quema.

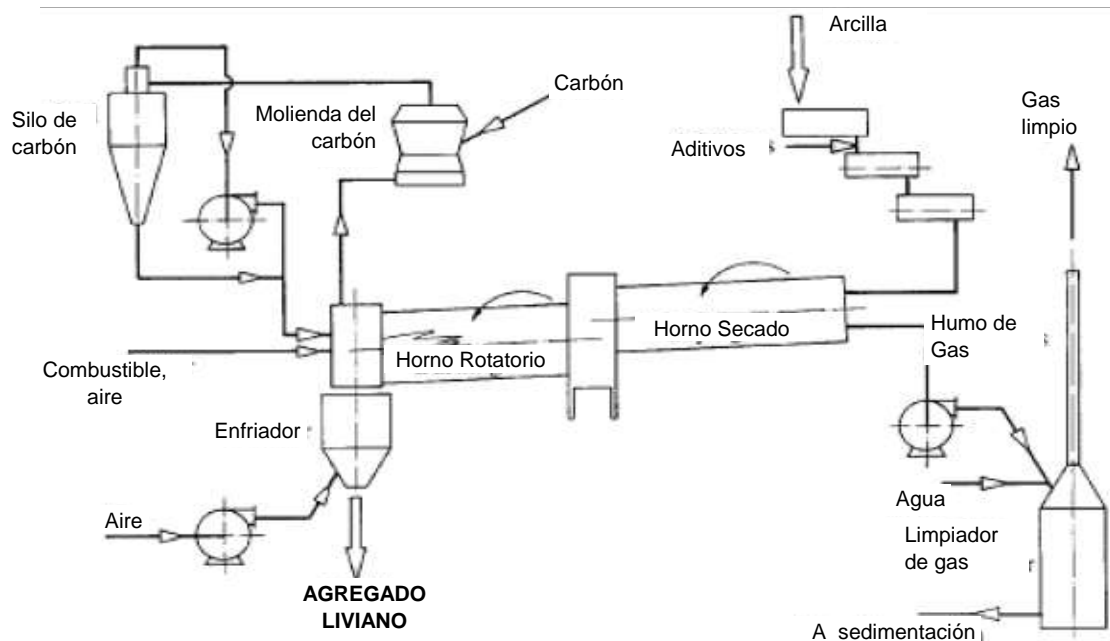


Figura 2.6. Proceso húmedo para fabricar AET [32].

Las AET son hechas de una mezcla de arcilla y agua que conforma una pasta, la cual es depositada en el horno rotatorio, donde se convierte en “pellets” de varios tamaños y formas, donde son sinterizados a un material vitrificado.

En Suecia, las AET se fabrican bajo el nombre de Leca, donde las arcillas son hechas de partículas finas pobres en limos, y se produce en todo el país por la compañía AB Svensk Leca TM. Las arcillas secan y expanden en hornos rotatorios a altas temperaturas, comprendidas entre 1100-1200°C, cuando pasan a través de la zona de quemado. El producto final es una arcilla expandida sellada exteriormente, que interiormente presenta hoyos de diferentes tamaños donde en la mayoría de los casos se encuentran interconectados.

2.2.3 Arcillas Expandidas Térmicamente Comerciales

Existen en la actualidad muchas marcas comerciales de AET que son utilizadas para producir Concretos Livianos Estructurales en el mundo, entre las más importantes se mencionan las siguientes:

2.2.3.1 ALIVEN [2].

El Agregado Liviano de Venezuela (ALIVEN), es un producto venezolano, correspondiente a una arcilla amarilla blanda, de color amarillo, montmorillonítica, que expande a 1200°C, en grandes hornos rotatorios por medio de un proceso de quema, en el cual a la arcilla se le incorpora aceite quemado, como adición para facilitar la expansión.

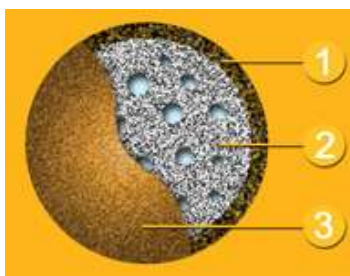


Figura 2.7. Granulo de ALIVEN [2].

Mediante este tratamiento la arcilla se transforma en gránulos esféricos porosos y livianos (1), con una superficie resistente de color pardo (3) y un interior grisáceo (2) formado por innumerables burbujas que contienen aire estancado, esta característica le otorga un poder altamente aislante y a la vez le permite el libre paso del vapor de agua.

Luego de este proceso tecnológico, "ALIVEN" se convierte en un agregado para la elaboración de concreto, de bajo peso e igual rango de resistencia que los concretos convencionales, cumpliendo de esta forma con las normas ASTM C330, C331 y C332.

Actualmente, la arcilla de Aliven se encuentra en el estado de Miranda, sector de Pitahaya y Charavelle, vía al municipio de Ocumarre del Tuy. Tiene reservas por cerca de 30 años. El producto Aliven, se vende en las fábricas de Venezuela en las siguientes presentaciones:

ALIVEN	Granulometría en mm	Densidades aprox. en Kg/m ³
Arena	0-4,75	600-700
Fino	5-9	380-420
Medio	10-14	340-380
Grueso	15-20	280-300

Tabla 2.3. Granulometrías de aliven [2].

Las presentaciones utilizadas para fabricar concreto liviano estructural corresponden al aliven fino y al medio.

2.2.3.2 Superlec [7]

Es un producto argentino producido por la empresa argentina Arcillex S.A., que corresponde a una arcilla expandida clinkerizada, que se caracteriza porque reduce hasta en un 30% el peso propio del concreto obtenido con áridos convencionales, para una misma resistencia. Se fabrica en hornos rotatorios a una temperatura de cocción de 1120°C

El Superlec, se vende en argentina en varias presentaciones, de acuerdo con la granulometría del material:

Granulometría mm	Usos del Superlec
0-3	Bloques, pequeños premoldeados, agregado fino para hormigones y morteros, concretos asfálticos.
3-10	Hormigón estructural, pretensados y postensados, concretos asfálticos, contrapisos, hormigones refractarios.
10-20	Contrapisos aislantes, drenajes hormigones refractarios
20-40	Drenajes, rellenos livianos y aislantes y parquizaciones.

Tabla 2.4. Granulometrías del Superlec [7].

2.2.3.3 Arlita [8]

Este es un producto español cuyo proceso de fabricación, corresponde a desarrollar la extracción, molturación, granulación, expansión y finalmente el enfriamiento y almacenaje del material de arcilla. Además, esta marca presenta el sello CE⁶ y el sello AENOR, el cual es un sello voluntario para garantizar unas calidades mayores a las exigidas por el mercado CE en España.



Figura 2.8. Granulo de Arlita [8].

⁶ Sello obligatorio para los materiales de construcción que se venden en la Comunidad Económica Europea (CEE).

Entre las principales propiedades de esta arcilla expandida están su ligereza, caracterizada por que expande 5 veces el volumen inicial lo que repercute directamente en la densidad; el aislamiento térmico, esta propiedad se da por la multitud de cámaras microscópicas de aire con conductividades de $0.099 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{k}$.

El producto Arlita, se vende en España en las siguientes presentaciones:

Arlita	Granulometría en mm	Densidades aprox. en Kg/m^3
G-3	10-16	325+/-50
F-3	3-10	350+/-50
F-5	3-10	550+/-50
F-7	3-10	750+/-50
F-5	0-5	575+/-50

Tabla 2.5. Granulometrías y densidades de la Arlita [8].

2.2.3.4 Leca [53].

El Light Expanded Clay Aggregate (Leca) es originario de Dinamarca, pero hoy día es fabricado en Dinamarca, Finlandia, Alemania, Italia, Noruega, Portugal y Suecia. El Leca es fabricado en hornos rotatorios a temperaturas entre 1100°C y 1200°C , por un proceso que corresponde a:

- Selección y preparación de las arcillas naturales.
- Control de temperatura de la arcilla dentro del horno rotatorio.
- Control de las fases de secado, expansión y quemado de las arcillas a una temperatura de 1150°C dentro del horno.
- Gradación y colocación del agregado en sacos.



Figura 2.9. Granulo de Leca [53].

En general, el Leca tiene los mismos usos que el Aliven, Superlac y la Arlita.

2.2.4 Requisitos Químicos y Mineralógicos de las Arcillas con Potencial de Expandir

Como se ha explicado, las arcillas que tienen alguna aptitud de expandir térmicamente, son arcillas especiales, que garantizan que el grano calcinado a cierta temperatura, contenga las siguientes características:

- Expansión del gránulo de arcilla.
- Vitrificación y sellamiento de la superficie exterior del material, con el objeto de producir un agregado poco absorbente.
- Una resistencia mecánica propia adecuada.

En general, numerosos académicos han estudiado las arcillas con capacidad de expansión por temperatura y han establecido que las arcillas que pueden cumplir con los requisitos anteriores, deben cumplir unos requerimientos químicos y mineralógicos, que garantizan un “perfil” adecuado de la arcilla con capacidad de expandir.

2.2.4.1 Requisitos Químicos [32], [62]

Los requerimientos químicos son indispensables si se desea escoger una arcilla con capacidad a la expansión térmica. Es por lo anterior, que Diana Parra Henao [62] afirma que: *“la necesidad de crear una fase fundida de viscosidad suficientemente elevada para encerrar un gas, conlleva ciertas restricciones en la elección de la arcilla. En efecto, los contenidos en sílice, alúmina y fundentes (cal, magnesia, óxido de hierro, álcalis) no deben sobrepasar ciertos límites, ya que, de lo contrario, la arcilla no fundiría a una temperatura suficientemente baja o fundiría en una masa insuficientemente viscosa”*.

La capacidad de vitrificación del material también es función de la composición química, puesto que las arcillas expandidas deben ser impermeables y selladas exteriormente, garantizando una buena resistencia mecánica. Respecto a lo anterior, Parra (2000) señala que la zona de temperaturas donde la vitrificación debe intervenir se sitúa entre el punto donde comienza la fusión y el punto en que la viscosidad es muy baja para que la expansión tenga lugar.

De otra parte, J.C.Cubaud y M. Murat han establecido una relación entre la aptitud a la vitrificación y las proporciones de $K_2O + Na_2O$ y $CaO + MgO$, obteniéndose una vitrificación correcta cuando se cumple la siguiente proporción:

$$\frac{K_2O + Na_2O}{CaO + MgO} > 1 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Ahora, referente a la expansión térmica de las arcillas, diversos investigadores lo han estudiado. Entre estos, quizás el más conocido corresponde a Riley, el cual promulgó lo que se denomina el diagrama de Riley, donde se señalan las zonas de aptitud a la expansión térmica, basándose en la composición química (% en peso) del material. Este diagrama es el siguiente:

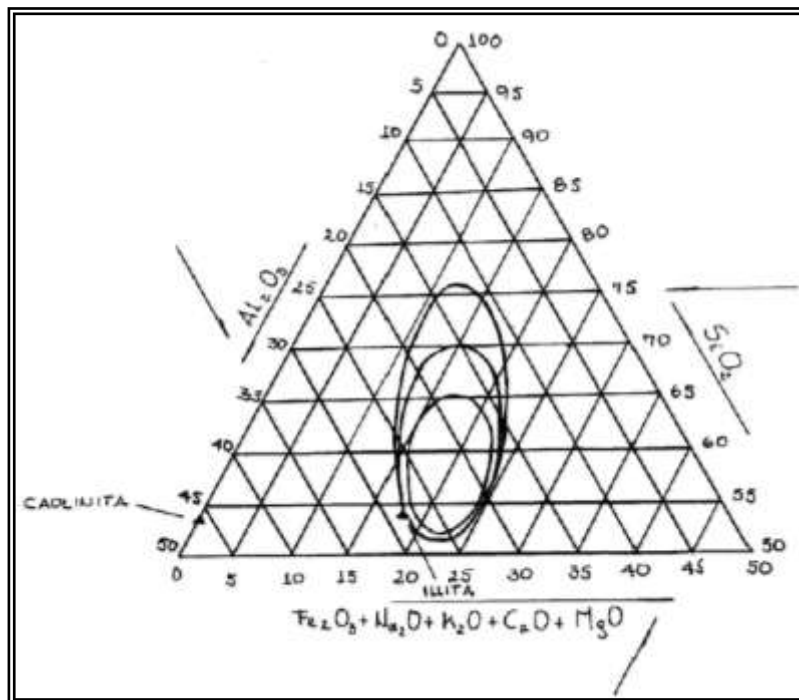


Figura 2.10. Diagrama de Riley [62].

Así mismo, varios académicos han formulado -según estudios experimentales- el perfil químico ideal de las arcillas con capacidad de expansión por temperatura. Algunos de estos se resumen en la Tabla 2.6, donde además se muestran los requerimientos químicos exigidos por la empresa Arlita, que como se mencionó fabrica AET en España.

COMPOSICION QUIMICA IDEAL DE LAS ARCILLAS						
	W. Kalb & E. Wilhelm		Solovieva		Arlita	
	% en peso		% en peso		% en peso	
SiO ₂	50	80	50	65	55	65
CaO	3	6	1	4	1	4
Fe ₂ O ₃	3	12	5	9	7	15
Al ₂ O ₃	8	25	16	20	12	25
TiO ₂	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	2	6	1.5	4.5	-	-
K ₂ O	2	6	1.5	4.5	-	-
MgO	3	6	1.5	3.5	1.5	3.5
SO ₃	2	5	0	1.5	0	0.7
S			0	1.5	0	0.5
Per. Calcinación	6	12	6	8		

Tabla 2.6. Composición química ideal según varios autores [62], [81].

En general, se señala que las arcillas situadas fuera de la zona de expansión del diagrama de Riley, no tienen aptitud alguna para la expansión. La anterior teoría, fue

confirmada por investigaciones realizadas por Giraldo [32], que concluyeron que: “aquellas muestras de arcilla naturales o mezcladas, cuyas composiciones se encontraban muy alejadas de la zona establecida por Riley como favorable a la expansión térmica, definitivamente no expandieron; mientras que aquellas muestras cuyas composiciones estaban dentro de la zona de Riley o próximas a ésta, no necesariamente expandieron; comprobando que el fenómeno de expansión térmica no sólo está gobernado por aspectos de composición química”.

En efecto, lo anterior indica que el perfil ideal de la AET debe cumplir requerimientos químicos y mineralógicos.

2.2.4.2 Requisitos Mineralógicos [51]

La composición química de la arcilla da una idea inicial de las arcillas potencialmente expandibles, pero no es la responsable del proceso de expansión dentro del grano del material. Esta expansión se debe principalmente a los minerales que conforman la arcilla, debido a las características propias de algunos de estos, que hacen que se produzca el proceso de hinchamiento del material.

Como se explicó en el apartado 2.1, los minerales que componen a las arcillas, se clasifican en once grupos, los cuales se subdividen en un total de 16 subgrupos, que se resumen en la Tabla 2.1. Pues bien, de estos subgrupos de minerales, pocos tienen la propiedad de poder expandir. Esta propiedad estaría influenciada por la capacidad catiónica de cambio (CCC) de la arcilla, en el espacio interlaminar formado de la condensación de estructuras finales compuestas de capas de grupos tetraédricos y octaédricos.

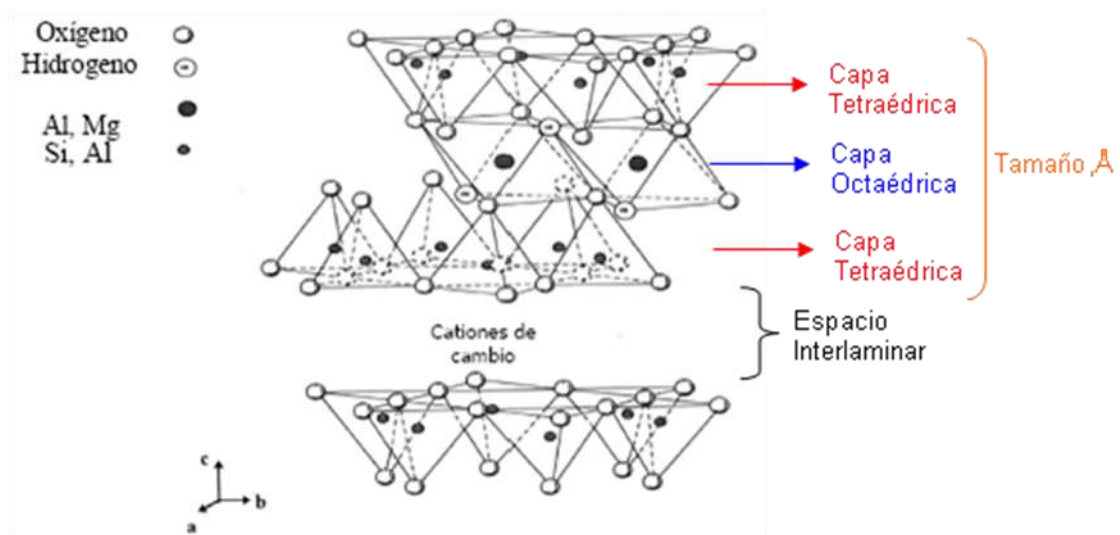


Figura 2.11. Composición del mineral Esméctica: grupo 2:1 [51].

De lo anterior, se deduce que los minerales de arcilla con propiedades de expansión, deberán presentar capacidad catiónica de cambio alta, basada en los siguientes tres aspectos:

1. Los minerales deben ser silicatos laminares, es decir, deben pertenecer a los grupos 1:1, 2:1 y 2:2.
2. Los minerales deben presentar carga laminar.
3. El espacio interlaminar debe tener cationes hidratados.

En vista de las anteriores condiciones, se descartan los minerales Sepiolita y Palygorskita, los cuales no cumplen la condición 1, debido a que tienen una estructura fibrosa y no pueden hincharse.

En cuanto al grupo de las cloritas, estas presentan carga variable y tienen en el espacio interlaminar cationes coordinados octaédricamente con grupos hidroxilo que impiden que se pueda intercambiar, por lo cual no pueden expandir.

En cambio, las micas cumplen con las condiciones 1 y 2, pero presentan un espacio interlaminar caracterizado por iones no hidratables, por lo que se pierde la capacidad de hinchamiento del mineral.

Con respecto a los grupos: serpentina, caolin, talco y pirofilita, estos presentan una carga de 0, por lo cual no se puede presentar el intercambio catiónico, produciendo que no puedan expandir.

Finalmente, los grupos de minerales que cumplen todas las condiciones para garantizar una capacidad de expansión, corresponden a la Esméctica y a la Vermiculita, de entre los que se desprenden los subgrupos: Saponita, Montmorillonita (Bentonita) y las vermiculitas trioctoédrica y dioctoédrica. En conclusión, las arcillas con potencial de expansión, serán aquellas que estén conformadas por minerales arcillosos, entre los cuales predominen la montmorillonita, la saponita o la vermiculita.

La expansión de los minerales de la arcilla se ve reflejada en el aumento del tamaño del mineral en Å. Así mismo, en ocasiones se presentan los denominados minerales interestratificados que corresponden a aquellos minerales de arcilla que están conformados por una estructura en la que alternan 2 o más tipos de láminas diferentes. Este interestratificado se divide en dos clases. La primera es el de secuencia ordenada, como son los interestratificados regulares como la secuencia clorita (Cl) –esméctica (Sm): Cl-Sm-Cl-Sm...Corrensita. La segunda se denomina secuencia al azar, o interestratificado desordenado, como por ejemplo la secuencia Chl-MontTosusita.

Investigaciones relacionadas con la mineralogía de las arcillas [32]

Everhart, con ayuda del análisis térmico diferencial, estudió la importancia de la composición mineralógica sobre la aptitud a la expansión en arcillas en las cuales predominaban las caolinitas y las illitas, que corresponden a una mica degradada. De la misma forma, Everhart indicó que la relación illita-caolinita para que los productos expandan térmicamente es de 2.7.

Con el fin de determinar los minerales responsables de la expansión, Riley preparó mezclas artificiales y concluyó que la pirita⁷, las hematites⁸, la dolomita⁹ y la calcita¹⁰ pueden producir gas a una temperatura suficientemente elevada para que se manifieste la expansión [21].

Ehlers, en particular, aplicó la cromatografía al análisis de los gases que provocan la expansión de una serie de arcillas específicas y demostró en esta investigación que el fenómeno de expansión es generado por la formación de CO_2 resultante de la descomposición térmica de la calcita $CaCO_3$ y de la ankerita $Ca(Fe, Mg)(CO_3)_2$. Esta descomposición se produce en el interior del nódulo cuya superficie se vitrifica por un tratamiento térmico rápido. Stamboüev, mostró la influencia de la formación de SO_2 y de CO en la expansión de arcillas ricas en carbono orgánico, álcalis y sulfatos.

En cambio, Schlubach (1988) indica que la composición de la arcilla expansiva deberá tener preferiblemente Montmorillonita o Illita, no es favorable ni la caolinita ni el cuarzo, el cual corresponde a un balasto inefectivo, por lo que su contenido debe ser lo mas reducido posible. Así mismo, indica que oclusiones gruesas como pirita, lima y yeso son desfavorables para la expansión y necesitan procesamientos adicionales que aumentan el costo de producción [76].

Ensayo por difracción de rayos X [70].

Este ensayo se utiliza para determinar y clasificar los minerales, por medio de la aplicación de la Ley de Bragg. Son especialmente utilizados para la identificación de minerales arcillosos.

La enciclopedia Virtual Wikipedia, define a la ley de Bragg como aquella que: *“permite estudiar las direcciones en las que la difracción de rayos X sobre la superficie de un cristal produce interferencias constructivas, dado que permite predecir los ángulos en los que los rayos X son difractados por un material con estructura atómica periódica (materiales cristalinos)”*. En general, se basa en lo siguiente:

- Cuando los rayos X alcanzan un átomo interactúan con sus electrones exteriores.
- Los electrones exteriores reemiten la radiación electromagnética en diferentes direcciones y aproximadamente con la misma frecuencia, produciendo el fenómeno conocido como dispersión de Rayleigh.
- Los rayos x reemitidos desde los átomos cercanos interfieren entre sí constructiva o destructivamente

⁷ Es un mineral del grupo de los sulfuros cuya fórmula química es FeS_2 .

⁸ Es un mineral compuesto de óxido férrico (Fe_2O_3) y constituye una importante mena de hierro ya que en estado puro contiene el 70% de este metal.

⁹ Es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio [$CaMg(CO_3)_2$].

¹⁰ Es un mineral del grupo de los Carbonatos, grupo V/B de la clasificación de Strunz.

La ley de Bragg, se define por la siguiente ecuación:

$$n\lambda = 2d\text{sen}(\theta) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

n = Número entero.

λ = Longitud de onda de los rayos X.

d = distancia de los planos de la red cristalina

θ = Ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

Lo anterior se aprecia más claramente en el siguiente gráfico:

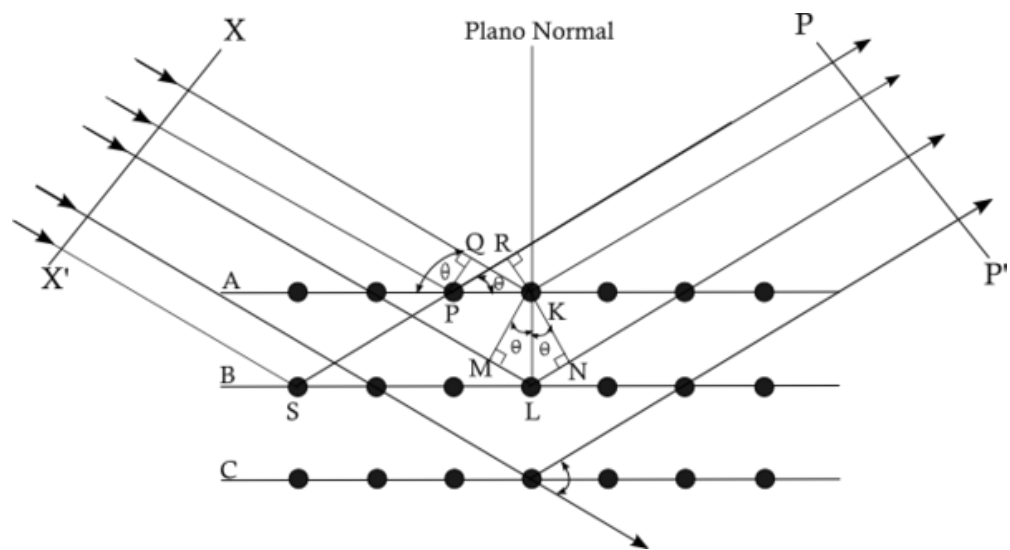


Figura 2.12. Ley de Bragg [54].

La aplicación de la ley de Bragg para la identificación de los minerales arcillosos, se basa en dos procedimientos:

1. Análisis de Polvos No orientados

En este primer análisis, se incluyen todos los minerales que componen la muestra de arcilla, incluyendo la fracción fina ($<2\mu\text{m}$) correspondiente a los minerales arcillosos. La muestra se irradia en el difractómetro con una radiación X que incide sobre los cristales dispuestos al azar, es decir, sin ninguna orientación preferencial. Cuando el ángulo de incidencia cumple con la ley de Bragg se producen los picos de difracción que permiten identificar todos los planos cristalográficos de cada uno de las especies presentes. En muestras constituidas por varios componentes, los difractogramas proporcionan información que proviene de cada una de las fases cristalinas que presentan un conjunto específico de valores "d" (Å) ó su equivalente en grados 2θ , con valores de intensidad específicas.

2. Análisis de la fracción de arcilla en lámina orientada

Este segundo análisis se realiza sobre la fracción fina de la arcilla (granos $<2\mu\text{m}$), la cual se coloca sobre lámina de vidrio y orientando los minerales arcillosos sobre sus planos basales perpendiculares al eje C. En el difractograma se grafican los picos en Å de las reflexiones de minerales de arcilla correspondientes a las basales (001), las segundas (002) o terceras (003).

Para identificar con mayor exactitud las diversas especies de minerales arcillosos, se procede a realizar tres tratamientos a esta fracción fina: Natural (N), Etilen-Glicol (E,G), 500°C.

La ref [70] indica que los procedimientos anteriores se pueden resumir de la siguiente forma:

- a) **Natural (N):** Es la primera medida que se realiza sobre las arcillas orientadas, con la lámina seca al aire. Se obtiene un difractograma donde se registran las reflexiones de los espacios perpendiculares al eje C, paralelos a los planos basales de las arcillas (00L), incrementando su intensidad con respecto a los difractogramas de la muestra desorientada.
- b) **Etilen-Glicol (EG):** El mismo espécimen utilizado para el análisis de arcilla orientada se lleva a irradiación después de someter la muestra a expansión bajo campana de vacío con vapores de Etilen-Glicol durante mínimo cuatro (4) horas. Este procedimiento tiene por objeto introducir en las interláminas de las arcillas expansivas moléculas orgánicas que separan las láminas, lo que repercute en un aumento del valor característico de espesor en Amstrongs (Å) para las especies minerales expansivas.
- c) **Quemado 500°C:** Este ensayo se realiza con el fin de estudiar el comportamiento de minerales arcillosos que pierden principalmente agua estructural y sufren colapso parcial o total de su estructura. Las muestras se llevan a una mufla a una temperatura estable de 500°C durante 3 horas.

Los anteriores tratamientos arrojarán como resultado las distancias en Å, de los principales minerales arcillosos de la muestra, para cada uno de los tres tratamientos. Posteriormente, la identificación de los minerales se realiza por medio de datos típicos de estos, obtenidas por experimentación para los tres procesos. Algunos de estos datos se resumen en la siguiente tabla.

Mineral Arcilloso	Natural	Etilen-Glicol	500°C
Ilita	10 Å	10 Å	10 Å
Caolinita	7 Å	7 Å	-
Vermiculita	14 Å	14 Å	10 Å
Clorita	14 Å	14 Å	13.6 Å
Esmectita	12-15 Å	17 Å	9.8-10 Å

Tabla 2.7. Datos de minerales arcillosos típicos para lámina orientada [70].

Finalmente, una vez identificado el mineral arcilloso, se procede a catalogarlo como muy abundante, abundante, común o escaso, de acuerdo con la intensidad del pico del difractogramas.

2.2.5 Adiciones para incrementar la expansión de las arcillas

Según lo que se ha estudiado, la arcilla con capacidad de expansión debe de estar compuesta de ciertos componentes químicos y mineralógicos, los cuales garantizan la producción de gases de CO₂, Co, O₂ y SO₂, que son los responsables de la expansión. Estos gases se pueden desarrollar de dos maneras: con el perfil adecuado de la arcilla o por la corrección del perfil inicial no apto, por medio de la inclusión de adiciones que hagan la labor de fundentes, modificando la composición química del material, haciéndolo apto a la expansión [76].

En la literatura se encuentra una variedad de aditivos propuestos; los cuales fueron resumidos por Giraldo (2004) y se muestran a continuación:

- Calcita o dolomita.
- "Nefelina sienita".
- Yeso.
- Hematites, óxido e hidróxidos de hierro.
- Pirita, marcasita.
- Sosa comercial.
- Harina.
- Betún.
- Aceite pesado con alto residuo de Carbono.
- Aceite Diesel.
- SiO₂ ó Al₂O₃.
- Carbón.
- Lejía silfítica o de desecho.
- Coques.
- Vidrio molido.
- Aserrín.
- Feldespato

De la misma forma, la ref [65] afirma que los productos que más se utilizan son los que sirven al mismo tiempo tanto de fundentes como de agentes productores de gas, que corresponden a: pirita, yeso, hematites, aserrín, petróleo, carbón pulverizado y aceite quemado.

Por lo general, las adiciones en las arcillas generan que el agregado resultante presente una gran expansión, una baja densidad y un mejor vitrificado de los gránulos. Hay que señalar, que en casi todas las Arcillas Expandidas Térmicamente Comerciales utilizan algún tipo de agente productor de gases, lo que hace a la adición en este proceso casi indispensable. Según Rodríguez [65], a pesar de que es la solución de incorporar adiciones es muy interesante, tiene el inconveniente de ser muy costosa.

2.2.6 Procedimientos de Expansión de las Arcillas

Existen tres procedimientos recomendados por la literatura para obtener una AET, los cuales corresponden a los trabajos realizados por De Suaza Santos (1972), Schellmann y Fastabend (1972) y Viera de Suaza y Bergstrom (1973). Estos métodos se basan en cuatro etapas: prefabricación, caracterización, pruebas preliminares de quema y ensayos de quema específicos. Así mismo, Parra (2000) y Giraldo (2004) han realizado investigaciones relacionadas con la expansión de arcillas colombianas en Medellín, por lo cual se reproducen los principales resultados. Los mismos se resumen y explican a continuación:

2.2.6.1 Método de Pérsio de Suaza Santos [22], [32].

Se toma el material previamente seco, molido hasta pasar el tamiz N° 80, humedecido y moldeado, al cual se le realizan ensayos de quema lenta y rápida, en hornos eléctricos o a gas.

- a. Ensayos de quema lenta. Este ensayo se le realiza a muestras de arcillas moldeadas o prensadas a 20 MPa, con unas dimensiones iniciales de 60 mm x 20 mm x 5 mm. Los ejemplares de arcilla son secados a 110°C y posteriormente quemados a diferentes temperaturas: 950°C, 1250°C y 1450°C, en un ciclo de calentamiento y quema de diez horas, en atmósfera neutra u oxidante. Se ha establecido por experimentación que las arcillas con mayor probabilidad de expandirse en los ensayos de quema lenta son aquellas que a 950°C y 1250°C vitrifican o presentan colores oscuros y que a 1450°C aumentan sus dimensiones.
- b. Ensayos de quema rápida. Los ensayos de quema rápida son realizados con las arcillas o mezclas que hincharon en el ensayo de quema lenta, utilizando las mismas condiciones iniciales. Estos ensayos se hacen a diferentes temperaturas: 1350°C, 1300°C, 1250°C, 1200°C, 1150°C, 1100°C y 1050°C, y con diferentes tiempos de introducción en el horno: 3 min., 10 min. y 15 min., ya sea en hornos eléctricos o a gas.
- c. Ensayos a escala piloto. Deben efectuarse una vez se hallan establecido las condiciones óptimas de expansión térmica de una arcilla.

2.2.6.2 Método de Schellmann y Fastabend [32], [73].

Este procedimiento se basa en las siguientes especificaciones:

- a) Moldeo. La arcilla se seca, pulveriza, homogeniza y moldea. Es necesario que las probetas tengan volúmenes muy similares, por lo que se sugieren esferas de 18 mm. de diámetro.
- b) Quema en horno. El horno debe ser precalentado por 10 minutos a la temperatura de quema (1100°C, 1150°C y 1250°C) en condiciones normales. La densidad en bruto es utilizada como medida del comportamiento de expansión térmica. Posteriormente se realizan varias quemas a 1200°C bajo atmósfera normal con

gránulos de arcilla precalentados por 30 minutos a diferentes temperaturas (400°C, 600°C y 800°C). Para finalizar se realiza una quema en atmósfera de oxígeno a 1200°C.

- c) Prueba en termomicroscopio.
- d) Evaluación del comportamiento pirolástico. La arcilla pulverizada es colocada en un crisol, se calienta durante diez minutos a diferentes temperaturas (1100°C, 1200°C y 1300°C) para valorar los fenómenos de fusión en el material: no sinterizado¹¹, ligeramente sinterizado, sinterizado, ligeramente aglutinado y aglutinado.
- e) Caracterización de las arcillas. Análisis Termogravimétrico, análisis químico, análisis mineralógico y análisis granulométrico.

2.2.6.3 Método de Viera de Suaza y Bergström Lourenço [32],[80].

Este procedimiento tiene como base los ensayos preliminares y específicos:

- a) Ensayos preliminares:
 - Observar el color de la arcilla en estado natural.
 - Ensayo para determinar la presencia o ausencia de CaCO₃ (carbonato de calcio).
 - Análisis químico.
 - Análisis Térmico Diferencial y de Difracción de Rayos X.
 - Ensayo de quema lenta o “ensayo preliminar para uso cerámico”.
- b) Ensayos específicos. Estos consisten en la realización de ensayos de quema rápida y de escala piloto.

2.2.6.4 Conclusiones de las investigaciones de Parra [62] y Giraldo [32], con arcillas colombianas.

Parra [62] estudió varios tipos de arcilla del Valle de Aburrá, las cuales sometió a un proceso de quema lenta hasta 1200°C, concluyendo que estas arcillas comenzaban a presentar expansión a esa temperatura, por lo que recomendaba estudiar arcillas con un proceso de quema rápida a temperaturas superiores a 1200°C.

Giraldo [32] retomó las mencionadas recomendaciones y estudió las arcillas del Valle de Aburrá, hasta temperaturas de 1300°C, con procedimientos de quema rápida y lenta, concluyendo lo siguiente: *“los ensayos de quema rápida corroboran y reproducen los mejores resultados obtenidos en quema lenta, pues las muestras expanden a las mismas condiciones de temperatura y composición; adicionalmente, se obtienen valores similares*

¹¹ Se define al proceso de sinterización como aquel en el que las piezas son sometidas a un ciclo térmico con temperatura y atmósferas controladas.

y aun mejores de densidad y significativamente mejores de porosidad y absorción de agua, lo cual permite afirmar que este tipo de ensayo simula el proceso a escala industrial de aquellas arcillas o mezclas que de antemano se sabe tienen aptitud a expandir térmicamente”.

Las anteriores investigaciones concluyen que las arcillas del occidente colombiano estudiadas, muestran mayor capacidad de expansión aplicando el procedimiento de quema rápida y a temperaturas superiores a 1200°C.

2.2.7 Requisitos de las Normas Técnicas Colombianas, NTC 4045, para Agregados Livianos

En Colombia, la normativa que clasifica a los agregados como livianos, corresponde a la Norma Técnica Colombiana, NTC 4045: “Agregados Livianos para Concreto Estructural”. La NTC 4045, cubre tanto a los agregados procesados, es decir artificiales, como a los naturales. Esta especificación exige ensayos químicos y físicos para los agregados livianos, con el objeto de estudiar sus propiedades. Los ensayos químicos son los siguientes:

- **Impurezas orgánicas (NTC 127):** Se rechazan los agregados que después del ensayo presenten un color más oscuro que el estándar.
- **Manchas (ASTM C 641):** se rechaza el material que produzca manchas muy fuertes, debido a un contenido de hierro igual o superior a 1.5 mg/200 g de muestra, expresado como Fe₂O₃.
- **Pérdida por ignición (NTC 184):** Los agregados livianos no deben tener pérdidas por ignición mayores al 5%.

En cuanto a las propiedades físicas de los agregados, la NTC 4045 menciona las siguientes ensayos:

- **Terrones de arcilla:** No deben exceder el 25% en masa seca.
- **Gradación:** El tamaño de los granos, deben cumplir los siguientes requisitos:

Designación de tamaño	Porcentaje (por masa) de tamices con orificios cuadrados								
	(1 pulg.)	(3/4 pulg.)	(1/2 Pulg.)	(3/8 Pulg.)	(No. 4)	(No. 8)	(No. 16)	(No. 50)	(No. 100)
	25.0mm	18.0mm	12.5mm	9.6mm	4.75mm	2.36mm	1.18mm	300µm	150µm
Agregado fino: 4.75 mm a 0				100	85-100		40-80	10-35	5-25
Agregado grueso: 25mm a 4.75mm	95-100		25-50		0-10				
19mm a 4.75mm	100	90-100		10-50	0-15				
12.5mm a 4.75mm		100	90-100	40-80	0-20	0-10			
9.5mm a 2.36mm			100	80-100	5-40	0-20	0-10		
Agregado combinado fino y grueso: 12.5mm a 0mm		100	95-100		50-80			5-20	2-15
9.5mm a 0mm			100	90-100	65-90	35-65		10-25	5-15

Tabla 2.8. Requisitos de gradación para agregados livianos para concreto estructural [43].

- **Masa Unitaria:** Los agregados Livianos deben cumplir los siguientes requisitos:

Designación del tamaño	Masa suelta seca máx (kg/m ³)
Agregado fino:	1120
Agregado grueso:	880
Agregado combinado fino y grueso:	1040

Tabla 2.9. Requisitos de masa unitaria de agregados livianos para concreto estructural [43].

Así mismo, la NTC 4045 especifica que se debe garantizar la uniformidad tanto de la gradación como de la masa unitaria de los agregados, por lo que los resultados de los ensayos de estas, no deben diferir en más de un 7% y 10%, respectivamente.

3. MARCO TEORICO DEL CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL

Desde la antigüedad, una de las mayores preocupaciones del hombre se ha centrado en la construcción con materiales resistentes, durables y económicos. Es por ésto, que el interés del hombre se enfocó en buscar materiales que permitieran disminuir el peso de las estructuras. Y esta búsqueda tuvo un resultado satisfactorio con la fabricación y puesta en marcha de la industria del concreto u hormigón, puesto que era un material que se comportaba de forma adecuada y era de cierta manera económico.

Pero, una de las desventajas del concreto convencional es el alto peso propio del hormigón. La densidad del concreto de “peso normal” está en el orden de 2200 a 2600 kg/m³. Este elevado valor, hace a este material estructural en ocasiones no económico, ya que un porcentaje importante en el diseño de obras civiles, corresponde a las cargas muertas, de donde forma parte el peso propio del concreto.

Pues bien, el Concreto de Agregado Liviano (CAL) es una nueva respuesta a la misma búsqueda. Se trata de un material en que se conjugan unas características mecánicas parecidas a las del hormigón tradicional, junto a una mayor ligereza propia; y que dependiendo del tipo de proceso de fabricación del elemento aligerante, traerá consigo importantes beneficios a la estructura desde un punto de vista global.

Historia [17], [27], [57]

El Concreto de Agregado Liviano, CAL, es un material que se conoce y utiliza desde tiempos antiguos. Hay evidencia de que los primeros indicios de construcción con agregados livianos, se realizaron en la antigua Babilonia (Irak). Posteriormente, fue utilizado como material en estructuras fabricadas por los griegos y romanos, empleando agregados livianos naturales como la piedra pómez.

Resultado de lo anterior, están algunas de las obras más magnificas de todos los tiempos; como son la Catedral de Santa Sofía (Estambul, Turquía), el panteón romano (siglo II A.C.), el acueducto Pont du Gard y el gran anfiteatro romano: el coliseo. Pero no sólo en el viejo continente se desarrollo esta industria, ya que se ha encontrado que esta tecnología también fue usada en la construcción de pirámides durante el periodo maya en México [17].

Sin embargo, la historia del concreto se partió en dos, cuando Aspdin en 1824, obtuvo la primera patente del cemento Portland, lo que ocasionó que el concreto fuera un material indispensable en la construcción.

Pero, el concreto de agregado liviano no había tenido hasta esa época un desarrollo importante en cuanto proceso de fabricación del material. Se tuvo que esperar hasta al siglo XIX en Alemania, para que se produjeran piezas de arcilla porosas, producto de la rápida evaporación del agua.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Coliseo_de_Roma



Figura 3.1. El Coliseo romano.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_del_Gard



Figura 3.2. Acueducto Pont Du Gard (Francia).

En 1917, Stephen J. Hayde introdujo en Estados Unidos, un proceso de producción de áridos livianos de esquistos expandidos. Descubrió que ciertos esquistos, arcillas y pizarras se expanden cuando se exponen a altas temperaturas en un horno rotativo produciendo un agregado liviano, resistente y duro. Esta tecnología fue utilizada en la construcción de cascos de buques durante la Primera Guerra Mundial. Así mismo, durante los años 20 y 30, se construyeron edificaciones como el hotel Park Plaza de St. Louis y el edificio de la South Western Bell Telephone en Kansas City.

Posteriormente, después de la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo del concreto liviano estructural tuvo un marcado aceleramiento en Estados Unidos, con la producción en masa de agregados livianos artificiales. Lo anterior se debió a la creciente demanda de agregados para concreto y a que en algunos lugares de ese vasto país no era viable el construir con agregados de peso normal, debido a los grandes recorridos que se tenían que realizar lo que incrementaba el costo del transporte del material.

Es por lo anterior que se considera que la utilización del concreto liviano estructural se inició en la década de los cuarenta, pero su verdadero desarrollo se alcanzó entre mediados de las décadas de los cincuenta y de los sesenta. Y consecuencia de ese desarrollo, son las estructuras del Australia Square (184 metros de altura) y el Park Regis (140 metros de altura). Ambas edificaciones localizadas en Sydney, y que en su momento fueron consideradas como las más altas del mundo con este tipo de material.

Hoy en día, la industria del concreto liviano estructural se ha desarrollado de una manera tan importante, que es común ver edificaciones realizadas con concreto liviano en muchos lugares del mundo.

Fuente:
<http://postalesinventadas.blogspot.com/2009/09/australia-square-and-tower-sydney-dear.html>



Figura 3.3. Edificio Australia Square Tower.

Fuente:
<http://hotels.travelmate.com.au/Hotelsf/Sydney/Park-Regis-City-Centre-Hotels-PRHSYD.aspx>



Figura 3.4. Edificio Park Regis.

3.1 GENERALIDADES

3.1.1 Definición

El documento ACI 213R-03 [3] define al concreto estructural de peso liviano como “*aquel que tiene una resistencia mínima a la compresión a los 28 días de 17.5 MPa, que presenta una densidad en equilibrio entre 1120 y 1920 kg/m³ y una consistencia completa de agregado liviano o una combinación de agregados de peso normal y liviano*”. También aclara que este tipo de concreto esta elaborado con agregados estructurales livianos definidos bajo las especificaciones del ASTM C 330.

La norma sismorresistente colombiana, NSR-10, lo define como: “*Concreto con agregado liviano que tiene una densidad de equilibrio, tal como la define NTC 4022 (ASTM C567), entre 1440 y 1840 kg/m³. El concreto liviano cubierto por el Título C del reglamento NSR-10 corresponde a un concreto cuyos componentes cumplen de manera estricta lo requerido en este Título C –CONCRETO ESTRUCTURAL-*”.

También en la misma normativa, se especifica que para que un concreto pueda hacer parte de un sistema sismo-resistente tendrá que tener una resistencia mínima a la compresión medida a los 28 días de 21 MPa.

3.1.2 Requerimientos que deben satisfacer los Agregados Livianos.

Los áridos utilizados para fabricar concreto liviano se pueden clasificar en dos grupos según su origen: naturales y artificiales. Comúnmente, los agregados livianos naturales no son aptos para configurar hormigones con importante capacidad estructural; y solo los artificiales sirven para tal finalidad. Entre los últimos se encuentran las arcillas expandidas, las pizarras o esquistos expandidos y las cenizas volantes calcinadas. Una clasificación de los concretos se puede dar de acuerdo a la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar, tal como se muestra en la tabla siguiente:

No.	Tipo de concreto	Densidad seca	Resistencia Compresión
		kg/m ³	Mpa
1	Aislamiento	<500	0.7 -7
2	Bloques	500-800	7 - 14
3	Estructural	1400-1800	>17

Tabla 3.1. Clasificación de los concretos livianos [34].

Entonces, si se desea construir un concreto liviano estructural, que cumpla con los requerimientos de densidad estipulados, se necesita que los áridos livianos que lo componen, cumplan ciertas características que se mencionan a continuación:

- Forma redondeada, compacta y con superficie cerrada.
- Ser químicamente inerte respecto a las armaduras y el cemento.
- Volumen con poca variabilidad ante los cambios de humedad y temperatura.
- Resistente a los fenómenos climatológicos y efectos del transporte.
- Tener resistencia propia suficiente.

- De calidad homogénea.
- Con la menor densidad posible.
- Tener una buena adherencia con la pasta de cemento.

En principio, los agregados livianos que pueden cumplir estas condiciones son los de arcilla expandida, los de pizarra expandida y los de cenizas calcinadas o expandidas. El primero corresponde al árido más utilizado en el mundo para producir concretos livianos estructurales y es el que tiene más posibilidades de desarrollarse para integrar un concreto liviano estructural en Colombia, por las siguientes razones:

1. Abundancia de la arcilla como material de construcción.
2. Existen estudios por parte de Ingeominas [24] que permiten identificar fuentes de extracción de la arcilla con propiedades químicas y mineralógicas adecuadas para la expansión de forma natural o con agentes que favorezcan la expansión.
3. Posibilidad de desarrollo de plantas de producción de Arcilla Expandida Térmicamente (AET), con base a las tecnologías actuales de producción de la industria cementera.

3.1.3 Ventajas de los concretos livianos

Los concretos estructurales con agregados livianos han sido utilizados en una gran cantidad de aplicaciones desde la segunda mitad del siglo XX a nivel internacional, transformándose en una alternativa muy conveniente respecto a los concretos de peso normal, utilizados de forma tradicional, debido principalmente a los beneficios derivados de poseer una menor densidad, la cual trae consigo un gran número de ventajas. Entre estas se pueden mencionar:

- 1) Reduce la carga muerta de una estructura (disminuye el peso total de la misma).
- 2) Disminución de tamaño de las fundaciones.
- 3) Disminución de fuerzas inerciales y mejor comportamiento sísmico.
- 4) Mejora las condiciones de habitabilidad, produciendo un mayor aislamiento térmico y acústico.
- 5) Hay un menor riesgo de humedad.
- 6) Una menor presencia de vibraciones.
- 7) Reduce el tiempo de ejecución de acabados.
- 8) Reduce el desperdicio de materia prima en obra.
- 9) Logra resistencias iguales a las que ofrece el concreto de peso normal.
- 10) Proporcionan una relación de Resistencia-Peso más eficiente en elementos estructurales.
- 11) Proporciona una estructura de concreto con mayor calificación de resistencia frente al fuego.
- 12) Desarrollo de tecnologías de prefabricación.
- 13) Menor deformabilidad térmica.
- 14) Se reducen los costos de la edificación.

3.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO LIVIANO FRESCO

3.2.1 Manejabilidad

Neville define a la manejabilidad en “sentido estricto” como “*la cantidad de trabajo interno útil necesaria para producir la compactación total. El trabajo interno útil es una propiedad física del concreto y es el trabajo o energía requerido para vencer la fricción interna entre las partículas en el concreto. En la práctica, sin embargo, se requiere energía adicional para vencer la fricción de la superficie entre el concreto y los moldes o el refuerzo. Además, se pierde energía en la vibración de los moldes y en la del concreto que ya ha sido compactado. En la práctica, es difícil medir la manejabilidad como se ha definido; lo que medimos es la manejabilidad aplicable a un método en particular*” [60].

Una definición más sencilla y práctica corresponde a que la manejabilidad o trabajabilidad se puede definir como la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra (colocado y compactado) con los medios de compactación disponibles [33].

En efecto, la manejabilidad constituye uno de los tres pilares del concreto (los otros dos son resistencia y durabilidad), necesarios para poder construir estructuras con calidad. Es importante, debido a que un concreto que no tenga una buena trabajabilidad, a pesar de que cumpla con requisitos de resistencia y durabilidad en el laboratorio, producirá mezclas secas, que son de muy difícil ejecución en la práctica.

3.2.1.1 Factores que afectan la manejabilidad

Independientemente, de si las mezclas de hormigón resultante son hechas con áridos de peso normal o livianos, la manejabilidad se encuentra afectada por una serie de factores, entre los cuales están los siguientes:

a) Contenido de agua:

A mayor contenido de agua en la mezcla, habrá una mayor fluidez en el concreto. En la práctica, es frecuente incrementar el contenido de agua para mejorar la trabajabilidad, aunque ésto no es conveniente, ya que trae consecuencias importantes como es una disminución en la resistencia. En general, lo que se hace es aumentar el contenido de agua incrementando también el de cemento, para mantener constante la relación a/mc.

b) Tamaño y gradación de los agregados gruesos:

A menor tamaño del agregado será mayor la manejabilidad, aunque se aumenta la superficie específica, por lo que se consumirá una mayor pasta de cemento. De la misma forma, unos agregados mal gradados presentan un exceso de vacíos que deben ser llenados con mortero en el caso del agregado grueso, para que la mezcla sea manejable y no quede porosa [71].

c) Forma y textura de los agregados gruesos:

Agregados de textura lisa y forma redondeada producen concretos más manejables que aquellos con textura áspera y forma angular.

d) Agregado fino:

Arenas muy finas o gruesas, dificultan la manejabilidad en el concreto, por lo que la literatura recomienda un modulo de finura entre 2.2 y 3.0. Así mismo, el mayor contenido en arena producirá una mayor trabajabilidad, aunque aumentos exagerados, producirán problemas de durabilidad [60].

e) Relación arena-agregado:

La relación de agregados y cemento es un factor importante que influencia la trabajabilidad. Relaciones Agregado/cemento bajas, producirán una mejora en la manejabilidad, ya que hay más pasta de cemento que distribuir en los agregados.

f) Contenido de aire:

Cuando se incorpora de forma intencional aire en la mezcla de concreto, se mejora la manejabilidad en el hormigón, debido a que las burbujas introducidas permiten una mejor movilidad de los agregados.

g) Uso de aditivos plastificantes:

Estos tipos de aditivos, mejoran notablemente la manejabilidad en el concreto. Es la solución más utilizada y eficaz para darle trabajabilidad a mezclas secas de difícil ejecución.

Adam Neville indica que en el caso de los concretos livianos, el agregado liviano tiende a disminuir la manejabilidad, ya que estas mezclas son propensas a la aspereza, por lo que la solución corresponde a incluir aire incorporado, el cual reduce la tendencia a la segregación y exudación. Así mismo, indica que el uso de agregados finos de peso liviano, así como de agregados gruesos livianos, agravan el problema de manejabilidad baja. Por tanto, es preferible emplear agregados finos de peso normal con agregado grueso de peso liviano [60].

El problema de manejabilidad en los concretos livianos se incrementa, si se tiene en cuenta que los agregados livianos, por lo general son muy porosos, y tienen valores de absorción elevados; lo que repercute en que consumirán una parte importante del agua de mezclado. El anterior problema se soluciona prehumedeciendo los agregados livianos, de tal manera que no consuman parte del agua de mezclado, o efectuando las correcciones por absorción del material.

3.2.1.2 Determinación de la manejabilidad

Como se ha mencionado, la medida de la manejabilidad es un tanto difícil, por lo que numerosos académicos, han propuestos distintas metodologías para determinar esta difícil propiedad. Algunas de las pruebas más comúnmente utilizadas para medir la trabajabilidad corresponden a las siguientes:

- Ensayo de asentamiento por el cono de Abrams.
- Consistómetro de Vebe.
- Esfera de Kelly.
- La mesa vibratoria.

De todos los anteriores, el más utilizado en el medio colombiano corresponde al ensayo de asentamiento. Este método se describe en la Norma Técnica Colombiana NTC 396. Véase Anexo A.

En cuanto a la mejor prueba para determinar la manejabilidad en el concreto liviano, no hay unanimidad entre los muchos investigadores de este material, ya que algunos afirman que la prueba del asentamiento es perfectamente aplicable al concreto liviano; mientras que otros la refutan prefiriendo el ensayo de mesa vibratoria.

Referente al ensayo de asentamiento, hay coincidencia entre diversos autores en que debido al menor peso del agregado liviano, el concreto liviano no se asienta tanto como el concreto de peso normal para una misma trabajabilidad. Es raramente necesario excederse de un asentamiento de 10 cm para un concreto liviano, ya que valores de asientos más elevados inducen problemas de segregación por flotación del agregado, dificultando el acabado. En general se aconseja evitar la consistencia fluida, la cual se emplea únicamente, por exigencias de la puesta en obra, cuando se emplean procedimientos de bombeo [18] [63].

En consecuencia, se pueden utilizar las definiciones de consistencia aplicadas al hormigón ordinario en función de su asiento en el cono de Abrams:

Consistencia	Asiento
	cm
Seca	0 - 2
Plástica	3 - 5
Blanda	6 - 9
Flúida	≥ 10

Tabla 3.2. Tipos de consistencia según asentamiento [18].

Chandra & Berntsson afirman que el ensayo de cono de Abrams tiende a subestimar la trabajabilidad debido a la baja densidad y a la menor fuerza para deformarse. Indican que la mesa vibratoria es mejor para medir asentamientos, y que en la caso del concreto liviano es posible desarrollar el “ojo” para evaluar la manejabilidad del concreto fresco.

3.2.2 Segregación y exudación

La segregación puede ser definida como la separación de los materiales constituyentes del concreto. Un buen concreto corresponde a aquel en que todos los ingredientes están apropiadamente distribuidos para hacer una mezcla homogénea. La segregación ocasionalmente se produce por varios factores; entre estos están: un exceso de vibrado del material, una pobre distribución granulométrica, el tamaño de los agregados, un inadecuado transporte y un mal mezclado.

La exudación o sangrado es debida a que parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie del concreto recién mezclado o durante el proceso de fraguado [71]. Se produce por un exceso en el agua de mezclado, y es perjudicial para el hormigón, puesto que al subir a la superficie deja pequeños caminos capilares que aumentan la permeabilidad en el concreto.

En los concretos livianos, al tener un agregado con una densidad muy baja, menor que el agua, tiende a presentarse la segregación por flotación del material. Para solucionar ese problema, se sugiere evitar un asentamiento muy alto, así como de utilizar aditivos incorporadores de aire que de paso ayudan a evitar una exudación del agua de mezclado en el concreto.

3.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO LIVIANO ENDURECIDO

3.3.1 Resistencia del Concreto Liviano

En general, la producción de un concreto liviano está encaminada a cumplir con el mismo objetivo que tiene la dosificación de un concreto de peso normal y que corresponde a desarrollar altas resistencias a la compresión, debido a que está es la característica más importante del concreto endurecido. A partir de su análisis, se deriva el estudio de otras propiedades del concreto como son: la resistencia a la tracción, al corte, el módulo de elasticidad y la densidad, entre otras.

Naturaleza de la resistencia del concreto liviano

Como se sabe, el concreto es un material compuesto por una pasta de cemento, agregados finos, agregados gruesos, contenido de aire y eventualmente adiciones y aditivos, los cuales interactúan como una masa compacta de hormigón, que por su naturaleza es discontinua y heterogénea.

En cualquier sistema heterogéneo, sus propiedades y resistencia dependen de las características químicas y físicas de sus constituyentes y de las interacciones entre ellos mismos. En el caso de los concretos de peso normal, Sánchez de Guzmán [71], indica que *“la falla de un concreto esta regida por las resistencias relativas del agregado, la pasta y de lo que se conoce como la interfase de adherencia. Por lo general, en los agregados naturales de peso normal sucede que las partículas tienen una resistencia propia mecánica superior a la pasta de cemento endurecida, por lo cual la resistencia a compresión del concreto no se ve muy afectada por la resistencia del agregado a compresión”*.

En ese tipo de concretos –de peso normal-, el mecanismo de transmisión de los esfuerzos internos se caracteriza porque el mortero constituye el elemento de transmisión de las tensiones de árido a árido. En cambio, en el concreto liviano, se tiene un árido de baja densidad, el cual es mecánicamente débil, y que es el encargado de aligerar el peso del hormigón y no participa en la transmisión de esfuerzos, por lo que este papel lo debe asumir el mortero.

Así mismo, se ha establecido que la deformabilidad de los concretos livianos es función de los elementos que lo componen: el mortero y los áridos. Pellicer [64] indica que *“la diferencia del comportamiento del hormigón liviano con respecto al normal es grande. En este, los agregados son normalmente más rígidos que la pasta; por ello, cuando está bajo carga, las tensiones se concentran en los áridos, que no están en contacto, y así la transmisión de cargas de uno a otro se realiza a través de una capa de mortero que recibe una carga adicional grande que, en teoría, podría hacerle entrar en período*

plástico. En el concreto liviano, por el contrario, los áridos son menos rígidos que la pasta del mortero, por lo que deberá soportar la carga inicial, pero no la carga adicional.”

De lo anterior se deducen varias cosas: en primera medida, en un concreto liviano la pasta de mortero debe ser de mayor calidad que en uno de peso normal, porque es la encargado de transmitir las cargas dentro de la masa de hormigón. En el concreto normal, el mortero goza de un margen de trabajo más amplio porque, aunque llegase a tornarse plástico, no se rompe y debido a los agregados que lo componen, no se deforma fácilmente.

Si la rigidez del árido es menor que la del mortero, como es el caso del concreto liviano, al finalizar el periodo elástico, sobreviene la ruptura del agregado de forma brusca. Es por lo anterior, que el concreto liviano es un material frágil, ya que la forma de falla de éste, no se da por la pasta de mortero, sino por una rotura a través del árido generando en el concreto una falla explosiva.

3.3.1.1 Resistencia a la Compresión

Es la característica más importante a determinar de una mezcla de hormigón. Teóricamente, la similitud entre los módulos de elasticidad de la pasta de cemento y el agregado liviano genera una mejor adherencia en la interfase pasta-agregado que resulta en una mezcla más eficiente en comparación con el concreto normal. Existen muchas variables a considerar en la resistencia final del hormigón liviano, las cuales se explicaran a continuación.

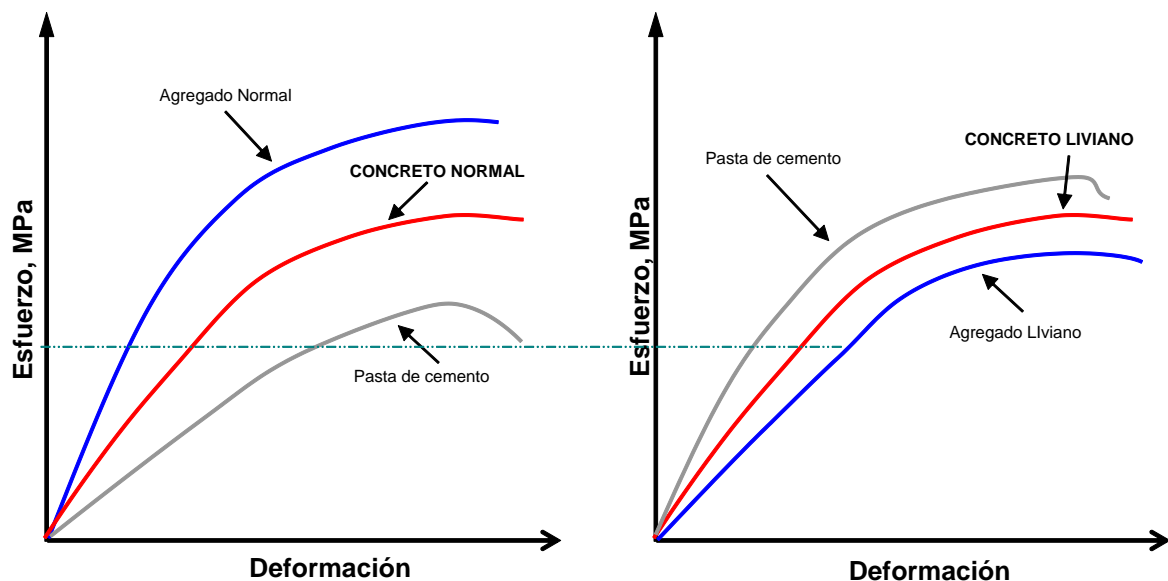


Figura 3.5. Resistencia de los agregados, mortero y concreto para concreto normal y liviano [18].

Relación Densidad y Resistencia

En términos generales, se ha establecido que la resistencia intrínseca del hormigón liviano esta relacionada de una forma proporcional a su densidad, es decir, a mayor densidad del concreto, mayor resistencia a la compresión¹². Por lo tanto, la resistencia de un concreto liviano está íntimamente ligada al aporte de los componentes de la mezcla de hormigón, dentro de los cuales, el encargado de disminuir la masa de hormigón corresponde al agregado liviano. Una relación entre el tipo de agregado, densidad, resistencia del concreto y su campo de utilización, se muestra en la figura siguiente:

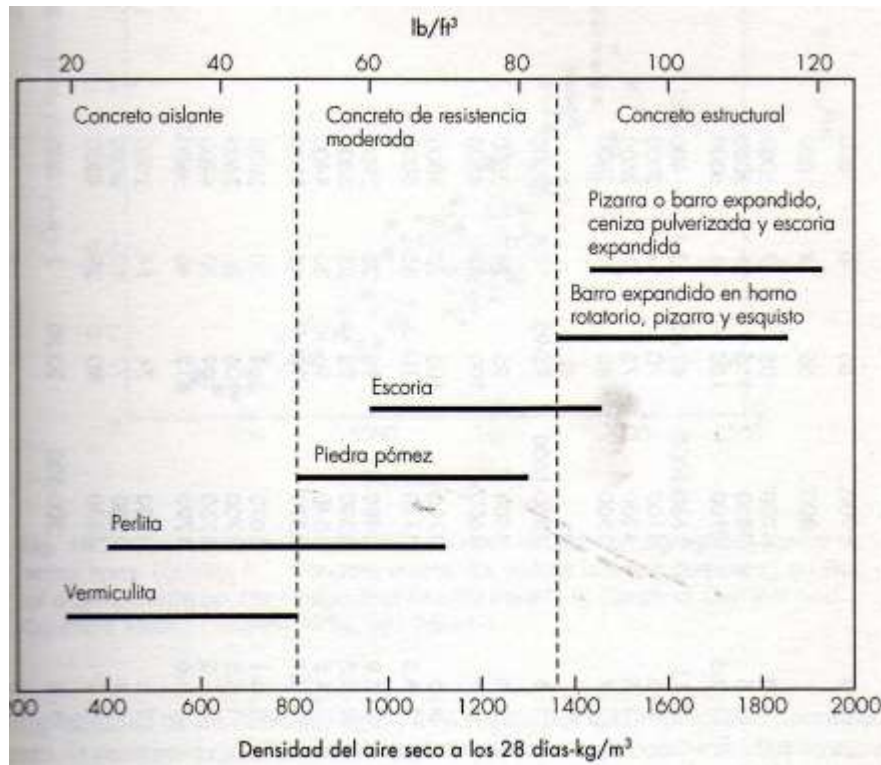


Figura 3.6. Clasificación de los concretos livianos por densidad y resistencia [60].

La densidad de los agregados livianos depende en gran medida del material y procedimiento utilizado para fabricarlos, ya que se puede utilizar un mismo material y una técnica de producción distinta del agregado lo que conlleva a una densidad y resistencia distinta de los áridos.

Además de la densidad de los agregados, la densidad del concreto también depende del grado de gradación de los agregados, de su contenido de humedad, de las proporciones de la mezcla, del contenido de cemento, la relación agua/material cementante, las adiciones químicas y minerales, etc. Igualmente, la densidad final del hormigón dependerá de circunstancias tales como el grado de compactación del concreto y de las condiciones de curado, entre otras.

¹² Esta relación aplica, para concretos hechos con el mismo tipo de agregado liviano.

Factores que influyen en la resistencia del concreto.

Existen muchas variables que influyen la resistencia final de hormigón en estado endurecido, entre éstas se pueden mencionar las siguientes:

a) Contenido de cemento.

El cemento corresponde al componente más activo de la mezcla de concreto, por eso es natural pensar que tiene una gran influencia en su resistencia. Como se explicó anteriormente, en el caso de los concretos livianos, se necesita una pasta de cemento de mayor "calidad", por lo que si se comparan las dosificaciones de un concreto de peso normal y uno liviano, se encontrará que para una misma resistencia, el contenido de cemento es mayor en el hormigón liviano.

En general, para hormigones livianos con fines estructurales se recomienda un contenido de cemento como mínimo de 300 kg/m³ y como máximo de 500 kg/m³ para evitar un excesivo desarrollo de calor, que puede conllevar a una posible fisuración del hormigón.

Aunque se tiene el concepto general de que a mayor contenido de cemento en la dosificación, se producen resistencias más altas, esto no siempre es cierto. Por ejemplo, en la Chalmers University of Technology de Gotemburgo (Suecia), de amplia experiencia en el estudio de concretos livianos, han desarrollado concretos livianos en base a diferentes agregados livianos y han encontrado que, comparando dos mezclas de hormigón con variaciones en algunos casos del 40% de contenido de cemento, se obtienen resultados de una mayor resistencia a la compresión y de una menor densidad para mezclas con el menor contenido de cemento, lo que corrobora que la resistencia final en el concreto liviano depende en gran medida del agregado liviano utilizado.

b) Relación Agua- Material Cementante (a/mc)

Es el factor más importante en la resistencia del concreto de peso normal, de tal manera que a una relación agua/material cementante más baja se presentarán más altas resistencias. En contraste, en el concreto liviano, esta relación tiene un menor peso, debido a que es un valor difícil de determinar por la absorción en el tiempo de los agregados livianos.

Debido a las altas absorciones que presentan los agregados livianos, la relación a/mc en las mezclas de concreto liviano no son directamente comparables con los concretos de peso normal. Sin embargo, el efecto del agua libre en la mezcla es similar a los concretos normales. En general, la resistencia a la compresión se reduce a medida que el agua libre se incrementa.

c) Agregados Livianos

Dentro de las propiedades más importantes de los agregados livianos que influyen en la resistencia del concreto, se encuentran las siguientes:

- La granulometría, que se recomienda continua para garantizar el máximo de compacidad en la mezcla.

- La forma y textura de los agregados livianos, que se desea esférica y rugosa, de tal manera que se adhiera de mejor manera a la pasta de cemento.
- La resistencia propia del agregado, ya que agregados menos porosos y por consiguiente más densos, presentan una más alta resistencia de los granos, que repercuten directamente en el concreto final.
- Es sabido que la densidad y resistencia se disminuyen con un incremento en la cantidad de los agregados livianos. En concretos con agregados livianos, en general se utiliza un volumen de agregado liviano entre 0.35 y 0.45 m³ por metro cúbico de concreto, dependiendo de las condiciones requeridas.
- La absorción del agregado liviano. Bilodeau [11] mostró en base a una investigación con seis mezclas de concretos realizadas con agregados livianos diferentes, la dependencia existente entre la resistencia a la compresión y el valor de absorción de los agregados. La incertidumbre acerca de la relación a/mc efectiva que se incrementa cuando aumenta la absorción en el agregado liviano, explica el porque de la resistencia del concreto es casi una función del valor de absorción del agregado liviano en ese estudio.
- Estado de los agregados al momento de la mezcla. Helland y Maage [38] reportaron una pérdida de resistencia cuando el concreto liviano es hecho con agregados livianos secos. Lo anterior se debería a las burbujas de aire de evacuación del agregado liviano, que se presentan cuando el árido procede a absorber parte del agua de la mezcla, y que fue evidenciado por medio de un estudio microestructural del concreto endurecido, como se muestra en la figura.

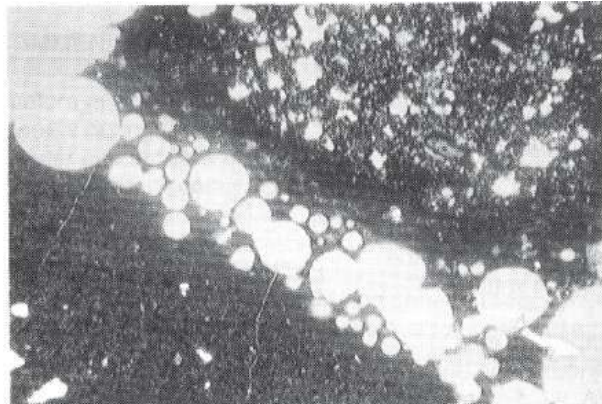


Figura 3.7. Micrografía que muestra la capa de las burbujas de aire en la zona de transición, en la esquina de la parte superior a la derecha se encuentra el agregado liviano, y en la esquina de la parte inferior a la izquierda se encuentra la pasta de cemento [28].

d) Agregado Fino

Es común utilizar para mezclas de concreto liviano tres tipos distintos de agregados finos o arenas. Estos son: los agregados finos livianos de origen natural, los agregados finos livianos obtenidos por trituración del material grueso y el agregado fino constituido por arena natural que aunque aumente el peso del concreto resultante, contribuye a mejorar ciertas propiedades de estos concretos.

Como se sabe, en el concreto liviano se regula el tamaño máximo de las partículas gruesas, el cual es mucho menor que el de un concreto normal. Al disminuir el tamaño del agregado, aumentará la superficie específica que ha de ser bañada por el mortero. Por ello habrá que aumentar el volumen de este y, en consecuencia, el número de partículas finas. El problema de las arenas ligeras consiste en que estas no aportan la suficiente cantidad de finos que se necesitan para que la pasta de cemento resultante sea la adecuada, de tal manera que pueda fluir por los intersticios dejados por los agregados gruesos; es por esto que es conveniente usar, de forma parcial o total, la arena de peso normal, que generalmente proviene de trituración, con una granulometría adecuada. La razón principal para hacerlo es la economía. El uso de agregados finos de peso normal aumenta el módulo de elasticidad, mejora la resistencia, trabajabilidad y el acabado y generalmente disminuye el agua requerida para un asentamiento dado. Sin embargo, su uso también incrementa el peso unitario del concreto.

e) Tamaño Máximo del agregado liviano

En los concretos livianos se recomienda que el tamaño máximo de los agregados sea de 20 mm, ya que tamaños mayores (con menor superficie específica) ocasionan una reducción en la resistencia del concreto, puesto que requieren una menor presencia de mortero. En general, los áridos livianos artificiales más usados en el mundo tienen un tamaño máximo de 8mm.

f) Adiciones y aditivos

El uso de humo sílice, regulada por la ASTM C1240, y de superplastificantes en la mezcla provoca un aumento de la resistencia de la pasta de cemento y puede resultar en resistencias a la compresión muy altas, del orden de 70 MPa, que producen los denominados concretos livianos de alto desempeño, tal y como lo demuestra con las investigaciones realizadas por López y Kahn [56]. Otro aditivo que permite alcanzar altas resistencias corresponde a los reductores de agua de alto rango. En contraparte, el uso de inclusores de aire para dar una mayor manejabilidad al concreto, ocasiona una disminución de la resistencia del concreto, dependiendo de la proporción de aire incorporado.

g) Curado

La resistencia a la compresión del concreto liviano se incrementa con el tiempo en una forma similar a los concretos de peso normal. Sin embargo, el incremento es menos afectado por un pobre curado y por un secado al aire. La reserva de agua adentro de los poros de las partículas de los agregados livianos prolonga el curado interno.

h) Medida de la resistencia a la compresión

Otro factor que afecta el valor final de la resistencia a la compresión en los concretos livianos corresponde a la forma del espécimen que se utiliza para establecerla. En Colombia, la determinación de la resistencia a la compresión se realiza sobre muestras de cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. La forma en que se toman las muestras está regida por las normas ICONTEC 550 (Cilindros de hormigón tomados en las obras para ensayo a compresión. Elaboración y curado) e ICONTEC 673 (Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de hormigón). Véase Anexo A.

En Europa, es común efectuar el ensayo de cubos, que se realiza de forma similar a los cilindros, con muestras de 15 cm de arista. La forma de efectuar este ensayo se encuentra descrita en la norma británica BS-1881.

Faust [28], demostró la variación de la resistencia a la compresión del concreto liviano, dependiendo de la probeta con la que se determine, para diferentes tipos de agregados livianos. Estos resultados se resumen en la figura siguiente.

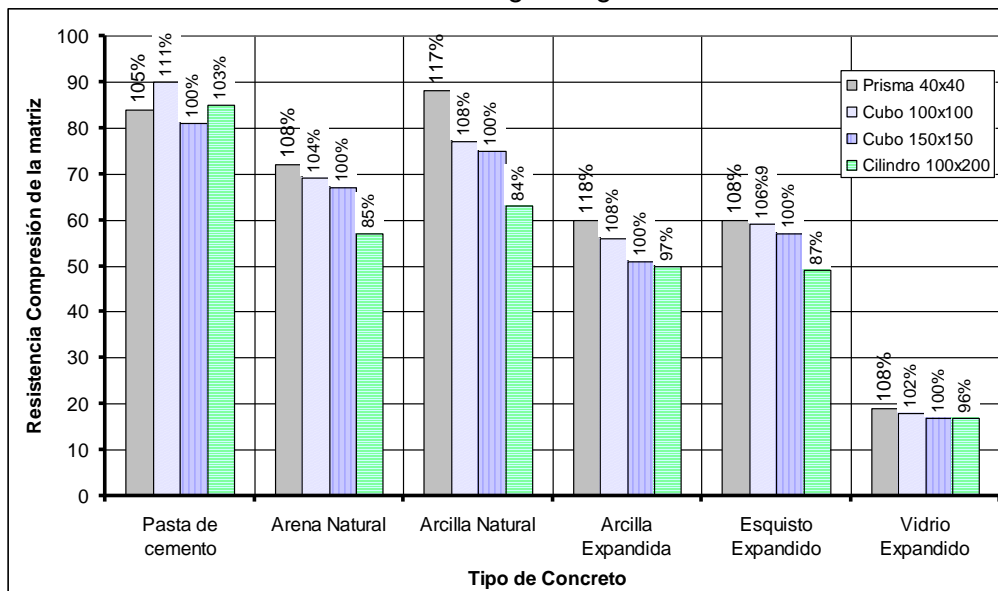


Figura 3.8. Influencia de la forma del espécimen de diferentes matrices en la resistencia a la compresión [28].

De la muestra, el parámetro estándar correspondió a los resultados hallados con los cubos de 150x150mm. De la figura se observa que se obtienen resistencias más altas determinando la resistencia a la compresión por medio de prismas de 40x40mm, seguidos de cubos de 100x100mm, de los cubos de 150x150mm y de los cilindros de 100x200mm.

3.3.1.2 Resistencia a la Tracción

La importancia de conocer este valor radica en el hecho de que esta resistencia es usada para evaluar la resistencia al corte alcanzada por el concreto en elementos de concreto reforzado, fabricados con agregado liviano (NTC 722).

La resistencia a la tensión en cualquier tipo de concreto puede hacerse por dos procedimientos, el ensayo de tracción por hendimiento o ensayo brasilero o el ensayo de tracción por flexión. Véase Anexo A. Así mismo, se ha encontrado que la resistencia a la tracción de un concreto liviano es del orden de un 80% de la resistencia de un concreto de peso normal, ambos con la misma resistencia a la compresión.

Según el Eurocódigo 2, el valor de la resistencia a la tracción del concreto de áridos livianos, puede obtenerse aplicando la formulación empleada por los concretos de densidad normal afectando al valor calculado por un coeficiente n_1 , el cual está en función de la densidad seca (ρ), tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta_1 = (0.4 + 0.6) \cdot \frac{\rho}{2200} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Como se ve de la ecuación anterior, la resistencia a la tracción de los concretos livianos será menor, entre más liviano sea el hormigón resultante.

3.3.1.3 Módulo de Elasticidad [27]

El módulo de elasticidad del concreto depende del módulo de elasticidad de la pasta de cemento, del módulo de elasticidad del agregado liviano, de la relación a/mc y del volumen del cemento. De acuerdo con diversos autores, se ha encontrado que el módulo de elasticidad en concretos livianos es generalmente entre un 20 a 50 por ciento más bajo que el de un hormigón normal de su misma resistencia a la compresión, con mayores diferencias para resistencias elevadas.

En los hormigones de peso normal, frecuentemente se encuentran fisuras en la interfase entre agregado y pasta de cemento, producto de las diferencias entre los comportamientos del agregado y la pasta de cemento. En el caso de los concretos livianos, estas no se encuentran. Lo anterior se debería a que la pasta de cemento se retrae y el agregado no y a la similitud de los módulos de elasticidad entre el agregado liviano y la fracción de mortero, puesto que éstos, tienden a ser típicamente lineales hasta un 90% del esfuerzo de falla, como se muestra en la Figura 3.9, indicando una relativa compatibilidad de los constituyentes del hormigón y por consiguiente una reducción del microfisuramiento.

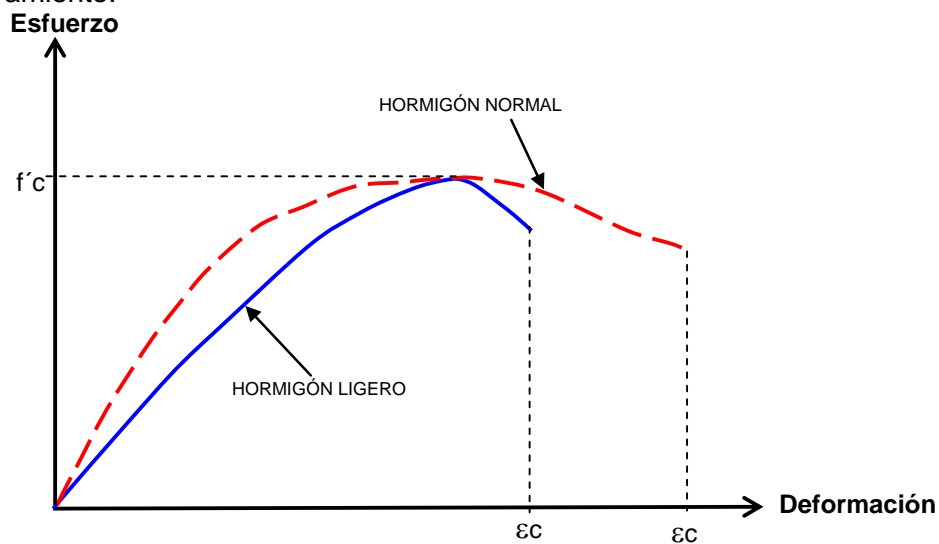


Figura 3.9. Comparación gráfica de los módulos de elasticidad de un concreto liviano y uno de peso normal [18].

En el caso de concretos livianos con Arcilla Expandida Térmicamente, de acuerdo con Chandra [17], “la interacción entre el mortero y el agregado con arcilla expandida envuelve fuerzas tanto mecánicas como químicas. En otras palabras, la capa de contacto no es simplemente una interfase entre dos sustancias, conteniendo nuevas sustancias que son formadas de la interacción. El incremento en la cohesión se debe a la reacción

química entre los productos de la hidratación del cemento y los silicatos-aluminosos en la superficie del agregado liviano, formados durante su producción a altas temperaturas”.

El módulo de elasticidad de la matriz de cemento está influenciada por el tipo de agregado fino utilizado. Faust [28], estudió el módulo de elasticidad del mortero, variando el agregado fino en la pasta, encontrando que el mayor módulo de elasticidad se da para morteros hechos con arena de peso normal, como se ve de la figura 3.10, en donde se muestra la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de las pastas de cemento analizadas.

Figura 3.10. Relación entre el módulo de elasticidad y resistencia a la compresión de diferentes matrices de cemento [28].

Determinación del módulo de elasticidad

La nueva Norma Sismorresistente Colombiana (NSR-10) que incluye al concreto liviano como material estructural para el diseño de estructuras sismorresistentes, da la siguiente formulación para calcular el módulo de elasticidad del concreto liviano:

$$E_c = \lambda \cdot 4700 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

También la norma (NSR-10) especifica que el módulo de elasticidad del concreto liviano puede corresponder a la siguiente ecuación:

$$E_c = w_c^{1.5} \cdot 0.043 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

E_c = Módulo de Elasticidad del concreto (MPa).

f'_c = Resistencia a la compresión especificada a los 28 días (MPa).

λ = Coeficiente de modificación, cuyo valor se calcula dependiendo de la dosificación de los agregados en la mezcla.

w_c = densidad del concreto en estado seco comprendida entre 1440 y 2560 kg/m³.

De la ecuación 3.2, se observa que el módulo de elasticidad se encuentra afectado por un coeficiente de modificación, el cual se calcula dependiendo de los componentes a utilizar en la mezcla de concreto liviano. Así mismo, la NSR-10 indica que este valor se puede tomar de acuerdo con la siguiente tabla:

FACTOR DE MULTIPLICACION	DESCRIPCION DEL TIPO DE AGREGADOS A EMPLEAR
$\lambda = 0.75$	Valor para los otros tipos de concreto liviano
$0.75 < \lambda < 0.85$	El valor resultante del intervalo será en base a la interpolación lineal por fracciones volumétricas, cuando una porción de los agregados finos de peso liviano es reemplazada por agregado fino de peso normal
$\lambda = 0.85$	Valor para concreto con arena de peso normal
$0.85 < \lambda < 1.00$	El valor resultante del intervalo será en base a la interpolación lineal para el concreto que contiene agregado fino de peso normal y una combinación de agregados gruesos de peso normal y de peso liviano.
$\lambda = 1.00$	Valor para los concretos de peso normal

Tabla 3.3. Factor de corrección del Modulo de Elasticidad según tipo de agregado liviano.

Claramente, de la anterior tabla se observa que a medida que los componentes de la mezcla sean más livianos, el módulo de elasticidad tenderá a ser más bajo, y en el caso de concretos livianos con arcilla térmicamente expandida, el valor del módulo de elasticidad tenderá a ser del 85 por ciento del valor de un concreto normal. Aunque hay concordancia, en que el módulo de elasticidad de este tipo de concretos, es mejor determinarlo por ensayos de laboratorio, los cuales han mostrado que el módulo de elasticidad máximo para estos concretos es de 29 GPa, independientemente de la resistencia, según investigaciones de López [56].

3.3.2 Peso unitario del concreto liviano

Se define al peso unitario como la relación entre el peso y el volumen de un material, y generalmente se expresa en kg/m^3 . Los concretos de peso normal tienen pesos unitarios entre 2200 y 2500 kg/m^3 . En cambio, la NSR-10 define al concreto liviano como el “concreto con agregado liviano que tiene una densidad en equilibrio, tal como la define NTC 4022 (ASTM C567), entre 1440 y 1840 kg/m^3 .”

En otros reglamentos, se toma como limite superior de densidades del concreto liviano, valores por encima de 1840 kg/m^3 ; este es el caso del valor de 1920 kg/m^3 del ACI 213R-03 o el de 2000 kg/m^3 del Eurocódigo 2. Precisamente, este último documento divide al concreto liviano en varias clases, dependiendo su densidad, tal como se muestra en la tabla siguiente:

Fuente: Eurocode 2

Clase		1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
D. Seca (kg/m^3)		801 - 1000	1001 - 1200	1201 - 1400	1401 - 1600	1601 - 1800	1801 - 2000
D. Cálculo (kg/m^3)	H. Masa	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	H. Armado	1150	1350	1550	1750	1950	2150

Tabla 3.4. Clases de densidades según el Eurocódigo.

Como se ha explicado anteriormente, la ligereza del concreto liviano se basa en la baja densidad del agregado que lo compone, siendo en la mayoría de los casos, su principal función en una mezcla de hormigón liviano.

Existen varios factores que influyen el peso unitario del hormigón, entre éstos están:

- Agregado grueso. Es el componente de mayor volumen en la mezcla, por lo que si se utiliza un agregado liviano, este ayudará a aligerar el concreto, debido a su baja masa unitaria. Los agregados de peso normal tienen masas unitarias del orden de 1100 kg/m^3 a 1600 kg/m^3 y se consideran livianos a aquellos que tienen una masa unitaria suelta seca inferior a 1120 kg/m^3 .
- Agregado Fino. Si se utiliza un agregado fino liviano, ayudará a aligerar el concreto, pero perderá en propiedades relacionadas con resistencia y manejabilidad.
- Cemento. Es el componente más pesado de la mezcla, por lo que se debe regular su dosificación para que cumpla requisitos de resistencia y durabilidad. Su densidad varía entre 2.95 y 3.15 g/cm^3 , siendo muy deseable para concretos livianos, cementos con bajas densidades.
- Aditivos. Son recomendables los inclusores de aire, ya que al introducir burbujas de aire, ayudan a obtener un concreto menos denso, aunque se pierde en propiedades de resistencia.

3.3.3 Cambios Volumétricos

El concreto es un material que presenta leves cambios de volumen, especialmente cuando pasa de un estado plástico a uno endurecido. En este lapso de tiempo, se generan unas reacciones químicas que producen retracción en la pasta de cemento.

La retracción se puede definir como *la deformación del hormigón en estado fresco o endurecido, la cual no depende de la carga externa aplicada y se manifiesta mediante la disminución de volumen del hormigón durante el proceso de fraguado en sus primeras horas, o cuando se encuentra ya endurecido días o meses después y se produce por un hecho muy sencillo que es la simple pérdida de agua [1].*

En general, la retracción o contracción, se produce principalmente por la pérdida de agua al fraguar el concreto, lo cual genera fisuramiento en el hormigón, que se puede traducir en una pérdida importante de la resistencia y especialmente de la durabilidad del hormigón. Las retracciones que se producen en el concreto básicamente se pueden dividir en las que se presentan en estado plástico y en estado endurecido.

3.3.3.1 Cambios volumétricos en estado plástico.

Estos cambios se pueden resumir en lo que comúnmente se denomina como retracción plástica o capilar. Esta contracción se da cuando el concreto se encuentra todavía en estado fresco y se debe a una evaporación rápida del agua de la superficie del concreto; provocando una contracción de la superficie que genera fisuramiento. Este agrietamiento, que una vez se inicia, se propaga rápidamente sobre toda el área expuesta, se puede disminuir con un tratamiento adecuado.

Entre los factores que favorecen esta contracción plástica, se encuentran:

- Alto contenido de agua en la mezcla.
- Altas temperaturas del concreto.
- Velocidades de viento elevadas.
- Bajas Humedades relativas.
- Falta de un curado adecuado sobre la superficie del hormigón.

En cuanto, a las contracciones en los concretos livianos, Martín [57] afirma que los hormigones livianos de edades tempranas sufren una menor retracción que los hormigones normales de resistencia equivalente y pueden llegar a experimentar expansiones si no se permite una correcta evaporación del agua del concreto. Sin embargo, con el tiempo, la retracción de los hormigones livianos termina por superar la de sus homólogos de densidad normal, debido a la mayor cantidad de cemento en su dosificación y, por tanto, también de agua en su interior.

3.3.3.2 Cambios volumétricos en estado endurecido.

En los primeros días de endurecimiento del concreto, este adquiere una baja resistencia –sobre todo a tensión- a pesar de ser sólido. Es debido a esta baja capacidad a tracción, que el concreto es susceptible de fisurarse, cuando actúan ciclos de temperatura y humedad. En general, en este estado se pueden estudiar las retracciones por secado y por carbonatación.

3.3.3.2.1 Retracción autógena o química

Aunque en toda mezcla de cemento con agua, se produce una contracción química, en general se produce en concretos que no tienen suficiente agua para hidratación (relaciones a/mc bajas), por un proceso de autosecado que concierne a un consumo interno del agua libre, que se encuentra en los poros capilares, necesario para continuar con la hidratación del hormigón. Se define también como el cambio de volumen de la pasta de cemento cuando sigue hidratándose después del fraguado inicial [15].

La retracción autógena no incluye los cambios de volumen debidos al ingreso o pérdida de sustancias, la variación de temperatura, la aplicación de cargas exteriores o el efecto de deformaciones impuestas. Así mismo, la utilización de adiciones como ceniza volante, tiende a disminuir esta contracción.

En el caso de los concretos livianos, la reserva interior de agua en el agregado liviano, debido a las altas absorciones que presenta este árido poroso, reduce la tasa de contracción autógena, la cual es cercanamente eliminada [17].

3.3.3.2.2 *Retracción de secado o hidráulica*

Se produce por un cambio de volumen después del fraguado final del concreto, debido a la pérdida de humedad. Esta contracción se encuentra asociada a fenómenos de secado por condiciones meteorológicas (temperatura y viento) y se debe a la evaporación del agua de los capilares, generándose una tensión superficial que a su vez genera fuerzas que tienden a contraer el material [33].

La contracción de secado del concreto liviano hecho y curado a temperaturas normales es ligeramente mayor que la del concreto de peso normal. La diferencia de contracción es usualmente menor del 30 por ciento, y en algunos casos hay una pequeña o ninguna diferencia. El concreto liviano de alta resistencia (50 a 70 MPa) tiene aproximadamente la contracción que un concreto de peso normal comparable [63].

Lo anterior, es reafirmado por el documento ACI 213, en donde además se atestigua que uno de los factores que ayudan a disminuir la contracción por secado, corresponde al reemplazo parcial o total de agregado fino liviano por arena natural, para los concretos hechos con agregados livianos gruesos.

3.3.3.2.3 *Retracción por carbonatación.*

Esta contracción ocurre cuando el dióxido de carbono presente en la atmosfera reacciona en presencia de agua con el cemento hidratado, produciendo que el hidróxido de calcio se convierta en carbonato de calcio y originando la descomposición de otros componentes del cemento.

Shetty (2005), afirma que la contracción por carbonatación es probablemente causada por la disolución de los cristales del hidróxido de calcio y por el depósito del carbonato de calcio en su lugar, debido especialmente a que el nuevo producto tiene un menor volumen que el material inicial, por lo que la retracción se llega a presentar.

Se sabe que la magnitud de esta retracción es pequeña en comparación -a largo plazo- con la contracción por secado. El problema de la carbonatación es que si alcanza al acero de refuerzo causa corrosión.

Cuando se trata de hormigones livianos de alto desempeño fabricados con agregados livianos porosos, estos cambios volumétricos son amortiguados por la liberación de agua atrapada en los poros de los agregados.

Factores que afectan la retracción.

- Contenido de agua en la mezcla. A mayor agua, mayor evaporación, lo que genera más contracción.
- El tamaño del agregado máximo. A mayores tamaños, menores retracciones.
- Contenido de cemento. A mayor contenido, mayores retracciones.
- Tamaño de los elementos. Entre más pequeñas sean las piezas de concreto, mayor retracción.
- Temperatura Ambiente. A mayor temperatura, mayor retracción.
- Superficie del elemento. A mayores superficies expuestas, mayores contracciones.
- Curado. Un mal curado, facilita el continuamiento de la fisuración.

3.3.3.3 Deformación elástica y fluencia

El concreto es un material que tiene algún grado de elasticidad como muchas otras sustancias en la naturaleza. Al ser uno de los materiales más importantes en la industria de la construcción, es necesario conocer sus propiedades elásticas para estudiar su comportamiento durante cargas permanentes.

Como ya se explicó en la sección 3.3.1, el comportamiento del concreto liviano difiere del concreto normal, en el hecho de que existe una mejor compatibilidad de deformaciones entre los agregados livianos y la matriz de cemento (mortero), hecho atribuible a su similar modulo de elasticidad. Es por esto, que la deformabilidad del concreto liviano es función de la deformabilidad de los elementos que lo componen: el mortero y los áridos.

Las deformaciones de los concretos livianos a corto o largo plazo, son particularmente importantes en el caso elementos de concreto armado y se han encontrado que son superiores a las del mismo elemento fabricado en hormigón normal. La diferencia quizás más importante entre las propiedades del concreto liviano y el concreto normal son las deformaciones elásticas. Para la misma resistencia a la compresión, esta deformación es del orden de 1.5 a 3 veces mayor en los concretos livianos [27].

Relación de Poisson

La relación de poisson se define como la relación de la deformación transversal a la longitudinal. Este valor, tanto para el concreto normal como para el liviano es igual aproximadamente, y se encuentra comprendido entre 0.15 y 0.20, dependiendo de la humedad, del agregado y de la edad del concreto [63].

Flujo Plástico o Creep

Se define al flujo plástico como la deformación que sufre el hormigón continuamente en el tiempo cuando a éste se le aplica una carga o un esfuerzo constante. La deformación del concreto por flujo plástico es proporcional a la magnitud del esfuerzo que actúa en él. La fluencia del hormigón bajo cargas permanentes es un fenómeno de deformación del hormigón posterior al periodo de fraguado y está íntimamente relacionado con el comportamiento del mortero [34], [57].

El flujo plástico depende de la magnitud del esfuerzo, resistencia del concreto, edad del concreto al cargarse, tiempo después de la carga, método de curado, y la condición de humedad del concreto. Se sabe que estas deformaciones son menores para concretos de alta resistencia [63].

Como se sabe, son los áridos –por su resistencia propia mecánica- los que se oponen a la deformación de la pasta de cemento, y debido a que el modulo de Young de los áridos livianos es menor que el de los áridos naturales, las deformaciones por flujo plástico son mayores que en los hormigones normales.

El flujo plástico es, con frecuencia, un fenómeno positivo en los hormigones livianos, ya que reduce las esfuerzos internos producidos por la retracción tardía y los cambios de temperatura. El coeficiente de fluencia de los hormigones livianos varía entre 0.5 y 1.0 veces el del hormigón normal [57].

3.4 DURABILIDAD DEL CONCRETO LIVIANO

El American Concrete Institute (ACI) define a la durabilidad del concreto como *“la habilidad para resistir las acciones meteorológicas, los ataques químicos, abrasión o algún otro proceso de deterioro. El concreto durable será aquel que se mantenga en su forma original, calidad y en condiciones óptimas de servicio cuando se encuentre expuesto al ambiente”*.

En efecto, el concreto reforzado está expuesto a una serie de ataques -por parte del medio ambiente-, que tienden a afectar su comportamiento durante su vida útil. Estos tipos de ataque están dirigidos tanto al concreto como al acero de refuerzo, y en caso de que alguno de los dos resulte afectado, producirá una depreciación en la capacidad estructural del material como un todo.

Los principales agentes que producen la corrosión en el refuerzo, como son el gas carbónico y los cloruros, no son agresivos con el concreto. Caso contrario, corresponde a los sulfatos y a la reacción álcali-agregado, los cuales producen expansiones que generan un rompimiento del concreto de recubrimiento de la armadura y que secundariamente atacan al acero de refuerzo [37].

Es muy común que la durabilidad sea asociada con la resistencia a la compresión, de tal manera que un concreto que tenga una alta resistencia tendrá una buena durabilidad. Sin embargo, no es correcto asociar durabilidad con resistencia, ya que el factor que afecta a la durabilidad de forma más directa es la permeabilidad.

En vista de la anterior creencia, el código modelo europeo afirma que: *“Aunque el hormigón de una clase de resistencia mayor es, en casi todos los casos, más durable que el hormigón de una clase de resistencia más baja, la resistencia a compresión no es una medida completa de la durabilidad del mismo, porque la durabilidad depende fundamentalmente de las propiedades de las capas superficiales del elemento de hormigón, que tiene una influencia relativamente pequeña en la resistencia a compresión”*.

En general, la durabilidad está asociada con la vida útil del material, por lo que diversos documentos estiman que esta propiedad en las estructuras de concreto se debe considerar bajo diversos aspectos, los cuales fueron recogidos por Helene [37] y que corresponden a:

- La clasificación de la agresividad del medio ambiente.
- La clasificación de la resistencia del concreto al deterioro.
- Los modelos del deterioro y envejecimiento de las estructuras de concreto.
- La vida útil deseada, o sea, el periodo de tiempo en el cual se desea que la estructura atienda ciertos requisitos funcionales con un mínimo de mantenimiento.

La siguiente tabla esquematiza la relación entre la agresividad del medio ambiente contra las recomendaciones necesarias para dar una adecuada durabilidad al concreto:

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

Clase de agresividad	Macroclima	Microclima	Riesgo de deterioro de la estructura	Concreto recomendable
I (Débil)	Atmósfera rural	Humedad relativa \leq 60% Interiores secos	Insignificante	Cualquier tipo
II (Media)	Atmósfera Urbana	Humedad relativa de 60 a 95% Humedad relativa = 100% Elementos sumergidos	Pequeño	Normal, resistente y durable
III (Fuerte)	Atmósfera marina o industrial	Humedad relativa de 65 a 98%	Grande	Resistente y durable
IV (Muy fuerte)	Polos Industriales	Zonas húmedas industriales	Elevado	Durable

Tabla 3.5. Clases de agresividad en los concretos. Adaptado [37].

Como se observa, para ataques muy severos, queda en un segundo plano los requisitos de resistencia y pasa a predominar los requerimientos por durabilidad del material. Es por ésto, que para determinar que tan durable es un concreto en general, se deben estudiar las propiedades intrínsecas del hormigón referente a su resistencia a ataques químicos y/o físicos.

3.4.1 Permeabilidad

La permeabilidad constituye uno de los mayores referentes de la durabilidad de una estructura y se ha convertido en un indicador indispensable para establecer la capacidad de un material para resistir agresiones externas como agua, aire, ácidos y sulfatos, entre otros.

Se puede definir a la permeabilidad como la tasa de flujo a través de un medio poroso. Se determina por medio de la ley experimental de Darcy, quien investigó las características del flujo del agua a través de filtros formados por materiales térreos. Según muchos investigadores, esa teoría es la que más se aproxima al flujo capilar que se presenta en materiales como el concreto.

Sánchez de Guzmán [71], indica que la permeabilidad del concreto se encuentra asociada a factores tales como la porosidad de la pasta de cemento, la porosidad de los agregados, de los vacíos productos de una compactación deficiente o de los capilares dejados por el agua de exudación. Sin embargo, diversos autores coinciden en que la permeabilidad del hormigón depende casi exclusivamente de la porosidad de la pasta de cemento, ya que está tiende a envolver al agregado, restándole importancia al árido en el proceso, siempre y cuando el mortero sea lo suficientemente denso, es decir poco poroso.

En el caso de los concretos normales, es sabido que al disminuir la relación a/mc , aumenta la resistencia mecánica de la pasta de cemento endurecida, lo que se refleja en una disminución de los tamaños de los poros, haciendo menos permeable al hormigón. En general, para medir la permeabilidad se pueden utilizar los métodos de ISAT, presión o sortividad. Jované [52] indica que los resultados por el método de sortividad son relativamente confiables, precisos, aplicables y que el ensayo tiene la ventaja de ser fácil de elaborar.

En cuanto a los concretos livianos, se tiende a pensar que por estar provistos de agregados altamente porosos, la permeabilidad es mayor que la de un concreto de peso normal. Sin embargo, la permeabilidad depende de la continuidad y el tamaño de los poros y en el caso de concretos livianos, al necesitarse una pasta de cemento de mayor

calidad, los poros son menores que en el concreto normal –para una misma resistencia- y por consiguiente son menos permeables.

Algunas teorías defienden la idea que los áridos livianos se rodean de una capa impermeable de mortero de muy alta calidad y muy reducida fisuración que actúa de impermeabilización exterior de los nódulos [57]. Esta capa estaría originada por:

1. Hidratación continuada durante el proceso de curado debida al agua que libera el árido de forma gradual.
2. Similar comportamiento elástico del árido y el mortero, ya que sus módulos de Young son muy similares.
3. Excelente adherencia entre la matriz y el árido por su superficie rugosa y la acción puzolánica.

3.4.2 Congelamiento y deshielo

Una parte importante de la durabilidad de los materiales corresponde a determinar que tan bueno es su comportamiento frente a los denominados ciclos de congelamiento y deshielo, los cuales se presentan en países con estaciones, y cuya acción refleja condiciones extremas de exposición del material. Estos ciclos no son ajenos a países como Colombia, donde en algunos casos, es necesario que ciertos elementos que deben resistir inclemencias meteorológicas, posean una determinada resistencia al congelamiento y descongelamiento.

Se sabe que el agua expande cuando se encuentra congelada, aproximadamente un 9% en volumen, por lo que si un hormigón se encuentra húmedo corre el riesgo de ser desintegrado por los esfuerzos de tensión que se generan adentro de la masa de hormigón a causa del incremento de volumen del agua y porque el concreto tiene una baja resistencia a la tensión [71].

Diversos investigadores han coincidido en que en el caso de los concretos livianos, aunque tienen agregados más porosos que los de peso normal, son más resistentes a los efectos de las heladas que los hormigones normales, sobre todo en el caso de hormigones confeccionados con áridos livianos no saturados [57], debido a:

1. La elasticidad del concreto es mucho mayor.
2. La frecuencia de los ciclos de hielo/deshielo no da tiempo a que los poros del concreto se llenen y los restantes poros rellenos de aire equilibran la presión.
3. La alta calidad del mortero empleado en los concretos livianos dificulta la penetración del agua.
4. La mayor deformabilidad de los agregados hace que se presente menos agrietamiento por esfuerzos de tracción.

Pero, en el caso de que los áridos livianos se encuentren saturados; se llegará a una condición crítica debido a que los concretos livianos con áridos mojados necesitan un mayor tiempo de secado que un concreto normal, por lo que no podrán secarse suficientemente antes de sufrir los efectos de congelación y descongelación [16].

De todas maneras, hay consenso global en que la introducción artificial de aire incorporado hace prácticamente inmune a la pasta de cemento y mejora de forma muy notoria la resistencia del concreto a los ciclos de hielo y deshielo.

La inclusión de aire tiene otras ventajas como es el aumento de la trabajabilidad, el aligeramiento en peso (característica muy deseable en los concretos livianos) y la reducción en la exudación y la segregación. Aunque su principal desventaja consiste en que a mayor cantidad de aire incorporado, hay una reducción proporcional de la resistencia del hormigón. Por ello, normativas como la ACI-211.2 y la NSR-10, recomiendan valores de aire incorporado en el concreto, dependiendo de las condiciones de exposición del material. De todas formas, en concretos livianos, se recomienda su uso independientemente de las condiciones meteorológicas sobre la masa de hormigón y su contenido óptimo está generalmente entre el 4 y 8 por ciento.

Cuando se utilice concreto liviano con aire incorporado es recomendable utilizar agregados secados al aire, ya que este concreto es más resistente a los ciclos de hielo y deshielo que el fabricado con agregados húmedos. La anterior recomendación solo es aplicable para concretos que tienen una fuerte exposición a los efectos de congelamiento y descongelamiento, ya que en general se utilizan los agregados saturados, para que no absorban parte del agua de mezcla. Para evaluar la resistencia al congelamiento y descongelamiento de los agregados livianos se deben efectuar pruebas, suplementadas con información del comportamiento obtenida en el campo.

3.4.3 Carbonatación y Corrosión del acero de refuerzo

La carbonatación es conocida como el fenómeno donde el concreto –en presencia de humedad- al estar expuesto a la atmosfera, interactúa con el dióxido de carbono que se encuentra en el ambiente. Esta interacción provoca que el dióxido de carbono (CO_2) reaccione químicamente con el hidróxido de calcio, que se forma en el mortero durante la hidratación del cemento, produciendo un carbonato de calcio y agua.

El hidróxido de calcio es el responsable de suministrar una alta alcalinidad al concreto, situando al pH del material aproximadamente en 13.5, y generando una protección al acero de refuerzo de la corrosión. La carbonatación, produce una reducción en el pH del concreto de 12.5 a 8.5, generando una reducción del material ligante (cemento) -haciendo perder propiedades físicas al concreto- y facilitando el proceso de corrosión del refuerzo [17] [33].

La carbonatación se puede presentar de dos formas: en la superficie o a través de las fisuras; debido a que el comportamiento del dióxido de carbono es distinto en ambos casos [17]. Strunge y Chatterji [77] han mostrado que la corrosión se presenta a lo largo de las fisuras en áreas con un alto número de vacíos, a lo largo de fracturas entre agregados y pasta, y a través de zonas porosas donde el agua y oxígeno, necesarios para la corrosión, pueden alcanzar al refuerzo.

En el concreto liviano, la carbonatación depende de la composición de la pasta de cemento y del tipo de agregado liviano utilizado. Algunos autores indican que la protección a la corrosión de esta clase de hormigón depende del espesor de

recubrimiento de la armadura y de la impermeabilidad del hormigón y dado que ésta es mayor en el concreto liviano, la carbonatación se verá reducida [57]. Por el contrario, Chandra y Berntsson [17] indican que los concretos livianos al presentar condiciones de humedad más altas que las de un concreto normal y al estar compuestos por agregados porosos, que absorben mucha agua, la profundidad de carbonatación será mayor que en los de peso normal.

En lo que si están de acuerdo los investigadores y estudiosos del tema, es en que la carbonatación depende del tipo de cemento, del tipo de agregados, de la relación agua/cemento, del tipo de curado y de las condiciones de exposición del hormigón. En general, se presentan las siguientes características de los concretos livianos con respecto a la carbonatación:

- La pasta de cemento realizada con agregado liviano fino tiene menor resistencia a la carbonatación, que la formada con arena de peso normal.
- En el concreto liviano se recomiendan recubrimientos iguales al tamaño máximo del agregado más cinco milímetros; en cualquier caso este recubrimiento no será inferior a los 25 milímetros [27].
- Se recomiendan tamaños de agregados livianos máximos pequeños.
- Los concretos livianos de carácter estructural son más resistentes a la carbonatación que los no estructurales.

Con respecto al último punto, Holm, Bremner y Vaysburd [40] estudiaron el tiempo en que la profundidad de carbonatación se demora en alcanzar el acero de refuerzo para estructuras de concreto liviano estructural y no estructural. La anterior información se resume en la siguiente tabla:

Aplicaciones del concreto	Estructuras marinas expuestas, piso de puentes	Concretos No-estructurales y de aislamiento
Inspección del concreto	Continua	No hubo
Calidad del concreto	Alta	Baja
Relación A/C	<0.45	>0.65
Resistencia a la compresión	> 30 Mpa	<20 Mpa
Tasa máxima de carbonatación, mm/lyrs	4*	8**
Recubrimiento del concreto de 20 mm	25 años	6 años
Recubrimiento del concreto de 30 mm	56 años	14 años
Recubrimiento del concreto de 40 mm	100 años	25 años

* Observadas de medidas en el campo de estructuras marinas maduras.

** Observadas de especímenes de laboratorio.

Tabla 3.6. Estimativo de tiempo en años para que la carbonatación alcance al acero de refuerzo [40].

3.4.4 Penetración del Ion cloruro

El ión cloruro penetra en el concreto y reacciona químicamente con el hidróxido de calcio y con el aluminato cálcico. Esas reacciones provocan una disminución de la capa de pasivación que protege al acero de refuerzo, produciendo corrosión en presencia de humedad. Lizarazo, indica que un aumento en la concentración de iones cloruro causará

la corrosión del refuerzo de manera significativa, debido a que esta corrosión está asociada a un cambio importante del potencial de corrosión hacia valores más negativos [55].

En una investigación realizada por la Ing. Nancy Torres en la Universidad Nacional de Colombia, en 2005, se muestran los métodos más empleados para determinar la resistencia del concreto al ingreso del ión cloruro, de los cuales el más usado corresponde al ensayo rápido de permeabilidad del cloruro, regulado por la ASTM C1202.

Con respecto a los concretos livianos, que son requeridos de alta resistencia y de buena durabilidad, deben ser especialmente resistentes a la penetración del ión cloruro. Es común, el pensar que los concretos livianos tienen alta permeabilidad, lo que causaría problemas de durabilidad. Sin embargo, como se ha explicado, el concreto liviano está compuesto por una pasta de cemento de más calidad que un concreto normal y por consiguiente presenta una menor permeabilidad. Además, esta riqueza en el mortero mejora la resistencia al ión cloruro, puesto que hay espacios vacíos de menor tamaño.

Lo anterior es corroborado por Martín-Nieto (2003), que indica que: “al igual que ocurre con otros ataques químicos, el uso de arcillas expandidas reduce el riesgo de reacciones. Por una parte, la mayor impermeabilidad del hormigón liviano complica la penetración del agua hasta la armadura y, por otra, los áridos livianos artificiales están libres de cloruros” [57].

Se han realizado investigaciones en países como Dinamarca y Suecia, relacionadas con la resistencia del concreto liviano al ataque por el ión cloruro, variando el tipo de agregado liviano que componía al hormigón. Esos resultados mostraron que el desempeño de los concretos livianos estructurales, es igual al de los concretos de peso normal en ambientes marinos rico en cloruros. Además, revelaron que los concretos livianos se comportan idóneamente bajo la variación de las condiciones de temperatura y de humedad, lo cual es atribuido a la mejor compatibilidad de los agregados livianos y la matriz de cemento [33].

3.4.5 Resistencia a los ácidos

Es sabido que ningún cemento portland es resistente al ataque de ácidos. Es por esa escasa defensa, que los ácidos deben eliminarse por completo del proceso de construcción de una estructura hecha con hormigón, a menos que se garantice que ninguna de estas sustancias entra en contacto con la superficie del concreto, o que se tenga una superficie impermeable –sobre el concreto- y resistente a un ataque de este tipo.

Dependiendo del tipo y concentración de los ácidos, se desintegrará lenta o rápidamente el concreto por medio de la reacción entre éstos y el hidróxido de calcio del cemento portland hidratado. Al incrementarse la acidez, se presentará una disminución en el pH del concreto llegando a valores inferiores de 6.5. Usualmente se cataloga la severidad del ataque, por medio del contenido del pH resultante; es decir, que para valores menores de 5.5, este es severo y para menores de 4.5 es muy severo [74].

En general, tanto el concreto de peso normal como el liviano llegan a ser muy deteriorados por el ataque de ácidos, independientemente si tienen aire incorporado o no. En la tabla siguiente se resumen los efectos dañinos de algunos ácidos sobre el concreto.

Velocidad de ataque a temperatura ambiente	Acidos inorgánicos	Acidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Varios
Rápida	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fólico Láctico		Cloruro de Aluminio	
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidroxido de Sodio < 20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gas) Sulfito líquido
Lenta	Carbónico			Cloruro de amonio Cloruro de Magnesio Cianuro de sodio Cloruro de calcio	Cloro (gas) Agua de mar Agua dulce
Despreciable		Oxálico Tartárico	Hidróxido de sodio <10% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de sodio	Amoniaco líquido

Tabla 3.7. Efecto de sustancias químicas comunes en el concreto [19].

3.4.6 Resistencia a la abrasión

Se define a la resistencia a la abrasión como la capacidad de la superficie del concreto para resistir el desgaste producido por fricción, frotamiento, raspaduras o percusiones. Existen muchos factores que pueden producir abrasión en el concreto. Por consiguiente, no existe un procedimiento como tal que permita medir todas esas condiciones. En la práctica, el mejor indicativo para determinar la capacidad a la abrasión, corresponde a la resistencia a la compresión del hormigón [71].

Gómez (2001) indica que existen varios factores que afectan el comportamiento del concreto ante la abrasión [33]. Entre estos se encuentran:

- Relación agua/ material cementante: A menor relación a/mc, mayor resistencia a la abrasión.
- Manejabilidad del concreto: Debe ser lo más baja posible, cumpliendo con los requerimientos de trabajabilidad.
- Granulometría de los agregados: Si esta es correcta, la mezcla será más homogénea y se aumentará la resistencia a la abrasión.
- Dureza de los agregados: A mayor dureza, mayor resistencia a la abrasión.
- Contenido de aire en la mezcla: A mayor contenido, aumenta la posibilidad de abrasión.
- Contenido de agregados en la mezcla: A mayor contenido, menos probabilidad de segregación y sangrado y por consiguiente menor probabilidad a la abrasión.
- Forma de compactación: Una buena compactación disminuye la abrasión.
- Terminado superficial. Superficies con texturas lisas son menos susceptibles que las rugosas a sufrir abrasión.
- Tipo de curado. Un buen curado, mejora la resistencia del concreto a la abrasión.

En general, se asume que la resistencia a la abrasión del concreto depende de la dureza de la pasta endurecida del mortero, del árido y de la adherencia entre ambos, por lo tanto,

es lógico pensar que el concreto liviano no va a tener una resistencia a la abrasión tan alta como un concreto de peso normal. Sin embargo se debe considerar que el concreto liviano estructural tiene una pasta de cemento más resistente que la de un concreto normal, que compensa la baja resistencia mecánica de los áridos livianos. Además, la adherencia entre agregado y mortero es mayor que en concretos normales.

Chandra y Berntsson [17] demostraron que el concreto liviano tiene una mayor resistencia a la abrasión que un concreto de peso normal, realizando una comparación entre dosificaciones de concreto liviano y normal para una misma resistencia a la compresión¹³ y empleando el método descrito por la Swedish Standard SS 1372 41. Ambas muestras de concretos se sometieron a 1600 rotaciones del aparato descrito en la norma, encontrando que la profundidad de abrasión para el concreto liviano fue de 1.7 mm, en comparación con la del concreto de peso normal que registró 2.6 mm.

Lo anterior se justifica en que al haber un mayor contenido de cemento en el hormigón liviano, junto con una mayor hidratación de la pasta, se consigue una mayor dureza en comparación con el hormigón normal. Sin embargo, cuando está primera capa se erosiona, la resistencia a la abrasión del árido liviano es menor que la de otro tipo de áridos [57].

3.4.7 Resistencia al fuego y propiedades térmicas

El comportamiento de los materiales de construcción bajo la exposición al fuego es de importancia significativa. El concreto, aunque no es un material refractario, es incombustible y tiene buenas propiedades de resistencia al fuego.

Cuando el concreto protege al refuerzo de un elemento estructural, la resistencia al fuego, no solo depende del material propiamente dicho, sino del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo. Lo anterior, debido a que el fuego introduce altos gradientes de temperatura y en consecuencia, las capas superficiales del hormigón tienden a separarse y descascararse desde la parte interior de la masa que esta más fría. El calor en el refuerzo agrava la expansión tanto lateral como longitudinal de las barras de refuerzo, resultando en una pérdida de adherencia y de resistencia en el acero [74].

Las propiedades térmicas de los concretos livianos difieren de forma significativa de los de peso normal, y son frecuentemente citados como una razón por la cual se utiliza el concreto liviano en algunos tipos de construcción. Entre las propiedades más importantes a examinar están: La conductividad térmica, la difusividad térmica y el coeficiente de expansión térmica [25].

a) Conductividad térmica:

El aislamiento térmico varía inversamente proporcional con el peso unitario, por lo que el concreto liviano tiene mejores propiedades de aislamiento térmico que el concreto

¹³ Las resistencias medidas en laboratorio correspondieron a 32.5 MPa para concreto de peso normal y de 37 MPa para concreto liviano.

normal¹⁴. En general, el coeficiente de conductividad térmica del concreto liviano oscila entre 0.20 y 0.50 del correspondiente del concreto normal, incrementándose con la densidad, con el contenido de cemento y con el contenido de áridos convencionales. A título informativo se da la siguiente tabla, en la cual se muestran los valores admisibles en el concreto, ya que los valores hallados por los investigadores difieren con frecuencia [18].

Densidad	Conductividad
kg/m ³	Kcal/m h °C
1200	0.30 - 0.35
1400	0.35 - 0.45
1600	0.45 - 0.60
1800	0.55 - 0.75

Tabla 3.8. Valores de conductividad térmica del hormigón liviano seco [18].

b) Difusividad Térmica [25]:

Se define como una medida de la tasa a la cual tienen lugar los cambios de temperatura dentro de una masa de concreto. Es función del efecto del agregado liviano utilizado sobre la conductividad térmica y del contenido de humedad del calor específico. Una alta difusividad térmica indica una alta tasa de propagación de un cambio de temperatura.

La difusividad generalmente aumenta cuando se incrementa la densidad del concreto, de la misma forma, aumentará cuando se determine sobre muestras húmedas en vez de secas. De lo anterior, se deduce que los concretos livianos tendrán una más baja difusividad que los concretos de peso normal, tal como lo demuestran los resultados de Hoff (1992) que indican que sería del orden de la mitad de los concretos normales.

c) Coeficiente de dilatación térmica:

Este coeficiente en los concretos livianos es entre un 20 y un 63% menor que los de hormigones normales debido a varios factores [57]:

- El mayor poder aislante del hormigón liviano relentiza los cambios térmicos en el interior del concreto.
- La estructura porosa de los agregados livianos actúa como colchón frente a los movimientos de la matriz de mortero.

El coeficiente de dilatación térmica de los concretos livianos es aproximadamente de $0.8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Hay que aclarar que este valor inferior del coeficiente en el hormigón de áridos livianos, no afecta sensiblemente a la compatibilidad de deformaciones con el acero de armaduras. Es por las propiedades térmicas explicadas anteriormente, que los concretos livianos tienen una mayor resistencia al fuego que los concretos de peso normal y debido a que los áridos livianos son materiales fabricados a temperaturas superiores a los 1000°C , por lo que permanecen estables a temperaturas elevadas.

¹⁴ Los concretos muy livianos (500-800 kg/m³) son utilizados con fines aislantes, debido a su baja conductividad térmica.

3.4.8 Curado

Se ha comprobado experimentalmente que el curado tiene un efecto determinante en la calidad y vida útil del concreto, por lo que un curado inapropiado o inexistente puede reducir a la cuarta parte la durabilidad de un hormigón. Los concretos livianos tienen la característica de que están compuestos por agregados livianos que tienen un alto grado de absorción de agua, lo que ayuda al curado interno del hormigón.

La ACI 213-03R [4], define al curado interno como *“al proceso por el cual la hidratación del cemento continúa debido a la disponibilidad del agua interna que no es parte del agua de mezclado. El agua interna está disponible por el sistema de poros en agregados livianos estructurales que absorben y liberan agua”*.

En el mismo documento se afirma que el curado debe comenzarse tan pronto como sea posible, por lo que las precauciones para proteger a los hormigones de áridos livianos de una desecación prematura durante los primeros días y especialmente en las 48 horas siguientes al mezclado, son las mismas que para hormigones normales. Esta protección es más necesaria y se muestra particularmente eficaz cuando las piezas tienen una masa reducida o presentan una gran superficie de evaporación cuando el ambiente donde está colocado el hormigón es seco y/o sometido a la acción del viento. A partir de los primeros días, la reserva interna del agua favorece las condiciones de curado [4].

El curado se beneficia en el sentido de que el agua absorbida por los agregados livianos, tiende a ser desprendida en el tiempo, generando como principal contribución una reducción de la permeabilidad que se desarrolla de forma significativa en el tiempo del curado. Powers, Copeland y Mann (1959) demostraron que extendiendo el tiempo de curado se incrementa el volumen de los productos cementicios formados, los cuales causan que las capilaridades lleguen a ser segmentadas y discontinuas. Entre otras ventajas del curado interno, se pueden mencionar las siguientes:

- El concreto gana resistencia a lo largo del tiempo, aumentando en calidad.
- El efecto que puede tener un mal curado es menor en los concretos livianos de alto desempeño que en los concretos normales.
- Hay una mejor hidratación de las partículas cementicias en la zona de transición interfacial.
- Ayuda sensiblemente a elementos verticales y concretos que contienen altos volúmenes de humo de sílice, que son sensibles a los procedimientos de curado.
- Se incrementan de forma notoria las propiedades de concretos adicionados con puzolanas (humo de sílice, ceniza volante, metacaolín, arcillas y agregados livianos finos).
- Minimiza los efectos de la contracción plástica (temprana) debido al secado rápido del concreto expuesto a condiciones de secado no favorables.

Adicionalmente, Hoff (2003) y Bentz y Snyder (1999) han señalado que una distribución espacial más eficiente de la mezcla puede darse con un reemplazo parcial de la fracción de arena con agregado fino expandido.

3.4.9 Determinación de durabilidad por ensayos.

La teoría indica que existen muchos procedimientos para determinar la durabilidad de probetas de concreto. Comúnmente los ensayos más conocidos corresponden a aquellos que miden la permeabilidad del hormigón a agentes externos. Entre los más conocidos están los ensayos de: Absorción Superficial Inicial, el de presión, el de succión capilar, el de absorción en frío, caliente y porosidad y el ensayo rápido de permeabilidad a los cloruros. A continuación se va a proceder a explicar los dos últimos.

3.4.9.1 Ensayo de Absorción en frío, caliente y porosidad [10], [78].

Este ensayo se explica en la ASTM C 642-06. Permite determinar la porosidad efectiva del concreto y mide la tasa de succión capilar; la absorción se presenta en toda la superficie, por consiguiente, la cantidad de agua absorbida depende del porcentaje de área de la superficie para el volumen del espécimen y la duración de inmersión.

En general, se tiene que se puede clasificar la durabilidad del concreto, por medio de este ensayo, de acuerdo con los siguientes parámetros:

TIPO DE CONCRETO	ABSORCIÓN, %	POROSIDAD, %
Buena calidad y compacidad	<3	<10
Moderada calidad	3 - 5	10 - 15
Durabilidad Inadecuada	>5	>15

Tabla 3.9. Valores de absorción y porosidad típicos.

Así mismo, la teoría explica que las variaciones en los resultados por este método, se deben a las dimensiones de las probetas y los procedimientos utilizados para secar o saturar las mismas.

3.4.9.2 Ensayo rápido de permeabilidad a los Cloruros [55] [78]

Este ensayo se encuentra regulado por la ASTM C1202 y la AASHTO T277 y busca valorar la habilidad del concreto para resistir la penetración de los cloruros mediante una indicación eléctrica. El ensayo consiste en preparar una probeta de concreto, con un espesor de 50 mm y un diámetro de 100 mm, la cual se somete a un voltaje de 60 V de corriente directa durante seis horas. Véase Anexo B.

La norma ASTM C1202-97 propone una clasificación de la durabilidad de las muestras, basándose en la carga que atraviesa el espécimen de concreto:

Carga que atraviesa la probeta (Coulombs)	Permeabilidad al Ion Cloruro
Mayor a 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baja
100 - 1000	Muy Baja
Menor a 100	Despreciable

Tabla 3.10. Valores típicos de penetración al ión cloruro [29].

3.5 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL

El ingeniero José Gabriel Gómez [33] indica que “*el objetivo de un diseño de mezclas es encontrar, mediante un procedimiento estandarizado, la cantidad de componentes de hormigón que, cumpliendo las condiciones de resistencia, durabilidad y manejabilidad requeridos, resulte más económica*”. Esta definición se ajusta perfectamente al concreto liviano, con el ingrediente adicional de que en este interviene una nueva variable a controlar, como es el caso de la densidad del concreto.

Hay muchas maneras de producir Concreto Liviano, pero estas se resumen básicamente en tres, dependiendo de su constitución. El primero corresponde al concreto liviano con agregado liviano, el cual reemplaza en su totalidad al agregado grueso y está destinado para usos estructurales. El segundo hace referencia al concreto aireado, celular o espumoso, en el cual se le introducen grandes vacíos al hormigón, de tal manera que se produce un concreto poroso y liviano. Finalmente, se tiene el concreto sin finos, donde se mantienen los agregados gruesos de peso normal, se omiten los agregados finos y por lo tanto hay un gran número de vacíos intersticiales presentes. En el presente documento, interesa la dosificación correspondiente al primer tipo de concreto, es decir el estructural, el cual se va a explicar en esta sección.

Entonces, la dosificación de un concreto liviano con fines estructurales estará dada en función de los componentes del concreto liviano, que corresponden al proporcionamiento de: cemento, de la combinación de agregado grueso de peso normal y de peso liviano, la combinación de agregado fino de peso normal y de peso liviano, las adiciones, los aditivos y la cantidad de agua necesaria para asegurar una adecuada trabajabilidad y resistencia especificada de compresión.

3.5.1 Información Requerida de los Materiales [71]

La selección de las proporciones de una mezcla de concreto liviano, deben realizarse de forma apropiada basándose en las propiedades –determinadas en laboratorio– de los materiales que la constituyen, lo cual da una mayor aproximación al comportamiento real del concreto fabricado, aunque esta dosificación no sea perfecta, debido a las condiciones de variabilidad que presentan los componentes del concreto y que resultan en que este no sea un material totalmente homogéneo e isotrópico. A continuación, se procederá a realizar un listado de las propiedades a conocer de los materiales que conforman el concreto liviano.

a) Propiedades del cemento

En Colombia, hoy en día se ofrecen varios tipos de cementos Portland, dependiendo del tipo de obra civil a edificar. Es conocido ampliamente, que la mayoría de estos cementos son adicionados por razones de economizar costos y que los concretos resultantes presentan en general mejores propiedades que un concreto hecho con cemento Portland puro, siempre y cuando se tenga un procedimiento más riguroso de curado; en caso

contrario, el concreto resultante presentará mayores problemas que uno hecho con cemento Portland puro.

Es por ésto, que en el caso del cemento, no es suficiente el cumplimiento de las normas que lo regulan. Es necesario el conocer las propiedades del cemento determinadas por ensayos de laboratorio. Entre estas están:

1. Peso específico o densidad (NTC - 221)
2. Finura o Superficie Específica (NTC - 33)
3. Consistencia normal y tiempos de fraguado (NTC – 110, NTC - 118)
4. Expansión al autoclave (NTC - 107).
5. Resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 14 ,28 y 56 o 90 días de edad (NTC – 220).
6. Composición química, perdida al fuego y residuo insoluble (NTC - 321).

En el diseño de mezcla de concreto liviano como mínimo se deben conocer las propiedades de densidad, finura y resistencia a la compresión. La densidad es muy importante, debido a que el cemento es el componente más pesado de una mezcla de concreto y como se sabe la variable a controlar en los concretos livianos es la densidad del concreto final.

b) Propiedades de los agregados livianos y normales.

Los agregados constituyen cerca del 70% del volumen final de hormigón. En el concreto liviano es indispensable conocer de sus propiedades, debido a que su comportamiento difiere con el del concreto tradicional en que los agregados livianos son débiles, son muy porosos y tienen mayor capacidad de absorción de agua; por consiguiente, éstas son las propiedades mínimas a determinar en una masa de agregados:

1. Origen y propiedades petrográficas y mineralógicas (ASTM C-294).
2. Análisis granulométrico (NTC – 4045, NTC - 77).
3. Forma y textura superficial de las partículas (B.S–812)
4. Peso específico aparente.
5. Capacidad de Absorción de agua.
6. Contenido natural de humedad.
7. Masas unitarias (NTC - 4022).
8. Contenido de finos y sustancias perjudiciales (NTC - 174).
9. Reactividad con los álcalis

c) Características de los aditivos

En cuanto a los aditivos, las características a conocer son las mismas que las utilizadas para concretos normales. La ref [71] explica que se deben conocer como mínimo la siguiente información para establecer la compatibilidad con el cemento y los materiales empleados.

1. Capacidad de reducción de agua.
2. Efecto sobre la manejabilidad, cohesión y plasticidad.

3. Efecto sobre la pérdida de asentamiento.
4. Inclusión de aire.
5. Efecto sobre el calor de hidratación.
6. Efecto sobre la velocidad de fraguado.
7. Efecto sobre la exudación del concreto.
8. Efectos sobre la contracción, resistencia, durabilidad y otras propiedades del concreto.

d) Adiciones

Adiciones como el metacaolin, las cenizas volantes y/o el humo de sílice permiten mejorar la compacidad del concreto, así como sus propiedades resistentes. Otras adiciones que se emplean normalmente son: las fibras metálicas, de propileno etc., cuyo empleo está sujeto a las características que se necesiten mejorar del hormigón. La información a conocer de estas adiciones corresponde a:

1. Porcentaje en peso de cemento de la adición.
2. Información relacionada con las propiedades del concreto resultante (básicamente las mismas de los aditivos).

e) Agua de Mezclado

El agua de mezclado a emplear en el hormigón corresponderá a aquella que no presente características físicas o químicas que produzcan reacciones nocivas en el concreto resultante. Por lo general, se recomienda utilizar agua que no tenga un pronunciado olor o sabor y que sea potable.

La cantidad de agua necesaria para la mezcla va a depender de la absorción de los áridos, o sea en función de la porosidad de los mismos, su densidad, de su contenido de humedad en el momento de su uso, etc., así como de las condiciones de obtención y transporte. Es importante determinar el agua efectiva y el agua de absorción en los agregados.

3.5.2 Proporcionamiento de Mezclas de Concreto Liviano Estructural

Hay varias propuestas de dosificación de los concretos livianos, entre éstas, probablemente el método más común y utilizado en Norte America y muchos países, corresponde a la NORMA PRACTICA PARA LA SELECCIÓN DE PROPORCIONES PARA CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL A.C.I. 211.2, que explica paso a paso el procedimiento para obtener concretos livianos con una resistencia a la compresión adecuada. Cabe acotar que las tablas que se muestran en ese documento, corresponden a datos experimentales de concretos livianos en Estados Unidos. En el caso colombiano estos datos no son aplicables, aunque a falta de investigación, constituyen una primera aproximación al diseño de mezcla deseado, puesto que, a diferencia de los concretos de peso normal, en los concretos livianos entra a jugar una nueva variable en la dosificación: la densidad.

El procedimiento de producción del concreto liviano es frecuentemente más complicado que el de peso normal, por las siguientes razones:

- El agua absorbida por los agregados livianos cuando el concreto se encuentra en estado fresco.
- La resistencia propia mecánica del agregado liviano es muy inferior en comparación con la resistencia de un agregado de peso normal, que frecuentemente son elevadas.
- Las proporciones del agregado liviano en la mezcla deberán garantizar una reducción significativa del peso unitario del concreto en estado seco.
- El concreto deberá tener una buena trabajabilidad y evitar que el agregado liviano se segregue por flotación hacia la superficie del concreto.
- Existe una relación directa entre la Resistencia y la Densidad en los concretos livianos.

En vista de los anteriores problemas, la ref [63] indica que la relación agua-cemento no puede establecerse con suficiente exactitud, para ser usada como base para el proporcionamiento de las mezclas, más que todo por el problema de la variación de la absorción de agua entre los agregados livianos. Es por esto que normalmente se realizan las denominadas mezclas de pruebas, que corresponden a realizar varias batchadas, compuestas cada una por un contenido distinto de cemento para un grado requerido de trabajabilidad. La resistencia de cada una de las mezclas de prueba es probada a la edad deseada para establecer una relación entre la resistencia y el contenido de cemento. De estas relaciones puede determinarse el contenido de cemento para la resistencia requerida.

Lo anterior se realiza en caso de no tener experiencia previa, ni resultados del concreto deseado fabricado en circunstancias similares.

Recomendaciones para su dosificación [18], [72]

La diferencia principal para el proporcionamiento de materiales entre un concreto normal y uno liviano corresponde básicamente a que en este último se necesita controlar la densidad del hormigón resultante.

Es conveniente, antes de realizar la dosificación del concreto liviano, conocer algunos aspectos teóricos que van ligados a las propiedades del concreto en estado endurecido, lo cual ayudará a entender el comportamiento a lo largo de la vida del producto, tanto referentes a fabricación, transporte, colocación en obra e incluso en su vida útil de servicio. Entre los más importantes se encuentran:

1. Existe una relación directa Resistencia-Densidad en los concretos livianos, de tal manera que al aumentar la densidad aumenta la resistencia del concreto, además de otros parámetros.

2. El agregado liviano es menos resistente que el normal, por lo cual se debe trabajar con pastas de cemento más ricas y resistentes, ya que la transmisión de esfuerzos se hace por el mortero y la falla por compresión se presenta generalmente por la rotura de los agregados livianos.
3. Se debe contemplar la absorción de los áridos livianos, ya que al ser alta, puede producir una reducción en el contenido de agua de la pasta de cemento y puede que absorba parte del aditivo empleado. Para solventar lo anterior, usualmente se utilizan uno de los siguientes métodos:
 - Inmersión durante 12 horas del agregado liviano en agua.
 - Preamasado del mismo con la arena con al menos el 50% del agua total.
 - Semisaturación del agregado liviano con aspersores o difusores durante al menos 24 horas antes de la utilización

Se recomienda que la incorporación de los aditivos no se haga antes que los áridos se hayan humedecido.

4. Se debe escoger una relación a/mc adecuada, de tal forma que de una buena trabajabilidad de la mezcla. Cabe recordar que el agua de esta relación es el agua real de la mezcla, es decir la ajustada por absorción y humedad tanto de los agregados gruesos como de los finos.
5. No se aconseja la consistencia fluida o líquida, ya que debido a la baja densidad de estos agregados el hormigón tiende a segregarse por flotación de los mismos, salvo que se utilicen aditivos que aumenten la cohesión de la masa y eviten la segregación.
6. Es recomendable reducir el contenido de cemento utilizando uno de mayor resistencia, pues así se reduce la densidad (la pasta es más pesada que el árido). En los concretos livianos la resistencia del concreto crece con una pendiente menor que la resistencia del mortero. Así mismo, la cantidad de cemento necesaria para conseguir una resistencia determinada es siempre mayor en los hormigones livianos que en los normales.
7. Se pueden dosificar hormigones livianos con granulometrías continuas o discontinuas. En general las granulometrías continuas dan una mejor adherencia y reducen el riesgo de la segregación.
8. En general el tiempo de amasado para los hormigones con áridos livianos es superior que en el hormigón con áridos normales, y debe tenerse precaución en relación a la eventual friabilidad de los áridos.
9. A causa del agua acumulada en el interior del árido, la diferencia en los contenidos de humedad, entre las zonas internas y las externas del hormigón, es mayor en el concreto liviano que en el normal, por lo que las tensiones de retracción serán mayores así como las correspondientes fisuraciones. Para evitarlo, se mantiene la humedad de amasado o se propicia una humidificación adicional.

10. Resulta antieconómico, en casi todos los casos, superar una dosificación de 400 kg de cemento por metro cúbico de hormigón, cantidad a partir de la cual empiezan a presentarse los problemas de la sobredosificación, ya conocidos en el hormigón normal: aumento de retracciones, térmicas e hidráulicas, con el consiguiente riesgo de agrietamiento.
11. La dosificación en volumen es aconsejable para los agregados livianos de mayor tamaño. Para las clases granulométricas inferiores a cuatro milímetros es mejor la dosificaron en peso, pues el agua –además de aumentar de forma imprevisible en la mezcla- produce un efecto de esponjamiento en la arena ligera, con aumento de volumen.
12. El aumento de tamaño de los áridos livianos suele llevar aparejada una disminución en el módulo de elasticidad, resistencia de los granos y densidad. Por lo anterior es conveniente que el tamaño máximo de los agregados no sea mayor y es por esto que generalmente se tiene como tamaño máximo de este tipo de áridos 20 mm (3/4”).

Recomendaciones de ejecución [34]

- La compactación del hormigón debe cuidarse en el sentido de reducir la distancia entre puntos de inmersión del vibrador frente a lo que normalmente se adopta en hormigones normales. Por otra parte la tendencia de algunos áridos livianos a flotar hace que deban tomarse precauciones especiales empleándose vibradores de superficie o rodillos que introduzcan los áridos en el interior de la masa. Las frecuencias de vibración deben ser dos o tres veces las usadas en los hormigones normales, introduciendo el vibrador a distancias más cortas y durante menos tiempo.
- El transporte del concreto debe hacerse en camiones hormigonera y debe procederse a un reamasado antes de procederse al vertido. Es posible la reducción de la consistencia del concreto durante el transporte en mayor nivel que el concreto normal, así como la tendencia a la segregación lo que puede manifestarse en mayor medida en los hormigones más fluidos y ante los áridos con mayor densidad, por lo que resulta recomendable la utilización de aditivos o adiciones que permitan reducir el contenido de agua.
- La bombeabilidad de estos hormigones es complicada cuando se utilizan las bombas habituales en construcción. La solución a ese problema está en una granulometría adecuada, una buena saturación del agregado y el uso de aditivos. Se recomiendan las arenas redondeadas para propósitos del bombeo.

Procedimiento para producir concreto liviano [72]

Finalmente, en base a las recomendaciones anteriores, se tiene que el mejor procedimiento para mezclar concreto liviano y evitar el problema de la absorción de l agua de mezcla por parte de los áridos livianos, se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Introducir todos los áridos en la mezcladora en marcha.
2. Verter unas 2/3 partes del agua de amasado necesaria, mezclando durante unos 30 segundos.
3. Introducir el cemento y el agua restantes, para seguir mezclando durante minuto y medio.
4. Si se emplean aditivos en polvo, se mezclan en seco al cemento; si líquidos, se añaden al agua de amasado, pero una vez que se tenga el premojado del agregado, porque de lo contrario podrían ser absorbidos por los áridos, perdiendo efectividad en la mezcla.
5. Los tiempos de mezclado son superiores al concreto normal y oscilan entre el minuto y medio y los tres minutos.

Para garantizar la trabajabilidad exigida es conveniente aumentar los tiempos de mezclado con respecto a un concreto normal y es obligatorio prehumedecer a los agregados con el objeto de disminuir la cantidad de agua a añadir, éstas son las razones por las cuales la mayor cantidad de concreto liviano estructural producido es concreto premezclado, ya que este sistema con sus numerosos controles es el más efectivo para garantizar el cumplimiento con los requisitos de diseño.

3.5.3 Procedimientos de Diseño

Existen varias metodologías para el proporcionamiento de mezclas para obtener concretos livianos. El método más conocido en el mundo, corresponde al procedimiento explicado en la ACI 211.2. De la misma forma en países de Europa como Suecia, se han establecido metodologías de proporcionamiento que se basan en la resistencia del agregado liviano, y que tuvieron su finalidad con la producción del denominado LECA. En esta parte del mundo, actualmente, existen los trabajos publicados por el profesor Mauricio López de la Universidad Católica de Chile, en la cual a través de numerosos ensayos propuso un método de dosificación para concretos livianos sin distinguir el tipo de árido liviano a utilizar. En este documento se explican las metodologías propuestas en el documento ACI 211.2 y el método de Chandra y Berntsson, de la Universidad de Chalmers en Gotemburgo (Suecia).

3.6 REQUISITOS DE LA NORMA TECNICA COLOMBIANA, NTC 4045, PARA CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL

En Colombia, la normativa que clasifica a los concretos estructurales como livianos, corresponde a la Norma Técnica Colombiana, NTC 4045: “Agregados Livianos para concreto estructural”. En esta especificación, se especifican los ensayos que se les deben hacer a los concretos livianos, así como la cantidad y los límites mínimos y máximos permitidos. Es esta norma se especifica que los ensayos a realizar a una misma mezcla de concreto liviano, corresponden a:

- **Ensayo de Masa Unitaria (NTC 4022):** Se calculará como el promedio de tres especímenes.
- **Ensayo de Resistencia a compresión (NTC 673):** Su valor será el promedio de tres especímenes.
- **Ensayo de Resistencia a tensión de agrietamiento (NTC722):** Se calculará como el promedio de ocho especímenes.

Los anteriores valores deberán compararse con los límites mínimos de resistencia a compresión y a tensión dados por la Tabla 3.11, y por el límite máximo para masa unitaria seca del concreto liviano, dado por la misma tabla, que se muestra a continuación:

Promedio de la masa unitaria secada con aire, a 28 d, máx (kg/m ³)	Promedio de resistencia a la tensión de agrietamiento, a 28 d, mín (Mpa)	Promedio de la resistencia a la compresión, a 28 d, mín (Mpa)
Agregado Liviano		
1760	2.2	28
1680	2.1	21
1600	2	17
Agregado liviano y arena		
1840	2.3	28
1760	2.1	21
1680	2.1	17

Tabla 3.11. Requerimientos de Masa Unitaria, Resistencia a la tensión y Resistencia a compresión de concretos livianos según NTC 4045.

Así mismo, en el mismo apartado de la NTC 4045, se indica que para valores intermedios de resistencia y masa unitaria, estos se pueden obtener por interpolación.

En la misma normativa se explica que a muestras de concreto se les pueden realizar los siguientes ensayos complementarios:

- Ensayo de contracción del concreto (ASTM C157).
- Ensayo de inspección de protuberancias en los materiales (NTC 107).
- Ensayo de congelamiento y descongelamiento (ASTM C666)

Los requerimientos para concreto liviano estructural dados por la NTC 4045, se pueden resumir en la siguiente tabla:

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

Ensayo	Norma	Tipo de espécimen	Mínima cantidad de especímenes
Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto.	NTC 673 (ASTM C 39)	Cilindro normal (15x30cm)	3 espec./edad/resistencia f'c
Ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concretos	NTC 722 (ASTM C 496)	Cilindro normal (15x30cm)	8 espec /resistencia f'c
Masa unitaria de concreto liviano estructural.	NTC 4022 (ASTM C 567)	Cilindro normal (15x30cm)	3 espec /resistencia f'c
Ensayo de contracción	ASTM C 157.	10x10x25 cm	3 espec /resistencia f'c
Ensayo de inspección de protuberancias.	NTC 107 (ASTM C 151)	10x10x25 cm	3 espec /resistencia f'c
Ensayo de congelamiento y descongelamiento.	ASTM C 666.	10x10x30 cm	1 espec /resistencia f'c

Tabla 3.12. Requerimientos para concreto liviano estructural por la NTC 4045.

Generalmente, se recomienda el realizar ensayos de durabilidad adicionales a lo expresado por la NTC 4045, como los explicados en el apartado 3.4.9 del presente texto, con el objeto de caracterizar el concreto con un mayor criterio desde el punto de vista de durabilidad, que como se sabe es una de las propiedades principales del hormigón.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El agregado liviano que mejor se comporta según los requerimientos de resistencia, densidad y trabajabilidad -que especifica la ACI 213R-03- corresponde al de tipo artificial, entre los cuales la Arcilla Expandida Térmicamente (AET) es el más conocido y utilizado.

Con base a lo anterior, el presente proyecto de investigación, se enfocó en la obtención del Concreto Liviano Estructural con Arcilla Expandida Térmicamente del sector sur de la Sabana de Bogotá, por lo tanto, fue necesario el subdividir esta investigación en tres partes:

- ✓ La primera investigación correspondió a la obtención de una arcilla de la parte sur de la sabana de Bogotá con capacidad de expansión de forma natural.
- ✓ La segunda investigación se enfocó en la fabricación de un Concreto Liviano Estructural con un agregado liviano comercial extranjero, que sirva como agregado patrón del árido colombiano y suministre la experiencia necesaria para producir Concreto Liviano con arcillas colombianas.
- ✓ La tercera investigación, se refiere al objeto de la presente investigación, el cual hace referencia a la producción de Concreto Liviano con arcillas del sur de la Sabana de Bogotá.

Los ensayos del proyecto de investigación serán referentes a los agregados y a los especímenes de concreto y se seleccionaron en base a los requerimientos teóricos expuestos en los capítulos 2 y 3 del presente documento. A los agregados livianos que formen parte de la mezcla de concreto, se les debe realizar los siguientes ensayos:

- Análisis por tamizado de los agregados gruesos (Gradación).
- Ensayo de Masa Unitaria, Absorción y Factor de Gravedad Específica.
- Ensayo de Análisis Químico.
- Ensayo de difracción de rayos X para establecer la mineralogía del material.

A los agregados finos se les harán los siguientes ensayos:

- Análisis por tamizado de los agregados finos (Gradación).
- Ensayo de Gravedad Específica y Absorción para el agregado fino.

Al cemento se le harán los siguientes ensayos:

- Ensayos sobre el cemento puro: Densidad y finura (Superficie específica).
- Ensayos sobre la pasta de cemento: Consistencia normal y tiempos de fraguado.
- Ensayos sobre el mortero: Ensayo de compresión en cubos a 7, 14 y 28 días.

Las probetas de concreto liviano se ensayarán de acuerdo con los requerimientos de la NTC 4045, por lo tanto, estos especímenes serán cilindros estándar de 15x30cm. A estos se les harán los siguientes ensayos:

- Ensayo de Resistencia a Compresión a edades de 3, 7 y 28 días (NTC 673 y 454).
- Ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta a edad de 28 días (NTC 722).
- Ensayo de Durabilidad: Absorción en frío, caliente y porosidad, para medir la permeabilidad en el concreto (ASTM C 642-06).
- Ensayo de Masa Unitaria de Concreto Liviano Estructural (NTC 4022).
- Ensayo de Modulo de Elasticidad y relación de Poisson (NTC 4025).

4.1 ARCILLAS EXPANDIDAS TÉRMICAMENTE DEL SUR DE BOGOTÁ

En este apartado se procederá a explicar el procedimiento para obtener Arcillas Expandidas Térmicamente del Sector Sur de la Sabana de Bogotá. A continuación se detalla tal metodología.

1. En base a la teoría expuesta en el capítulo 2: Marco Teórico de las Arcillas Expandidas Térmicamente (AET), se llegó a la conclusión de que las arcillas con potencial de expansión natural, son aquellas que cumplen con unas características químicas y mineralógicas especiales; por lo tanto, se procedió a buscar información relacionada con arcillas que tuvieran estas propiedades y que estuvieran localizadas en el sur de la Sabana de Bogotá.
2. La información requerida de las propiedades de las arcillas, se encontró en el "Catálogo De Propiedades Físicas, Químicas Y Mineralógicas De Las Arcillas Para Cerámica Roja En Los Centros Urbanos De Medellín, Ibagué Y Sabana De Bogotá, [24]", realizado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS, en el 2003. En este documento se procedió a estudiar distintos tipos de arcilla, basados en dos aspectos. El primero, referente a que el material se localizara en el sur de la Sabana de Bogotá, y el segundo a que las zonas de extracción de las arcillas fueran canteras activas destinadas a la producción industrial de materiales de construcción.

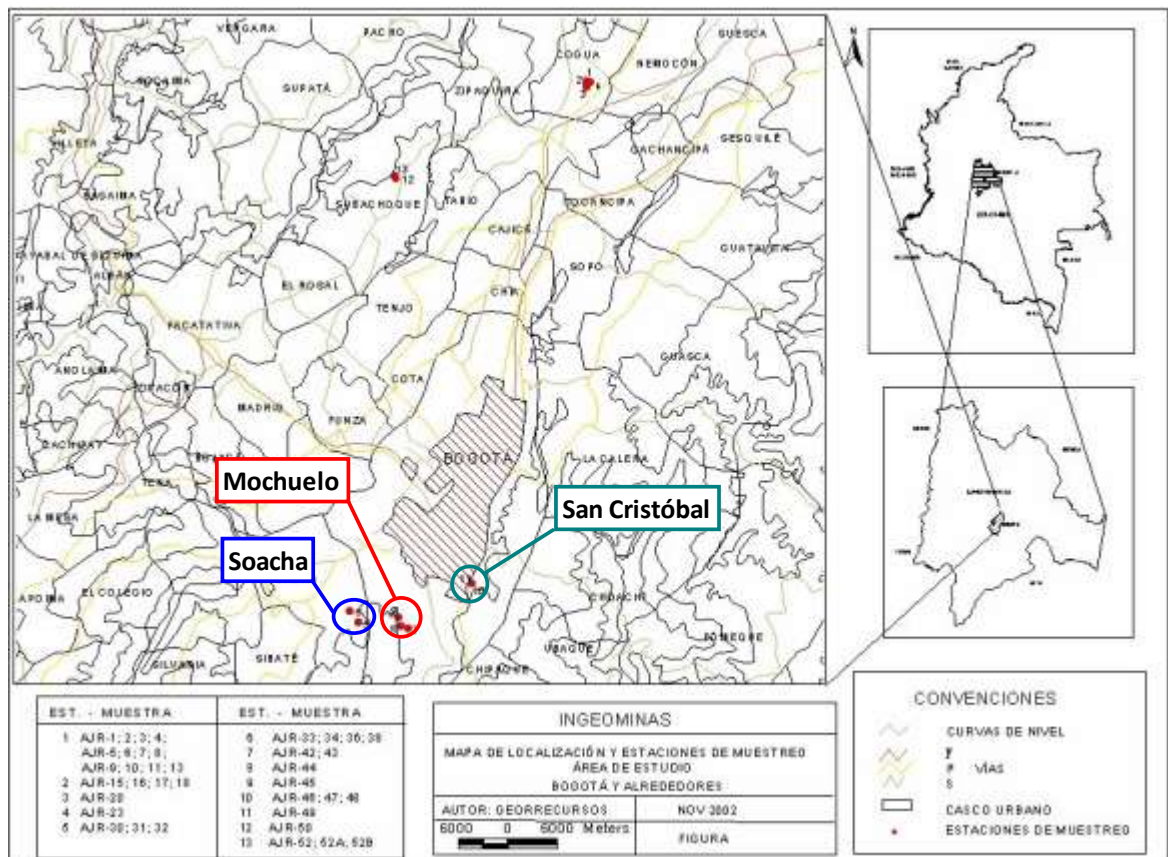


Figura 4.1. Localización estaciones de muestreo Sabana de Bogotá por INGEOMINAS [24].

3. De las arcillas del Sector Sur de la Sabana de Bogotá que estudiaba el documento de INGEOMINAS, se decidió incluir las correspondientes a las zonas de Mochuelo, San Cristóbal y Soacha, con el objeto de hacer un barrido apropiado sobre la zona del sur de Bogotá. Se estudiaron varios puntos de extracción de arcillas, bajo el criterio de que los puntos seleccionados deberían estar dentro de la zona de expansión del diagrama de Riley y de que presentarían abundancia del mineral denominado esméctica, el cual ayuda a fomentar la expansión de las arcillas. Las características de los puntos de extracción de las arcillas y su localización en el diagrama de Riley, se muestran a continuación:

ESTACIONES	Código M. Campo	X	Y	AREA GEOGRÁFICA	FORMACION
5	AJR-30	991,767	987,268	SOACHA	GUADUAS
	AJR-31	991,767	987,268		
	AJR-32	991,767	987,268		
6	AJR-33	993,121	986,341	SOACHA	GUADUAS
7	AJR-34	993,121	986,341		
	AJR-36	993,121	986,341		
8	AJR-44	991,361	992,074	MOCHUELO	SABANA
9	AJR-45	992,350	991,794		
10	AJR-46	996,106	1,000,108	SAN CRISTOBAL	BOGOTA INFERIOR
	AJR-47	996,106	1,000,108		
	AJR-48	996,106	1,000,108		
11	AJR-49	996,290	999,834	SAN CRISTOBAL	BOGOTA INFERIOR
12	AJR-50	1,041,793	991,550		

Tabla 4.1. Estaciones de arcillas estudiadas por INGEOMINAS en el sur de Bogotá [24].

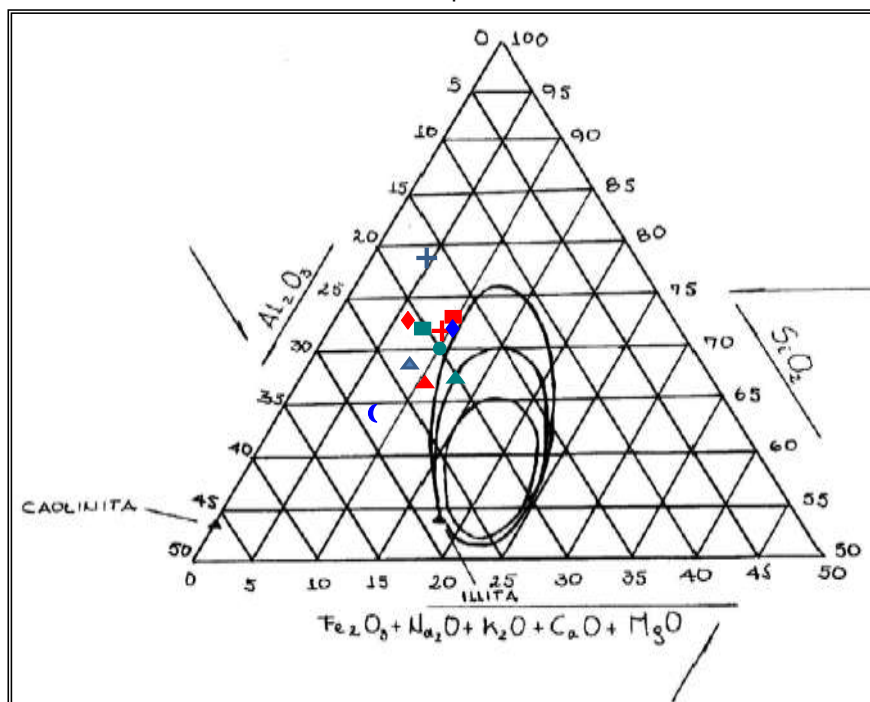


Figura 4.2. Ubicación de las estaciones de las arcillas del sur de Bogotá en el diagrama de Riley.

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

ESTACIONES	Simbolo	Código M. Campo	% SiO ₂	% Fe ₂ O ₃	% Al ₂ O ₃	% CaO	% MgO	% Na ₂ O	% K ₂ O	% TiO ₂	% MnO ₂	% Cr ₂ O ₃	%NiO	% Humedad	% Pérdidas por calcinación
5	●	AJR-30	63.34	5.85	17.32	0.36	1.65	0.26	1.57	0.92	0.13	0.03	0.01	1.90	6.63
	●	AJR-31	61.49	7.11	18.52	0.35	1.44	0.24	1.69	1.04	0.03	0.03	0.01	2.06	5.85
	●	AJR-32	62.63	5.44	18.11	0.22	1.13	0.26	1.33	1.00	0.03	0.03	0.04	1.83	6.10
6	○	AJR-33	54.37	2.81	24.35	0.19	1.15	0.30	1.34	0.85	0.02	0.03	0.03	3.12	10.34
	▲	AJR-34	60.70	5.15	20.61	0.24	1.19	0.21	1.45	0.97	0.03	0.03	0.03	2.35	6.86
7	▲	AJR-36	56.15	6.44	20.14	0.30	1.17	0.19	1.22	1.06	0.05	0.03	0.03	2.81	10.23
	▲	AJR-38	61.30	7.69	19.16	0.24	1.12	0.27	1.46	1.16	0.02	0.03	0.01	1.34	5.80
	+	AJR-44	72.52	3.35	14.55	0.07	0.6	0.12	0.85	1	0.02	0.01	0.01	1.3	5.23
9	+	AJR-45	65.88	6.51	17.03	0.06	0.57	0.19	1.21	0.95	0.02	0.01	0.01	1.46	5.78
	■	AJR-46	66.63	5.55	16.87	0.17	1	0.6	1.21	0.8	0.06	0.01	0.01	1.47	5.37
10	■	AJR-47	66.21	5.84	17.67	0.2	0.78	0.29	1.21	0.8	0.03	0.01	0.03	1.61	5.18
	■	AJR-48	65.22	5.55	18.21	0.24	0.71	0.23	0.97	0.93	0.03	0.01	0.03	1.6	6.12
	■	AJR-49	65.18	6.26	17.49	0.24	1.2	0.43	1.45	0.93	0.05	0.01	0.03	1.27	5.36
12	◆	AJR-50	64.82	2.53	18.85	0.17	0.71	0.19	1.09	2.13	0.02	0.01	0.04	2.46	6.77

Tabla 4.2. Composición química de las arcillas estudiadas por INGEOMINAS en el sur de Bogotá [24].

- De los puntos que quedaron dentro de la zona de expansión del diagrama de Riley, se seleccionaron los puntos de extracción de las arcillas del Sector Sur de la Sabana de Bogotá. A continuación, se realizó un plan de muestreo, con el objeto de trasladarse a esos sitios seleccionados; para lo cual, fue indispensable el conseguir un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y el basarse en las coordenadas georeferenciadas que se encontraban en el documento de INGEOMINAS. El GPS, fue suministrado por la Unidad de Transporte de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá.



Figura 4.3. GPS de la unidad de transportes de la Universidad Nacional –Sede Bogotá-.



Figura 4.4. Cantera de arcilla del sur de la Sabana de Bogotá.



Figura 4.5. Extracción manual de un punto seleccionado del Sur de la Sabana de Bogotá.



Figura 4.6. Arcilla natural almacenada en laboratorio.

5. Una vez trasladados a los sitios de extracción, se procedió a georeferenciar cada uno de los puntos de los cuales se tomaba una muestra de arcilla. Así mismo, estos lugares fueron reenumerados, tal y como se muestra en la Tabla 4.3. En esta tabla se enseñan los 10 puntos de extracción. En algunos lugares se tomaron muestras de distintos tipos de arcilla, debido a su diferencia en color, de arcillas de la misma zona.

PTO	UBICACIÓN	ALTURA m	DISTANCIA		COORDENADAS GEORREFERENCIADAS		IDENTIFICACION	CANTIDAD
			DIREC.	Km			MUESTRA	MUESTRAS
1	Soacha	2584	SW	17.04	N 04° 32' 02.3"	W 074° 12' 02.1"	7.1, 7.2, 7.3	3
2	San Cristóbal	2584	S	7.88	N 04° 33' 45.5"	W 074° 04' 44.4"	9.1	1
3	Soacha	2721	SW	16.87	N 04° 32' 15.9"	W 074° 12' 06.3"	13.1, 13.2, 13.3	3
4	San Cristóbal	2804	S	8.34	N 04° 33' 30.3"	W 074° 04' 51.1"	14.1	1
5	San Cristóbal	2829	S	8.61	N 04° 33' 41.8"	W 074° 04' 38.2"	15	1
6	San Cristóbal	2760	S	7.49	N 04° 34' 00.1"	W 074° 04' 28"	16.1	1
7	Yuste	2760	S	7.49	N 04° 34' 00.1"	W 074° 04' 28"	16.2, 16.3, 16.4	3
8	Mochuelo	-	-	-	-	-	17.2	1
9	Mochuelo	-	-	-	-	-	18.2	1
10	Mochuelo	-	-	-	-	-	19.2	1
Total muestras:								16

Tabla 4.3. Puntos de extracción de muestras de arcillas en el sur de Bogotá.

6. Una vez extraídas las 16 muestras, de aproximadamente 2 kg en peso cada una, se trasladaron a los laboratorios del Instituto de Ensayos e Investigación (IEI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá. Posteriormente, para estudiar la capacidad a la expansión térmica de forma natural del material, a estas arcillas se les realizó el siguiente proceso:
- Molienda (por medios manuales o mecánicos) y pulverización.
 - Homogenización y moldeo de esferas de aproximadamente 10mm de diámetro, con un porcentaje aproximado de 20% de agua en peso.
 - Las esferas se secaron a temperatura ambiente por 24 horas y posteriormente se secaron en un horno a 110 +/- 5 °C por 24 horas.
 - Finalmente, a las esferas de arcilla se les decidió aplicar el procedimiento que según el apartado 2.2.6, del presente texto, garantiza la mayor expansión; es decir, se aplicó el proceso de quema rápida a la mayor temperatura de cocción posible, la cual se situó en 1300°C, debido a que ensayos en conos pirométricos a las arcillas del proyecto, mostraron que la temperatura de fusión de estas estaban por encima de los 1340°C.



Figura 4.7. Molienda de arcilla en molino de mandíbulas del IEI.



Figura 4.8. Trituración de arcilla de gran dureza por medio manual.

- Posteriormente, para estudiar las diferencias de los porcentajes de expansión a temperaturas inferiores a los 1300°C por quema rápida, se procedió a hacer ensayos a temperaturas de cocción de 1150°C y 1200°C. En último lugar, se decidió realizar un ensayo de quema lenta a 1300°C para las arcillas que presentaron la mayor expansión.



Figura 4.9. Arcilla de referencia 11.1 molida pasa tamiz 100.



Figura 4.10. Esferas de arcilla después de moldeadas.

7. Para realizar los ensayos de quema rápida, fue necesario la consecución de un horno que llegara hasta 1300°C. Esto se logró gracias a la donación de la empresa cementos Argos S.A., de un horno estático eléctrico con capacidad de llegar a esa temperatura. En la figura siguiente se muestran, las distintas curvas de cocción de las arcillas para el procedimiento de quema rápida a 1300°C, 1200°C y 1150°C y de quema lenta para 1300°C.

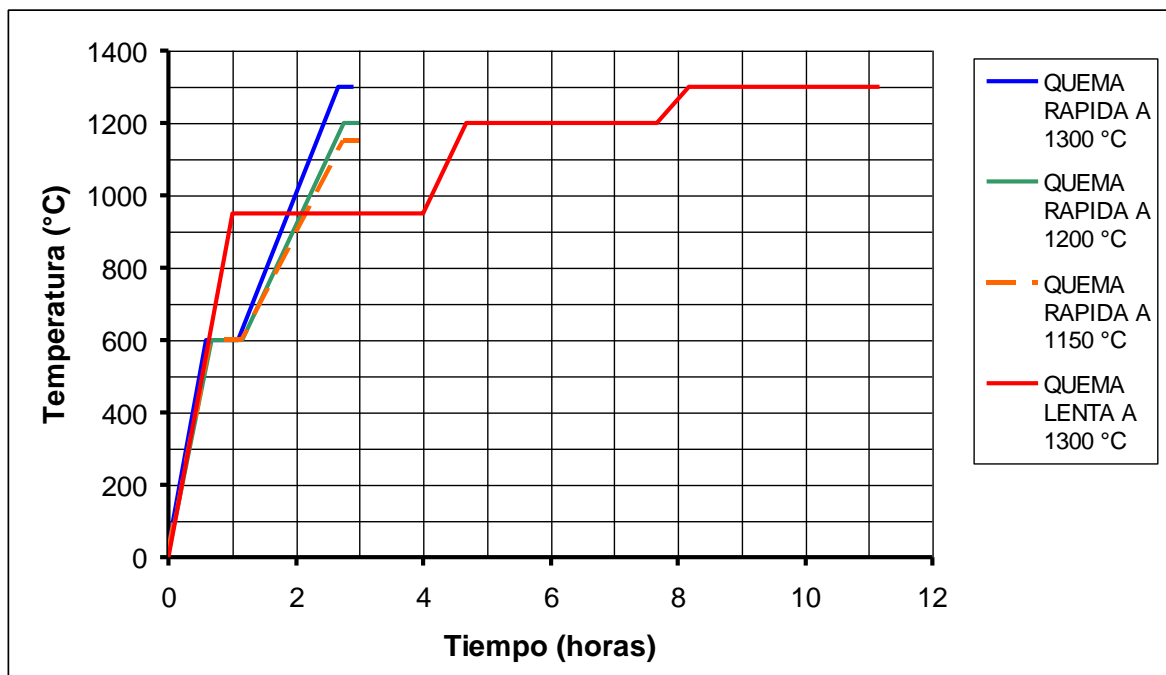


Figura 4.11. Curvas de quema rápida y lenta utilizadas para los ensayos de calcinación con el horno suministrado por Cementos Argos S.A.



Figura 4.12. Vista interior del horno donado por ARGOS.



Figura 4.13. Muestras de arcilla del sur de Bogotá, al ser sometidas a quema rápida.

- De los ensayos de quema, se procedió a determinar el porcentaje de expansión de las muestras de arcilla, por medio de la diferencia entre diámetros finales e iniciales de las esferas, como se muestra en la Ecuación 4.1. Así mismo, se seleccionaron varias muestras de arcilla, con y sin capacidad de expansión, para realizarles ensayos químicos y mineralógicos, con el objeto de entender con mayor profundidad el perfil requerido de la arcilla con potencial de expansión de forma natural.

$$\% \text{ Expansión} = \frac{\text{Diámetro Final}^3 - \text{Diámetro Inicial}^3}{\text{Diámetro Inicial}^3} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

- Finalmente, la muestra de arcilla que obtuvo la mayor expansión, que correspondió a la identificada como 13.3 (Soacha) y se escogió como la representativa del sur de la Sabana de Bogotá. Por lo tanto, es con esta arcilla que se fabricó el Concreto Liviano Estructural con Arcilla Expandida Térmicamente del Sur de la Sabana de Bogotá.

4.2 CONCRETO LIVIANO CON AGREGADOS LIVIANOS DE VENEZUELA (ALIVEN)

En esta segunda parte de la investigación, se decidió la consecución de un agregado Liviano comercial, el cual correspondió al llamado Agregado Liviano de Venezuela (ALIVEN), el cual se escogió por: costos, fácil transporte y por que es utilizado en la construcción en el vecino país. A continuación se explica el procedimiento para obtener este ALIVEN, y la metodología para fabricar Concreto Liviano Estructural con ALIVEN.

4.2.1 Agregados Livianos de Venezuela (ALIVEN)

Como ya se explicó el ALIVEN fue utilizado como un agregado patrón, para calibrar la producción del Agregado del Sector Sur de la Sabana de Bogotá (ALISUR).

Al ser un agregado patrón, se planteó la producción de cuatro mezclas de concreto con ALIVEN, por lo cual se realizó un estudio de cantidades necesarias del material y se procedió a traerlo a Colombia, para utilizarlo en los siguientes procesos:

- De acuerdo a un estudio de cantidades y tomando en cuenta un adecuado factor de seguridad, se estableció que la cantidad óptima de ALIVEN, necesaria para la

producción de 4 mezclas de concreto liviano estructural, con todos los ensayos requeridos por las normativas, era de 250 kg.

2. Se adoptó la recomendación dada por la empresa Aliven, de acoger la granulometría del agregado Liviano en dos tamaños, el fino (de 5 mm a 10 mm) y el medio (de 10 mm a 14 mm) en una proporción en mezcla de 60 % de tipo fino y 40% de tipo medio. De lo anterior, se optó por traer 6 sacos de 50 litros de ALIVEN tipo fino y 5 sacos de 50 litros de ALIVEN tipo medio. Las presentaciones de los dos productos, se muestran a continuación:



Figura 4.14. Saco de ALIVEN de 50 lts de tipo Fino.



Figura 4.15. Saco de ALIVEN de 50 lts de tipo Medio.

3. El material fue sometido a los ensayos estipulados por la Norma Técnica Colombiana NTC-4045. Después de obtenidos los resultados esperados, el material ya estaba apto para fabricar Concreto Liviano Estructural con ALIVEN.



Figura 4.16. Agregado tipo Fino de ALIVEN.



Figura 4.17. Agregado tipo Medio de ALIVEN.

4.2.2 Concretos Livianos Estructurales con ALIVEN

La producción de estos concretos se realizó basándose en las características del ALIVEN y de las propiedades de los demás componentes de la mezcla (arena y cemento). Una vez realizados los ensayos de estos ingredientes del concreto, la producción del Concreto Liviano Estructural con ALIVEN, siguió los lineamientos que se mencionan enseguida.

4.2.2.1 Materiales

El cemento y la arena utilizados para la producción de concreto liviano fueron donados en su totalidad por la empresa Cementos Argos S.A., a través de su planta en Fontibón. Estos materiales presentaban las siguientes características:

- **Arena Natural:** Se utilizó arena de río, extraída de cercanías al municipio de Tabio (Cundinamarca).



Figura 4.18. Descargue de la Arena de río donada por ARGOS.



Figura 4.19. Descargue del Cemento donado por ARGOS

- **Cemento:** El cemento utilizado en las mezclas de concreto correspondió a un cemento “concretero” Tipo I de alta resistencia inicial. Las características de este cemento, se encuentran en el capítulo 4. Véase 4.2.2.1.
- **Agua:** Como vehículo de mezcla se utilizó agua potable, que cumple con las especificaciones dadas en la norma técnica colombiana NTC3459, “Agua para la elaboración de concreto”.

4.2.2.2 Procedimiento

El procedimiento para producir concreto liviano estructural con agregados livianos de Venezuela (ALIVEN), se basó en los siguientes aspectos:

1. Se optó por realizar mezclas prueba de concreto con ALIVEN para una resistencia especificada de 25 MPa, basándose en la dosificación de la Tabla 4.5. Se realizaron tres cilindros de prueba, los cuales se fallaron a la edad de 7 días, obteniéndose los resultados de la Tabla 4.4. Los resultados validaron los diseños de mezcla proporcionados por ALIVEN, debido a que eran resultados a 7 días y por la proximidad con la resistencia especificada, por lo que se procedió a seguir la dosificación recomendada por ellos.

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

PROBETA	FUERZA	FUERZA	RESISTENCIA	RESISTENCIA
	kg	kN	kN/m ²	MPa
1	37670	377	21317	21.32
2	42110	421	23829	23.83
3	39720	397	22477	22.48
		Promedio:		22.54

Tabla 4.4. Resultados de la mezcla de prueba de concreto con ALIVEN.

- Se procedió a realizar mezclas de concreto liviano estructural con ALIVEN utilizando la dosificación por peso proporcionada por la empresa Aliven, para resistencias especificadas a la compresión de 18, 21, 25 y 28 MPa a los 28 días, sin la utilización de aditivos. La dosificación empleada se muestra en la Tabla 4.5.

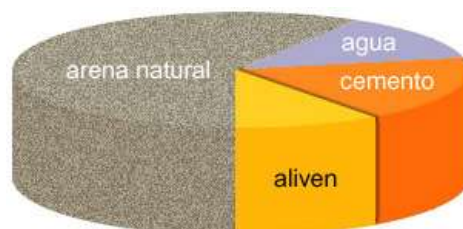


Figura 4.20. Proporcionamiento esquemático de mezcla con ALIVEN [2].

Peso de los componentes (Kg)	Resistencia Especificada (MPa)			
	18	21	25	28
60% fino Aliven + 40% medio Aliven (Kg)	200	200	200	200
Arena Natural (Kg)	1000	1000	1000	1000
Cemento (Kg)	298	340	383	425
Agua (litros)	200	200	210	220
Peso fresco (Kg/m ³)	1700	1740	1780	1835
Relación a/mc	0.67	0.59	0.55	0.52

Tabla 4.5. Dosificación por peso de mezclas de Concreto Liviano Estructural con ALIVEN para 1 m³ de concreto [2].



Figura 4.21. Fabricación de Concreto Liviano con ALIVEN.



Figura 4.22. Estado final del concreto antes de ser colocado.

3. Se siguieron las recomendaciones dadas por Aliven, para la producción de concretos livianos, que relacionamos:
 - Los diseños de mezclas deben ser con arena natural.
 - El aditivo a utilizar corresponde a uno tipo “D” plastificante retardador y reductor de agua.
 - Las dosificaciones son indicativas, ya que el tipo de arena que se utilice hará que varíe la resistencia, por lo que se recomienda su verificación en obra.
 - Si se utilizan arenas de trituración se logra incrementar las resistencias.
 - Se recomienda un asentamiento máximo de 2”.
 - Para evitar segregación (flotación del agregado), se deberá colocar el vibrador a menor distancia de lo normal, empleando menos tiempo.
 - Se debe controlar, en obra, la humedad de los agregados para las correcciones en cada caso.
4. Una vez fundidas las mezclas, se procedió a realizar los ensayos de compresión, tensión, módulo de Elasticidad, relación de Poisson, masa unitaria y absorción a los especímenes de concreto con ALIVEN para las cuatro mezclas planteadas.



Figura 4.23. Ensayo de compresión de Concreto Liviano con ALIVEN.



Figura 4.24. Ensayo de Tensión Indirecta de Concreto Liviano con ALIVEN.



Figura 4.25. Ensayo de Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson.



Figura 4.26. Ensayo de Masa Unitaria.

4.3 CONCRETO LIVIANO CON AGREGADOS LIVIANOS DEL SUR DE BOGOTÁ (ALISUR)

En esta última parte de la investigación, se procedió a estudiar las propiedades del Concreto Liviano Estructural compuesto por Agregados Livianos del Sur de la Sabana de Bogotá (ALISUR), para lo cual primero fue necesario estudiar el método de producción del ALISUR y posteriormente fabricar Concreto Liviano Estructural con este agregado.

4.3.1 Arcillas del sur de la Sabana de Bogotá (ALISUR).

Para fabricar los agregados Livianos del Sur de Bogotá, se tomó como base la experiencia con ALIVEN, por lo que se realizó el siguiente procedimiento:

1. Con base a los resultados de expansión de forma natural de las arcillas del sur de Bogotá (Soacha, Mochuelos y San Cristóbal), se seleccionó la que tenía mejor aptitud a la expansión térmica, de acuerdo a los resultados de las pruebas de calcinación realizadas en los laboratorios de la Universidad Nacional. Estos indicaron que la arcilla que presentó una mayor expansión correspondió a la que se identifica como 13.3, por quema rápida a 1300°C, localizada en las canteras de la ladrillera Landa en Soacha.



Figura 4.27. Tipos de arcilla del sur de Bogotá, sin calcinar.



Figura 4.28. Comparación entre arcilla de referencia 13.3, inicial y expandida.

2. Con la autorización de la ladrillera propietaria del tipo de arcilla de referencia 13.3 se extrajo de forma natural 500 kg de este material, el cual se trasladó hasta el municipio de Guatavita, en donde se procedió a realizar la molienda de todo el material. Lo anterior, se efectuó mediante la utilización de un molino adecuado para pulverizar arcillas de forma industrial, el cual se encontró localizado en la empresa Arcillas y Gredas de Colombia.



Figura 4.29. Extracción del material en la cantera de Soacha.



Figura 4.30. Almacenamiento de la arcilla para trasladarla a Guatavita.



Figura 4.31. Máquina de molienda de la arcilla utilizada en Guatavita.



Figura 4.32. Traslado de la arcilla molida de Guatavita hasta la Universidad Nacional.

3. Una vez molido el material y localizado en los laboratorios del IEI de la Universidad Nacional, se procedió a realizar el peletizado de la arcilla, tomando como criterio dos tamaños de partículas de agregado, los cuales se denominaron fino, para tamaños comprendidos entre 5mm y 10mm; y medio, para tamaños entre 10mm y 14mm.



Figura 4.33. Arcilla molida.



Figura 4.34. Prehumedecimiento -con agua- de la arcilla para formar pellets.



Figura 4.35. Pellets de arcilla introducidas en una mezcladora para darle una forma redondeada.



Figura 4.36. Descarga del material de la mezcladora para ser tamizado.

4. El procedimiento de peletizado se realizó prehumedeciendo la arcilla fina, sobre una plataforma horizontal inclinada (para favorecer la formación de pellets); posteriormente se procedió a introducir estas esferas en una mezcladora para ayudar a darle una forma redondeada al agregado. Finalmente, el material resultante de la mezcladora se depositó en un juego de tamices compuestos por: Fondo, No 4, 3/8" y 1/2", para ser sometidos a un proceso de tamizado y seleccionar los tamaños adecuados de agregado. El procedimiento detallado del peletizado, se encuentra resumido en el diagrama de flujo de la Figura 4.39.



Figura 4.37. Tamizado del agregado.



Figura 4.38. Almacenamiento de los distintos tipos de agregado de arcilla en bolsas.

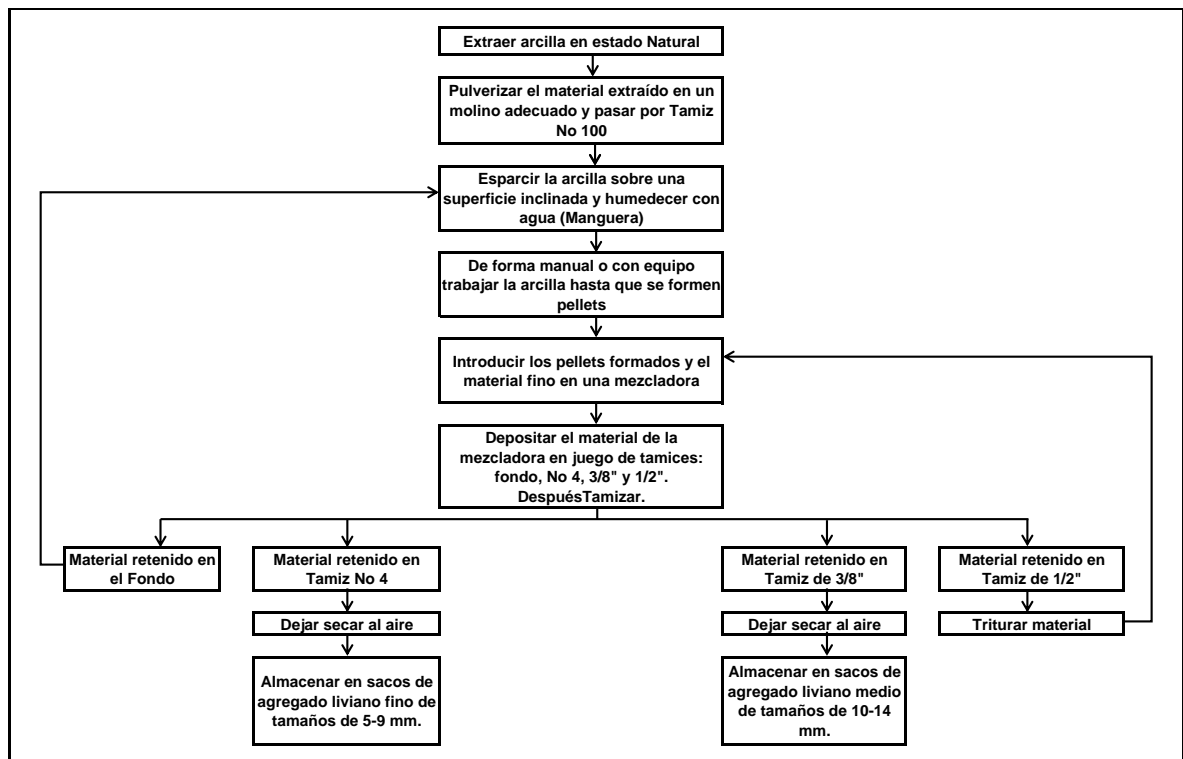


Figura 4.39. Diagrama de flujo del peletizado del Agregado Liviano del Sur de Bogotá.

- Una vez se realizó el peletizado total de la arcilla del sur de la Sabana de Bogotá, se procedió a introducir este agregado en bolsas, marcadas de acuerdo a la granulometría del agregado. Posteriormente, la arcilla se traslado hasta la ciudad de Medellín, para ser sometida al procedimiento de quema a 1300°C , en un horno industrial, para tener en cuenta el volumen requerido. Esta quema se llevó a cabo en la planta del grupo CORONA localizada en el municipio de Sabaneta, por solicitud de Cementos Argos S.A., en un horno estático que llegaba a una temperatura de 1300°C en 24 horas, tal y como se muestra en la curva de calcinación de la Figura 4.44.



Figura 4.40. Horno estático del grupo CORONA.



Figura 4.41. Colocación del agregado en el horno estático.



Figura 4.42. Dispositivo de control del horno del grupo CORONA.



Figura 4.43. Quemado del material a 1300°C .

- Después de la calcinación del material, este fue enviado a la Universidad Nacional – Sede Bogotá, en bolsas plásticas introducidas en canecas plásticas, adecuadamente identificadas dependiendo el tipo de granulometría inicial del agregado, es decir, si era de tamaño fino o medio.

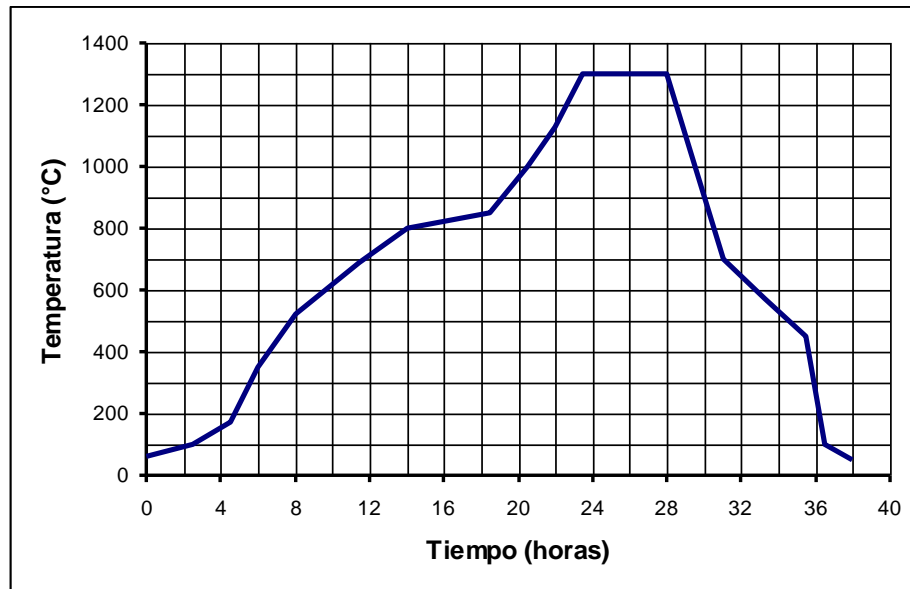


Figura 4.44. Curva de quema del horno del grupo CORONA.

- Una vez devuelto el material a la Universidad Nacional en su sede de Bogotá, se procedió a tamizarlo para eliminar las partículas finas del proceso y con el objeto de separar los agregados que terminaron aglutinados por el mismo procedimiento de cocción.



Figura 4.45. Diferenciación del material en granulometría fina y media, después de calcinado en Medellín.



Figura 4.46. Material de granulometría fina ya tamizado, después de haberle eliminado los finos.

- Después de realizado el proceso anterior, los agregados fueron sometidos a los ensayos especificados por la NTC 4045, para ser utilizados como agregados en una mezcla de concreto liviano. A continuación, se procedió a realizar mezclas de concreto liviano con Agregado del Sur de la Sabana de Bogotá (ALISUR).

4.3.2 Concretos Livianos Estructurales con ALISUR

La producción de estos concretos se realizó basándose en las características del ALISUR y de las propiedades de los demás componentes de la mezcla (arena y cemento), así:

4.3.2.1 Materiales

En esta etapa, el cemento y la arena necesarios para la producción de concreto liviano con agregados del sur de la Sabana de Bogotá, también fueron donados en su totalidad por la empresa Cementos Argos S.A., a través de su planta en Fontibón. Estos materiales tuvieron la misma procedencia y fueron del mismo tipo, que los utilizados en las mezclas de Concreto con ALIVEN. Es decir, la arena de río fue de Tabio y el cemento fue “concretero” Tipo I de altas resistencias iniciales.

4.3.2.2 Procedimiento

El procedimiento para producir concreto liviano estructural con agregados livianos del sur de Bogotá (ALISUR), se basó en los siguientes aspectos:

1. Se realizaron mezclas pruebas, tal como se explica en el numeral 3.5: Diseños de Mezclas de Concreto Liviano Estructural, para determinar la influencia del agregado del sur de Bogotá en el concreto liviano.
2. Se tomó como base la metodología propuesta por la ACI-211.2. para la dosificación de mezclas, debido a que es un procedimiento fácil de elaborar y por el grado de reconocimiento que tiene entre la comunidad académica.
3. En vista de los problemas de manejabilidad que se presentaron con las mezclas de concreto con ALIVEN, se decidió utilizar un aditivo plastificante (Plastol 6000 de Toxement¹⁵), con el único objeto de mejorar la trabajabilidad.
4. Se adoptó el realizar tres mezclas de prueba. Estas mezclas se basaron en la experiencia obtenida con ALIVEN, por lo que se optó por tomar las relaciones a/mc con las cuales se fabricó Concreto Liviano con ALIVEN. En vista, de que el agregado colombiano obtenido tiene una mejor resistencia que el agregado patrón, se decidió tomar las relaciones a/mc para las resistencias especificadas de 15, 18 y 21 MPa, de la Tabla 4.5, y los siguientes valores de relación a/mc: 0.77, 0.65 y 0.59, respectivamente.
5. Para cada mezcla de prueba, se elaboraron dos cilindros, uno para medir su resistencia a la compresión y el otro para medir la masa unitaria.
6. Los cilindros se ensayaron a la edad de 7 días. El cilindro de resistencia, se ensayó después de siete días de curado por inmersión en agua, por lo cual se probó húmedo. El cilindro destinado a masa unitaria, tuvo un curado por inmersión en agua por tres días y posteriormente se secó en un horno a 110°C por el tiempo restante. Adicionalmente, el cilindro en estado seco, se ensayó a compresión.
7. Con los resultados de los cilindros de Densidad –secos- se obtuvo una gráfica que relaciona Resistencia a la Compresión vs. Densidad.
8. Con los resultados de los cilindros ensayados para resistencia a la compresión –húmedos- se obtuvo una gráfica que relaciona Resistencia a la Compresión vs. Relación a/mc.

¹⁵ Se utilizó un porcentaje de 0.5% en peso de cemento.

A continuación se muestran las dosificaciones empleadas para las mezclas de prueba de Concretos Livianos con ALISUR:

Ingrediente	Peso humedo
	kg
Cemento	340
Agua	200
Contenido de aire	0
Agregado grueso liviano	804
Agregado fino	679
Plastificante, mL	97
TOTAL	2024

Tabla 4.6. Diseño de mezcla prueba para relación a/mc de 0.59.

Ingrediente	Peso humedo
	kg
Cemento	261
Agua	194
Contenido de aire	0
Agregado grueso liviano	804
Agregado fino	764
Plastificante, mL	75
TOTAL	2024

Tabla 4.7. Diseño de mezcla prueba para relación a/mc de 0.77.

Una vez realizados los pasos anteriores, se obtuvieron los siguientes resultados:

RESULTADOS ENSAYOS PRUEBA DE ARCILLAS DEL SUR DE BOGOTA, A LOS 7 DIAS									
IDENTIFICACION	Relación a/mc	Asent, cm	ESTADO PROBETA	FUERZA Kg	PESO g	DIAMETRO m	ALTURA m	RESISTENCIA Mpa	DENSIDAD Kg/m ³
ASP15	0.77	15	Húmedo	35880		0.153	0.303	19.52	
			Seco	43080	10384	0.153	0.303	23.43	1864.01
ASP18	0.65	18	Húmedo	21930		0.153	0.305	11.93	
			Seco	27680	9307	0.153	0.305	15.06	1659.73
ASP21	0.59	20	Húmedo	62270		0.153	0.303	33.87	
			Seco	76680	11063	0.156	0.303	40.12	1910.25

Tabla 4.8. Resultados de las mezclas pruebas.

De los resultados se observa, que la mezcla identificada como ASP18, que tiene una relación a/mc de 0.65, presenta valores muy atípicos, posiblemente por dificultades presentadas en su fabricación, por lo que sus valores no se utilizaron. Estas curvas se obtuvieron con los datos de las mezclas ASP15 y ASP21, con relaciones a/mc de 0.77 y 0.59, respectivamente.

Cabe resaltar que la diferencia entre las resistencias obtenidas por los cilindros en estado seco y húmedo se debe a que los cilindros en estado húmedo tienden a generar presiones internas, debido al agua que permanece en su interior, por lo que deben presentar menor resistencia, como efectivamente sucedió. A continuación las curvas: Resistencia a la Compresión vs. Densidad y Resistencia a la Compresión vs. Relación a/mc.

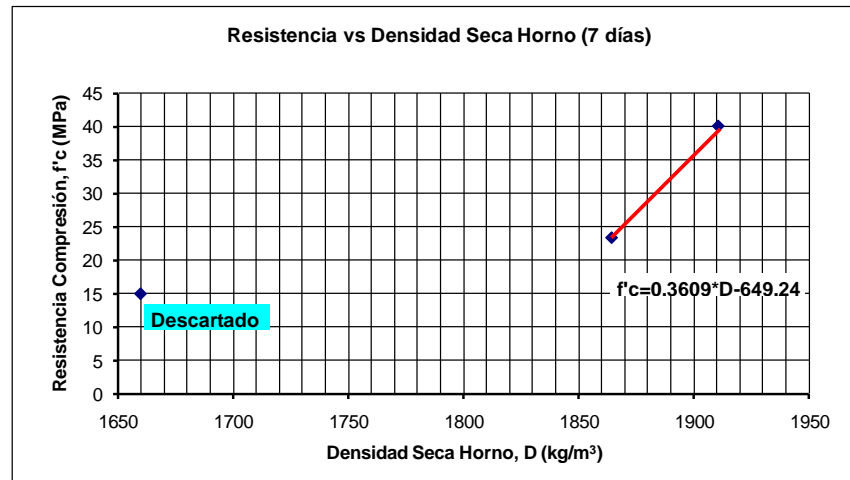


Figura 4.47. Gráfica de mezcla prueba: Resistencia Compresión vs Densidad a los 7 días.

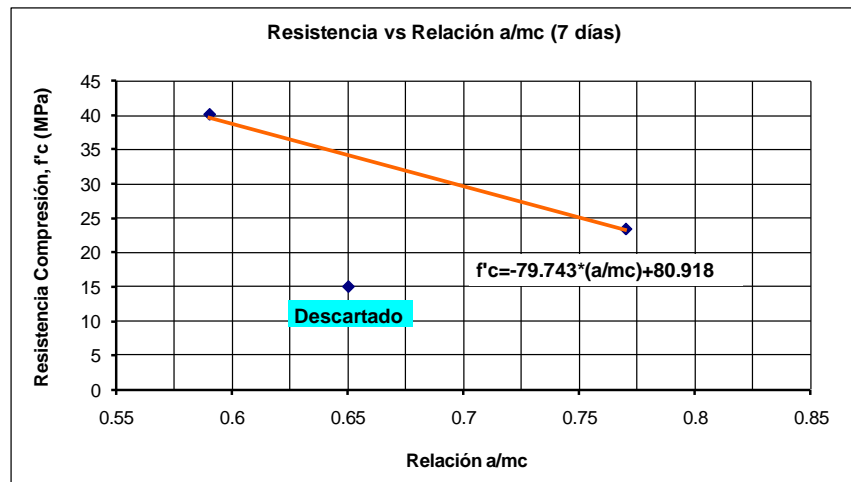


Figura 4.48. Gráfica de mezcla prueba: Resistencia Compresión vs. Relación a/mc a los 7 días.

De las gráficas anteriores, se procede a linealizar las funciones, por lo que para la relación Resistencia a la Compresión ($f'c$) vs. Densidad (D), se encuentra que:

$$f'c = 0.30609 * D - 649.24 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Y para la relación Resistencia a la Compresión ($f'c$) vs. Relación a/mc (A/C):

$$f'c = -79.743 * (A/C) + 80.918 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Como se observa de los anteriores resultados, las resistencias de los concretos livianos fabricados con ALIVEN, son muy inferiores a la de los concretos livianos fabricados con ALISUR, para una misma relación a/mc. Se procede entonces a determinar las relaciones a/mc, que permitan diseñar mezclas de Concreto Liviano Estructural para resistencias mínimas a los 28 días de 21 MPa y 28 MPa. De acuerdo con los anteriores resultados, se

propusieron dos mezclas definitivas de concreto liviano estructural, basados en los siguientes criterios:

- En vista de que se encuentran resistencias a la compresión adecuadas para relaciones a/mc altas, los diseños de mezclas tienen que orientarse para obtener las densidades especificadas.
- De acuerdo con las linealizaciones obtenidas de la Figura 4.47 y de la Figura 4.48, para alcanzar una densidad de 1850 kg/m³, se obtiene una resistencia a la compresión de 18.4 MPa a los siete días y una relación a/mc de 0.78. Si se desea conseguir una densidad de 1860 kg/m³, se debe obtener una resistencia a la compresión de 22.0 MPa a los siete días, para una relación a/mc de 0.74.
- Sabiendo, que las resistencias reales a los 28 días tienen que ser mayores que las especificadas, se procede a tomar menores relaciones de a/mc, obteniéndose las resistencias programadas a los siete días por lo que a los 28 días presentaran una mayor resistencia. En vista de los anteriores conceptos, se tomaron relaciones a/mc de 0.72 y 0.77, para producir concretos livianos con resistencias de por lo menos 28 y 21 MPa, respectivamente.
- Se realizaron los diseños de mezcla basándose en la metodología propuesta por la ACI-211.2.
- Para las mezclas definitivas no se incluyeron los plastificantes, ya que se hizo una prueba adicional, en la cual se verificó que las relaciones a/mc tomadas, presentan una buena trabajabilidad por sí mismas.

Ingrediente	Peso humedo
	kg
Cemento	279
Agua	206
Contenido de aire	0
Agregado grueso liviano	804
Agregado fino	734
TOTAL	2024

Tabla 4.9. Diseño de mezcla definitiva para relación a/mc de 0.72.

Ingrediente	Peso humedo
	kg
Cemento	261
Agua	213
Contenido de aire	0
Agregado grueso liviano	804
Agregado fino	746
TOTAL	2024

Tabla 4.10. Diseño de mezcla definitiva para relación a/mc de 0.77.

Una vez fundidas las dos mezclas, se procedió a realizar los ensayos de compresión, tensión, módulo de Elasticidad, relación de Poisson, masa unitaria y absorción a los especímenes de concreto con ALISUR para las dos mezclas planteadas.



Figura 4.49. Ensayo de compresión de Concreto Liviano con ALISUR.



Figura 4.50. Ensayo de Tensión Indirecta de Concreto Liviano con ALISUR.



Figura 4.51. Superficie de falla de la probeta en el ensayo de Tracción indirecta.



Figura 4.52. Ensayo de Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson de Concreto Liviano con ALISUR.



Figura 4.53. Ensayo de Masa Unitaria de Concreto Liviano con ALISUR.



Figura 4.54. Ensayo de Absorción de Concreto Liviano con ALISUR.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se procede a presentar los resultados obtenidos de los procedimientos experimentales que se explicaron con detalle en el capítulo 4: Metodología de la investigación. Así mismo, en este apartado se realiza el análisis de resultados de las investigaciones objeto del presente trabajo.

Esta sección se divide en las tres partes de la investigación, que son las siguientes:

1. **Arcillas Expandidas Térmicamente del sur de la Sabana de Bogotá:** Se muestran los resultados y la explicación de la expansión de las arcillas seleccionadas para la presente investigación. Así mismo, se efectúa una comparación desde el punto de vista químico y mineralógico de las arcillas con y sin capacidad de expansión de forma natural por temperatura.
2. **Agregado Liviano:** Se enseñan los resultados de los ensayos referentes a los agregados. Estos estudios conciernen a: Granulometría, Masa Unitaria, Absorción y Factor de Gravedad Específica. Estos fueron aplicados a los agregados tipo ALIVEN, así como al árido tipo ALISUR.
3. **Concreto Liviano Estructural.** En esta parte, se muestran los resultados de las pruebas de concreto liviano referentes a: Resistencia a la compresión, Resistencia a la tensión, Absorción en frío, en caliente y porosidad, Ensayo de Masa Unitaria, Ensayo de Modulo de Elasticidad, Relación de Poisson y ensayo de asentamiento. Estos ensayos se les aplicaron tanto a las probetas de concreto hechas con ALIVEN, como a los especímenes hechos con ALISUR.

5.1 ARCILLAS EXPANDIDAS TÉRMICAMENTE DEL SUR DE LA SABANA DE BOGOTÁ

De acuerdo a lo explicado en el Capítulo 2: Marco Teórico de las Arcillas Expandidas Térmicamente y en el Capítulo 4: Metodología de la investigación, las 16 muestras de arcilla que se recolectaron en el sur de la sabana de Bogotá, fueron sometidas - inicialmente- a los ensayos de quema rápida a una temperatura de 1300°C.

De los resultados de este ensayo, se pudieron clasificar las muestras según si expandieron o no expandieron y con ese criterio se procedió a efectuar los ensayos químicos y mineralógicos para determinar las diferencias entre las arcillas con capacidad de expansión y aquellas sin capacidad de expansión. Los anteriores ensayos se les realizaron también a la arcilla de referencia 0, que corresponde a la arcilla en estado natural de ALIVEN y a la arcilla de referencia 13.4, la cual fue la que se utilizó como Agregado Liviano del Sur de la Sabana de Bogotá.

En la Tabla 5.1, se muestra la identificación de las arcillas de la presente investigación y la cantera o mina de las que fueron recolectadas.

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

Pto.	Identificación Muestra	Localización	Mina o Cantera
1	7.1	Soacha	Mina Pantoja - Ladrillera Santafe Lote 60
2	7.2	Soacha	Mina Pantoja - Ladrillera Santafe Lote 60
3	7.3	Soacha	Mina Pantoja - Ladrillera Santafe Lote 60
4	9.1	San Cristóbal	Ladrillera Monte Bello
5	13.1	Soacha	Pantoja - Ladrillera Landa
6	13.2	Soacha	Pantoja - Ladrillera Landa
7	13.3	Soacha	Pantoja - Ladrillera Landa
8	14.1	San Cristóbal	El tabor - Ramajal
9	15	San Cristóbal	Vía Ladrillera la Carolina
10	16.1	San Cristóbal	San Jeronimo del Yuste, muestra parque
11	16.2	San Cristóbal	San Jeronimo del Yuste, conjunto Compensar
12	16.3	San Cristóbal	San Jeronimo del Yuste, conjunto Compensar
13	16.4	San Cristóbal	San Jeronimo del Yuste, conjunto Compensar
14	17.2	Mochuelos	Mochuelos
15	18.2	Mochuelos	Mochuelos
16	19.2	Mochuelos	Mochuelos

Tabla 5.1. Identificación y localización de las arcillas del sur de la Sabana de Bogotá.

5.1.1 Pruebas de expansión

A las 16 muestras recolectadas, se les realizó el ensayo de quema rápida en un horno estático a 1300°C, de acuerdo con el procedimiento descrito en la Metodología de la investigación. Las esferas de cada muestra se moldearon de tal manera que fueran aproximadamente iguales y posteriormente se les midió 3 veces el diámetro antes y después de la quema, dando los resultados que se muestran en seguida:

No.	Identificación Muestra	Cantidad	Diámetro Promedio antes quema	Diámetro Promedio Después quema	Diferencia Promedios	Porcentaje Expansión	Conclusión
			mm	mm	mm	%	
1	7.1	1	10.1	10.6	0.53	17%	Expandió
2	7.2	1	9.8	10.7	0.90	30%	Expandió
3	7.3	1	10.6	10.7	0.10	3%	Expandió
4	9.1	1	10.3	11.1	0.75	23%	Expandió
5	13.1	1	9.4	10.6	1.23	45%	Expandió
6	13.2	1	10.0	10.8	0.87	28%	Expandió
7	13.3	1	11.0	13.6	2.58	88%	Expandió
8	14.1	1	9.7	9.8	0.12	4%	Expandió
9	15	1	11.4	12.0	0.62	17%	Expandió
10	16.1	1	10.0	10.6	0.60	19%	Expandió
11	16.2	1	10.1	9.6	-0.55	-15%	Se contrajo
12	16.3	1	10.6	11.4	0.73	22%	Expandió
13	16.4	1	10.0	10.2	0.23	7%	Expandió
14	17.2	1	11.7	10.7	-1.00	-24%	Se contrajo
15	18.2	1	11.7	11.5	-0.23	-6%	Se contrajo
16	19.2	1	9.2	7.8	-1.37	-38%	Se contrajo

Tabla 5.2. Resultados de expansión por quema rápida de las muestras del sur de la Sabana de Bogotá.

De los resultados de la Tabla 5.2, se aprecia que la mayoría de muestras presentaron alguna expansión, a excepción de las muestras correspondientes a la zona de mochuelos

de identificación 17.2, 18.2 y 19.2; y a la 16.2 localizada en San Cristóbal. La explicación de esta contracción estaría relacionada con la composición mineralógica de las arcillas. De esa misma forma, se ve de la Figura 5.1 como las muestras que presentaron la mayor expansión correspondieron a las localizadas en la mina Pantoja del municipio de Soacha, que tienen referencias 13.1 y 13.3, para un porcentaje de expansión de 45% y 88%, respectivamente.

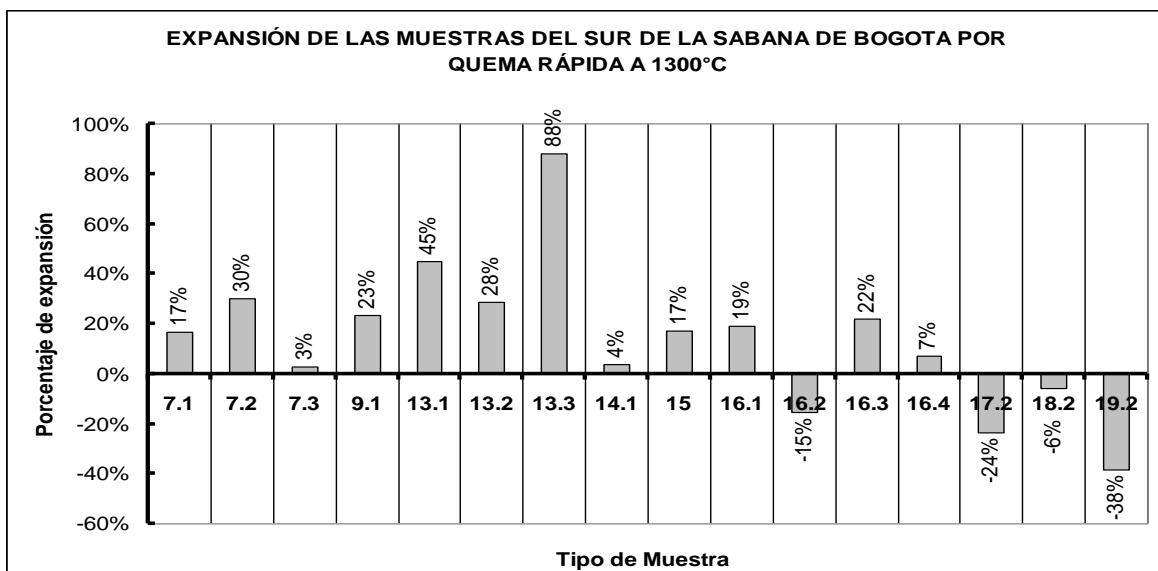


Figura 5.1. Porcentajes de expansión de las arcillas con quema rápida a 1300°C.

Tomando las arcillas de referencia 13.1, 13.3 y una adicional que corresponde a la arcilla en estado natural con la que se fabrica el ALIVEN, que se va a llamar como AL NAT, se procede a realizar ensayos de quema rápida a temperaturas de 1200°C y 1150°C y de quema lenta a 1300°C, dando como resultado la tabla siguiente:

MUESTRA	QUEMA RÁPIDA			QUEMA LENTA
	Rápida a 1300°C	Rápida a 1200°C	Rápida a 1150°C	Lenta a 1300°C
13.1	45%	17%	4%	39%
13.3	88%	37%	10%	79%
0	-	46%	21%	-

Tabla 5.3. Resultados de porcentaje de expansión por quema rápida y lenta de las arcillas 13.1, 13.3 y 0 a diferentes temperaturas.

Los resultados de la Tabla 5.3, evidencian que la temperatura ideal de cocción de las arcillas para garantizar la máxima expansión corresponde a 1300°C; igualmente, indican que el procedimiento de quema más adecuado corresponde a la quema rápida a la mencionada temperatura, ya que presenta unos valores de expansión un poco superiores a los registrados en el procedimiento de quema lenta a esa misma temperatura. Igualmente, en el caso de la arcilla 0, no se tuvieron resultados de expansión a quema rápida ni lenta para la temperatura de 1300°C, debido a que la arcilla se desintegró, evidenciando que su punto de fusión está por debajo de 1300°C, lo que explica el porqué

en las plantas de ALIVEN, expanden esta arcilla hasta temperatura máxima de 1200°C. Todos los anteriores resultados se observan de forma más clara en la Figura 5.2.

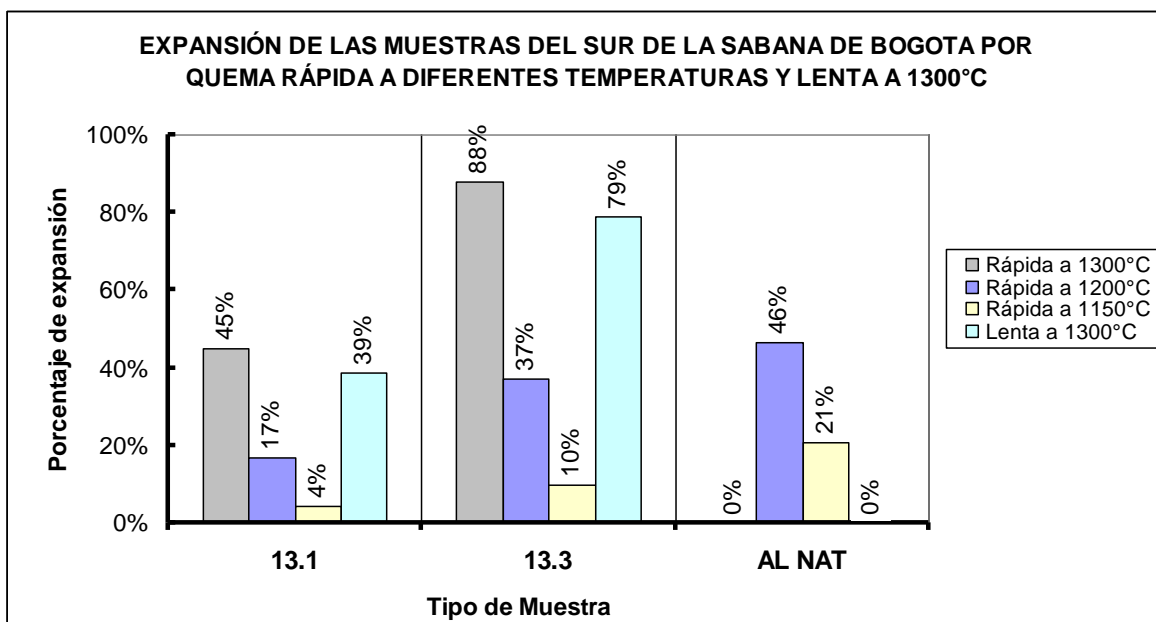


Figura 5.2. Expansión de las muestras del sur de la Sabana de Bogotá por quema rápida a diferentes temperaturas y quema lenta a 1300°C.

Finalmente, sabiendo que la arcilla 13.3 es la que presenta mayor expansión para un procedimiento de quema rápida a 1300°C, surge el interrogante de que tanto cambia la expansión con respecto al tamaño inicial del agregado y por lo tanto, se realizó una quema adicional con 3 muestras de arcilla 13.3, las cuales presentaban diferentes diámetros iniciales y que se denominaron como pequeña, media y grande. Los resultados de expansión se muestran en la siguiente tabla:

No.	Identificación Muestra	Diámetro Promedio antes quema	Diámetro Promedio Después quema	Diferencia Promedios	Porcentaje Expansión	Conclusión
		mm	mm			
1	13.3 Pequeña	8.5	10.1	1.57	66%	Expandió
2	13.3 Media	12.5	14.8	2.30	66%	Expandió
3	13.3 Grande	14.3	16.3	2.00	48%	Expandió

Tabla 5.4. Resultados de porcentaje de expansión por quema rápida de las arcillas de referencia 13.3 para diferentes diámetros iniciales.

La última prueba de expansión evidencia, que el agregado de arcilla 13.3, expande en mayor porcentaje para tamaños iniciales menores a 12.5 mm, a pesar de que la expansión fue menor del 88% inicial registrado en la Tabla 5.4; a tamaños mayores expande en una menor proporción. En vista de lo anterior, la arcilla resultante del tratamiento de quema rápida aplicado a la arcilla de referencia 13.3 –que es la que presenta mayor expansión– a una temperatura de 1300°C, es lo que se denomina Agregado Liviano del Sur de la Sabana de Bogotá (ALISUR).

5.1.2 Comparación de la arcilla 13.3 con ALIVEN



Figura 5.3. Comparación de la arcilla de referencia 13.3 antes y después de la quema con ALIVEN.

En este apartado se procede a comparar el aspecto de la arcilla de referencia 13.3, la cual es la que se va a utilizar como agregado liviano para las mezclas de concreto, con una arcilla expandida térmicamente como es el caso del Agregado Liviano de Venezuela (ALIVEN).

De la Figura 5.3, se observa el aspecto de la arcilla 13.3 antes y después de aplicarle el procedimiento de quema rápida a 1300°C. Se identifica como la arcilla después de la quema, presenta poros en su superficie, que son evidencia del escape de los gases internos que se producen en la arcilla producto del tratamiento térmico y que producen su expansión. Así mismo, se evidencia un cambio en la superficie del agregado, pasando de tener una superficie de color amarilla a una superficie más brillante y vitrificada, tal como explica la sección 2.2 del presente texto.

Con respecto al ALIVEN, se observa como este no tiene una superficie brillante, pero presenta una superficie sellada, donde resaltan la presencia de algunos poros, que dan evidencia de ser un agregado absorbente y poroso.



Figura 5.4. Interior arcilla de referencia 13.3 e interior de ALIVEN.

Para estudiar con mayor profundidad las diferencias entre la arcilla 13.3 expandida y el ALIVEN, se procede a comparar ambos agregados tanto externa como internamente, desde un punto visual. Lo anterior se muestra en la Figura 5.4.

De la Figura 5.4, se sacan las siguientes consideraciones:

- Las superficies externas del ALIVEN y de la arcilla 13.3, son muy distintas. La primera es opaca, mientras que la segunda es brillante, aunque ambas, en general, presentan una forma aproximadamente esférica.
- El interior tanto de ALIVEN como de la arcilla 13.3, evidencia la formación de gases internos que ocasionaron la expansión de ambas arcillas. Prueba de ésto, corresponde a que ambos agregados presentaron poros no conectados en su interior.
- El agregado ALIVEN, manifiesta un interior de color negro calcinado con gran porosidad y una superficie color marrón, tal y como lo predice el apartado 2.2 del presente texto.
- El agregado 13.3, presenta en su interior un color marrón brillante muy parecido al externo. Así mismo, muestra una gran porosidad interior, con poros de mayor tamaño que ALIVEN, pero una superficie cerrada vitrificada, cumpliendo los lineamientos teóricos de las Arcillas Expandidas Térmicamente.

Finalmente, al hacer una prueba de resistencia al agregado por impacto de martillo, fue evidente que los agregados de ALIVEN, se rompieron con mucha más facilidad que los de la arcilla 13.3, por lo que se puede concluir que los agregados resultantes de esta arcilla tendrán una mayor resistencia propia que los agregados de ALIVEN.

5.1.3 Ensayos Químicos

En esta sección, se muestran los resultados de los ensayos químicos aplicados a las arcillas que tuvieron la mayor expansión, 13.1 y 13.3, a la muestra de la arcilla en estado natural con la cual se fabrica el ALIVEN, de referencia 0 y a la arcilla de referencia 13.4, que corresponde a la arcilla final con la cual se fabricó el ALISUR. En la Tabla 5.5, se enseña la composición química de las mencionadas arcillas, las cuales fueron tratadas en los laboratorios de INGEOMINAS:

Identificación de las arcillas	Símbolo	COMPOSICION QUIMICA DE LAS ARCILLAS DEL SUR DE BOGOTA, % en masa									
		% SiO ₂	% CaO	% Fe ₂ O ₃	% Al ₂ O ₃	% TiO ₂	% Na ₂ O	% K ₂ O	% MgO	% Pérdidas por calcinación	% TOTAL
13.1	●	63.62	0.58	6.49	15.68	0.57	0.28	1.5	1.62	6.38	96.72
13.3	▲	65.22	2.65	4.23	15.06	0.79	0.24	1.29	0.92	7.45	97.85
0*	+	55.58	6.62	6.9	13.45	0.81	0.67	1.47	2.16	9.49	97.15
13.4**	◆	63.43	0.36	5.42	18	0.87	0.23	1.53	1.05	6.87	97.76

* Corresponde a la arcilla en estado natural de ALIVEN.

** Corresponde a la arcilla del sur de Bogotá utilizada como agregado liviano.

Tabla 5.5. Composición química de las arcillas seleccionadas del sur de la sabana de Bogotá y de la arcilla de ALIVEN.

Posteriormente, se procede a ubicar cada una de las muestras de arcilla, en el diagrama de Riley:

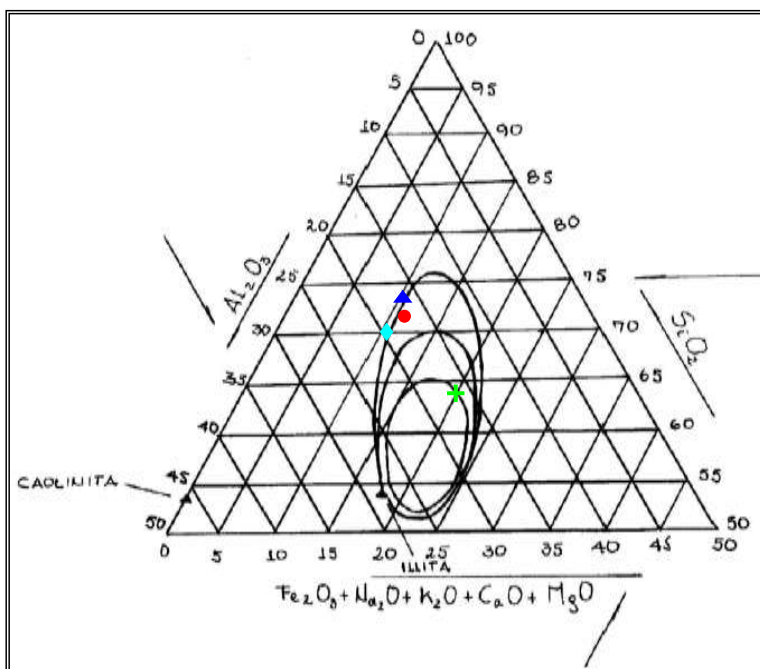


Figura 5.5. Diagrama de Riley con las arcillas del sur de Bogotá.

De la Figura 5.5, se observa que las 4 muestras de arcilla están dentro de la zona de expansión promulgada por Riley. Teóricamente, la arcilla de referencia 0, que pertenece a ALIVEN, es la que tiene más probabilidades de expandir debido a que está en la mayor zona de expansión.

De la misma forma, se ve como las muestras 13.1, 13.3 y 13.4, tienen una composición química parecida, que se evidencia de su cercanía en el diagrama de Riley, localizándose en el límite de la zona de expansión. En vista de lo anterior, se procede a comparar los resultados de la composición química de las arcillas con las ideales, recomendadas por diferentes autores y que se mencionaron en el apartado 2.2.4.1.

COMPUESTO QUÍMICO	CRITERIOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA LA ARCILLA 13.1			CRITERIOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA LA ARCILLA 13.3			CRITERIOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA LA ARCILLA 0			CRITERIOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA LA ARCILLA 13.4		
	W. Kalb & E. Wilhelm	Solovieva	Arlita	W. Kalb & E. Wilhelm	Solovieva	Arlita	W. Kalb & E. Wilhelm	Solovieva	Arlita	W. Kalb & E. Wilhelm	Solovieva	Arlita
% SiO ₂	OK	OK	OK	OK	No cumple	No cumple	OK	OK	OK	No cumple	OK	OK
% CaO	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	OK	OK	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
% Fe ₂ O ₃	OK	OK	No cumple	OK	No cumple	No cumple	OK	OK	No cumple	No cumple	OK	No cumple
% Al ₂ O ₃	OK	No cumple	OK	OK	No cumple	OK	OK	No cumple	OK	No cumple	OK	OK
% TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
% Na ₂ O	No cumple	No cumple	-	No cumple	No cumple	-	No cumple	No cumple	-	No cumple	No cumple	-
% K ₂ O	No cumple	No cumple	-	No cumple	No cumple	-	No cumple	No cumple	-	No cumple	No cumple	-
% MgO	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
% SO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
% S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Per. Calcínación	OK	OK	-	OK	OK	-	OK	No cumple	-	No cumple	OK	-

Tabla 5.6. Comparación de la composición química de las arcillas de la investigación con las recomendadas por Kalb, Solovieva y Arlita.

De la anterior tabla, se observa como ninguna de las arcillas cumple exactamente con los requisitos químicos mencionados, aunque casi todas cumplen con estos requisitos para los componentes químicos mayoritarios en las arcillas, es decir: SiO_2 , Fe_2O_3 y Al_2O_3 .

En general, se observó que la composición química de las arcillas 13.1, 13.3 y 13.4, muestran que las arcillas si tienen capacidad de expansión, la cual se podría incrementar al adicionar agentes promotores de la expansión como los explicados en la sección 2.2.5. En cuanto a la arcilla de ALIVEN (ref 0), se puede afirmar que tiene una composición química que indica una capacidad de expansión de forma natural, la cual industrialmente se aumenta con el proceso de fabricación con la que se produce, como es la adición de aceite quemado.

5.1.4 Ensayos Mineralógicos

Como se explicó en el apartado 2.2.4.2, la expansión de las arcillas se debe a los componentes mineralógicos de estas. Con base a lo anterior, se decidió estudiar los siguientes tipos de arcillas: 7.3, 15, 13.3, 19.2, 0 y 13.4, entre las cuales hay arcillas con y sin capacidad de expansión, según lo probado experimentalmente en la sección 5.1.1. A estas arcillas se les realizó el ensayo de difracción por rayos X, en los laboratorios de INGEOMINAS, y cuyos resultados se determinaron por medio de la máquina X-Pert de esa entidad.

En general, a las arcillas mencionadas se les realizó el siguiente procedimiento:

1. Inicialmente, se sometieron a un análisis de polvo desorientado. La muestra se irradia en el difractómetro con una radiación X que incide sobre los cristales dispuestos al azar, es decir, sin ninguna orientación preferencial. Esto permite obtener los picos de difracción característicos de cada mineral con cantidades proporcionales al contenido en la muestra.
2. A continuación, se realizó el análisis de la fracción arcilla en lámina orientada, con el objeto de determinar con mayor exactitud los minerales arcillosos que componen a la arcilla. En la lámina, los cristales de arcilla sedimentan a partir de una suspensión que contiene la fracción $<2\mu$, con las superficies paralelas al soporte, de esta manera se intensifican las señales. Los cuales se localizan en la parte inicial del difractograma de polvo desorientado.

En la Figura 5.6 se enseña un ejemplar de los difractogramas de ambos procedimientos para la arcilla de referencia 0. A continuación se procede a realizar una muestra de cálculo con los resultados de los difractogramas de esa arcilla:

1. El primer difractograma corresponde al de polvos no orientados, en el cual se muestran todos los minerales que componen la arcilla.

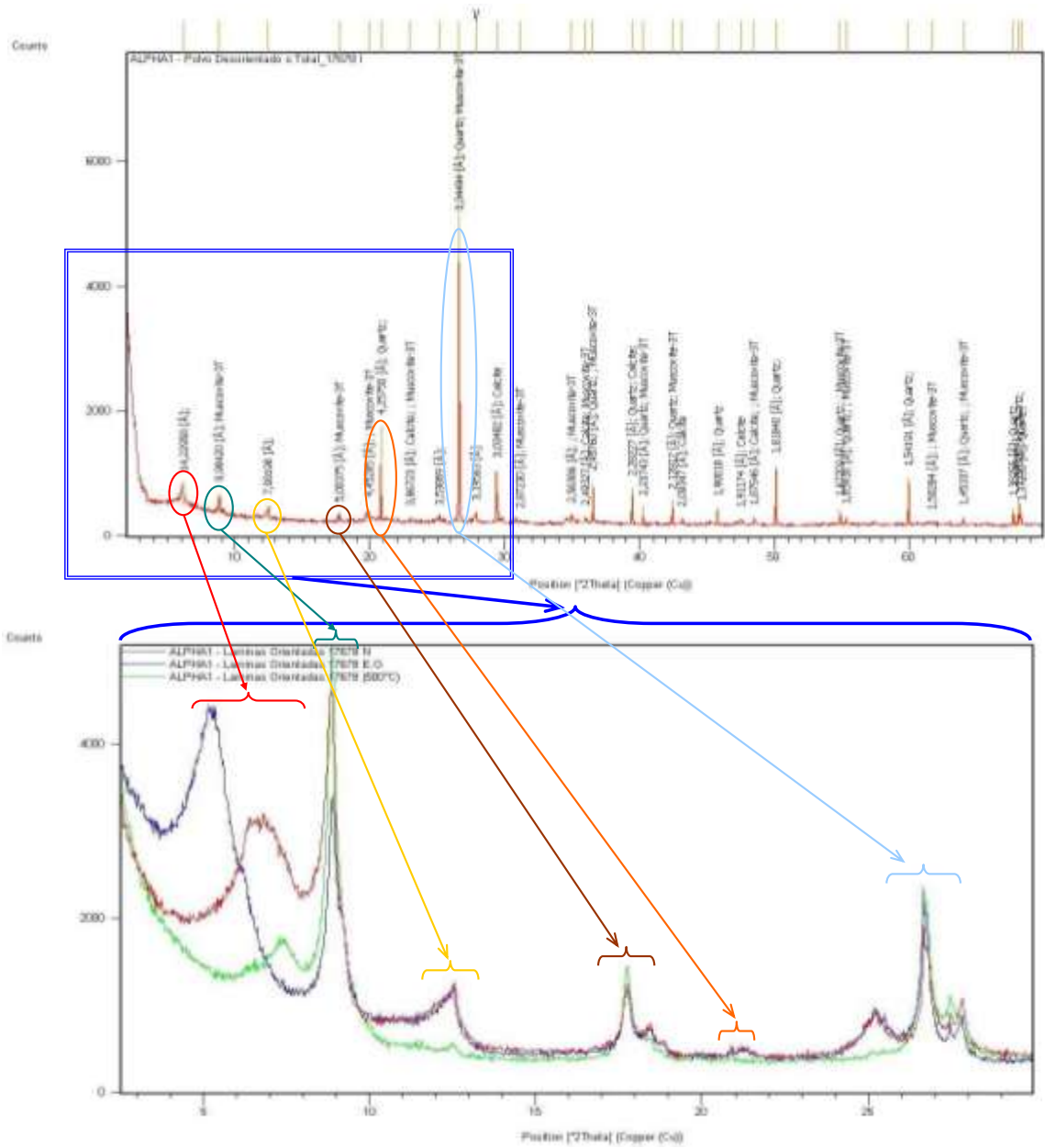


Figura 5.6. Difractogramas de análisis de polvo no orientado y de lámina orientada para la arcilla 13.3.

2. Los minerales arcillosos son aquellos que tienen un tamaño menor a 2μ , por lo que se necesita un estudio con mayor profundidad de estos minerales. Este estudio corresponde al difractograma de láminas orientadas, que es la ampliación del difractograma de polvos no orientados.
3. El difractograma de láminas orientadas corresponde a 3 procedimientos: natural (curva roja), Etilen-Glicol (curva azul) y Quemado a 500°C (curva verde). Posteriormente con la localización y la intensidad de cada pico del difractograma y basándose en la base de datos que se encuentra en el programa X-Pert, se procede a determinar los minerales de la arcilla. Así mismo, el programa da una idea aproximada de la proporción relativa de cada mineral.

En general, la interpretación de los resultados de los anteriores difractogramas es bastante dispendiosa, por lo que se pidió asesoría a un experto en mineralogía, profesor Sergio Gaviria del departamento de Geociencias de la Universidad Nacional, obteniéndose la interpretación resumida de los difractogramas en la Tabla 5.7.

Identificación de la Muestra	Capacidad de Expansión	Interestratificado de la arcilla		Cantidad de los Minerales de la arcilla				
		Distancia (A°)	Cantidad	Caolinita	Ilita o Mica	Vermiculita	Clorita	Dikita
7.3	NO	10-12	Abundante	Bien Cristalizada, Abundante	Medio o Común	-	-	Escasa
15	SI	10-12	Escaso	Bien Cristalizada, Abundante	Abundante	-	Medio o Común	-
13.3	SI	10-14	Abundante	Abundante	Medio o Común	Medio o Común	-	-
19.2	SI	10-14, Esméctítico	Medio a Bajo	Bien Cristalizada, Muy Abundante	Medio o Común	-	-	-
0	SI	10-14, Esméctítico	-	Mal Cristalizada	Muy Abundante	-	-	-
13.4	NO	10-12, Esméctítico	Abundante	Abundante	Escasa	-	-	-

Tabla 5.7. Resultados del análisis mineralógico a las arcillas del sur de Bogotá.

Referente a la proporción de los minerales en la arcilla, la ref [70] indica que: “*la semicuantificación de la abundancia relativa de los minerales interpretados en los polvos no orientados se desarrolla por medios comparativos de la intensidad y recurrencia de los picos principales de los minerales, de esta manera, se emplean los términos Muy Abundante para la aparición de una especie mineral que supere el 50%, Abundante entre 30 y 50%, Común entre el 10 y 30%, Escaso entre el 5 y 10% y muy escaso entre el 1 y 5%*”.

De la Tabla 5.7, se aprecian los minerales principales de las arcillas estudiadas y que corresponden en su gran mayoría a caolinita e ilita. Se observa que la arcilla 13.3 presenta vermiculita, mineral que tiene la característica de expandir según lo visto en el apartado 2.2.4.2.

En general, la explicación de la expansión de las arcillas desde el punto de vista mineralógico, se basa en los siguientes aspectos:

- Tienen algún mineral arcilloso con capacidad de expansión, como es el caso de la esmética o la vermiculita.
- Tienen un interestratificado esmectítico.
- No hay una predominancia muy alta de minerales que no tienen expansión sobre los que si tienen expansión.

De acuerdo con lo anterior, la explicación para que la arcilla 13.3 expandiera, radicaría en el hecho de que tiene el mineral vermiculita, a excepción de las otras arcillas las cuales no lo poseen. Las arcillas 19.2 y 0, tienen interestratificado esmectítico, por lo que tienen capacidad de hinchamiento.

La arcilla 7.3 y 15 no tienen minerales arcillosos con características de expansión y tampoco tienen interestratificado esmectítico, por lo que explicaría la no expansión de la arcilla 7.3 y la poca expansión de la arcilla de referencia 15. En el caso de la arcilla 13.4, hay una presencia bastante alta del mineral caolinita que revelaría el hecho de que esta muestra tuviera escasa capacidad de hinchamiento, a pesar de que tenga un interestratificado esmectítico.

Es interesante notar como la arcilla de referencia 13.4, con la cual se fabricó el ALISUR y que se tomó en la misma cantera de la arcilla de referencia 13.3, varía sustancialmente con respecto a la parte mineralógica y química. La arcilla 13.4, no tiene vermiculita, por lo cual deberá tener una capacidad de expansión natural inferior a la arcilla 13.3.

Los restantes difractogramas tanto en polvo desorientado como en lámina orientada, se pueden consultar en los anexos. Véase *Anexo F*.

5.2 AGREGADOS LIVIANOS

En este apartado se proceden a mostrar y explicar los resultados referentes a los agregados tratados en el proyecto de investigación, es decir el ALIVEN y el ALISUR. Estos dos tipos de agregados se subdividieron en varias clases, con el objeto de estudiar cada uno de los ensayos por individual. Estas clases son:

1. **ALIVEN FINO:** Arcilla venezolana calcinada con tamaño de partículas de 5mm a 10mm.
2. **ALISUR FINO:** Arcilla calcinada del Sur de la Sabana de Bogotá con tamaño de partículas de 5mm a 10mm.
3. **ALIVEN MEDIO:** Arcilla venezolana calcinada con tamaño de partículas de 10mm a 14mm.
4. **ALISUR MEDIO:** Arcilla calcinada del Sur de la Sabana de Bogotá con tamaño de partículas de 5mm a 10mm.
5. **ALIVEN COMBINADO:** Masa de agregados compuesta por un 60% del tamaño fino de ALIVEN y un 40% de tamaño medio de ALIVEN.
6. **ALISUR COMBINADO:** Masa de agregados compuesta por un 60% del tamaño fino de ALISUR y un 40% de tamaño medio de ALISUR.

A cada uno de estos diferentes tipos de agregados, se les procedió a realizar varios ensayos que se muestran a continuación:

5.2.1 Granulometría

Este ensayo se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana, NTC 4045: "Agregados Livianos para Concreto Estructural". Los resultados de la prueba de gradación para el ALIVEN y el ALISUR fino, con la comparación con los requerimientos de la NTC 4045, se muestran en seguida:

Tamiz Pulg (mm)	GRANULOMETRIA DEL ALIVEN FINO				GRANULOMETRIA DEL ALISUR FINO				REQUISITOS NTC 4045			
	Peso mat. Retenido en tamiz, g	% Retenido acumulado en tamiz	Peso material pasa tamiz, g	% Pasa tamiz	Peso mat. Retenido en tamiz, g	% Retenido acumulado en tamiz	Peso material que pasa tamiz, g	% Pasa tamiz	Porcentaje que pasa, 4.75mm - 12.5mm		Porcentaje que pasa, 2.36mm - 9.50mm	
									Tamiz 12.5 mm	Tamiz 4.75 mm	Tamiz 9.5 mm	Tamiz 2.36 mm
1" (25.4)	0	0.0%	992	100.0%	0	0.0%	2000	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3/4" (19.05)	0	0.0%	992	100.0%	0	0.0%	2000	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
1/2" (12.70)	9	0.9%	983	99.1%	0	0.0%	2000	100.0%	90.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3/8" (9.53)	38	3.8%	945	95.3%	5	0.3%	1995	99.8%	40.0%	80.0%	80.0%	100.0%
No. 4 (4.76)	732	73.8%	213	21.5%	1517	75.9%	478	23.9%	0.0%	20.0%	5.0%	40.0%
No. 8 (2.38)	212	21.4%	1	0.1%	476	23.8%	2	0.1%	0.0%	10.0%	0.0%	20.0%
Fondo	1	0.1%	0	0.0%	2	0.1%	0	0.0%	0.0%	10.0%	0.0%	20.0%
	992	100.0%			2000	100.0%						

DATOS ADICIONALES GRANULOMETRIA	Tamaño Máximo	3/4"	1/2"
	Tamaño Máximo Nominal	3/8"	3/8"

Tabla 5.8. Datos de Granulometría del agregado liviano de tamaño fino.

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

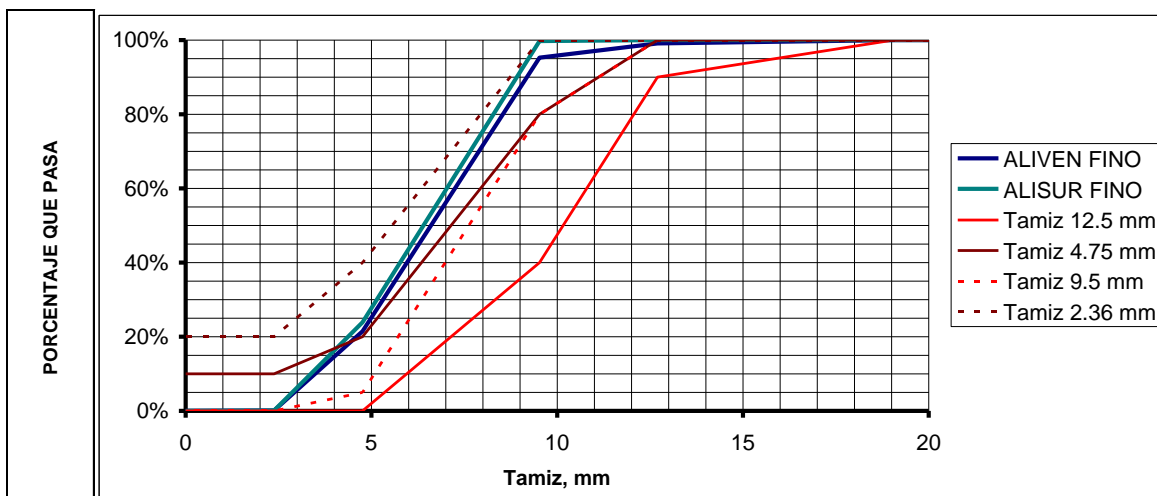


Figura 5.7. Granulometría del agregado liviano de tamaño fino.

Los resultados de la prueba de gradación para el ALIVEN y el ALISUR medio, con la comparación con los requerimientos de la NTC 4045, se muestran a continuación:

Tamiz Pulg (mm)	GRANULOMETRÍA DEL ALIVEN MEDIO				GRANULOMETRÍA DEL ALISUR MEDIO				REQUISITOS NTC 4045					
	Peso mat. Retenido en tamiz, g	% Retenido acumulado en tamiz	Peso material pasa tamiz, g	% Pasa tamiz	Peso mat. Retenido en tamiz, g	% Retenido acumulado en tamiz	Peso material que pasa tamiz, g	% Pasa tamiz	Porcentaje que pasa, 4.75mm - 12.5mm	Porcentaje que pasa, 2.36mm - 9.50mm	Tamiz 19mm	Tamiz 4.75 mm	Tamiz 12.5 mm	Tamiz 4.75 mm
1" (25.4)	0	0.0%	2151	100.0%	0	0.0%	2000	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3/4" (19.05)	5	0.2%	2146	99.8%	0	0.0%	2000	100.0%	90.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
1/2" (12.70)	633	29.4%	1513	70.3%	64	3.2%	1936	96.8%	36.0%	67.0%	90.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3/8" (9.53)	1084	50.4%	429	19.9%	1658	82.9%	278	13.9%	10.0%	50.0%	40.0%	80.0%	80.0%	80.0%
No. 4 (4.76)	204	9.5%	225	10.5%	275	13.8%	3	0.2%	0.0%	15.0%	0.0%	20.0%	20.0%	20.0%
No. 8 (2.38)	46	2.1%	179	8.3%	2	0.1%	1	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	10.0%
Fondo	179	8.3%	0	0.0%	1	0.1%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	2151	100.0%			2000	100.0%								

DATOS ADICIONALES GRANULOMETRÍA		Tamaño Máximo	1"	3/4"
		Tamaño Máximo Nominal	3/4"	1/2"

Tabla 5.9. Datos de Granulometría del agregado liviano de tamaño Medio.

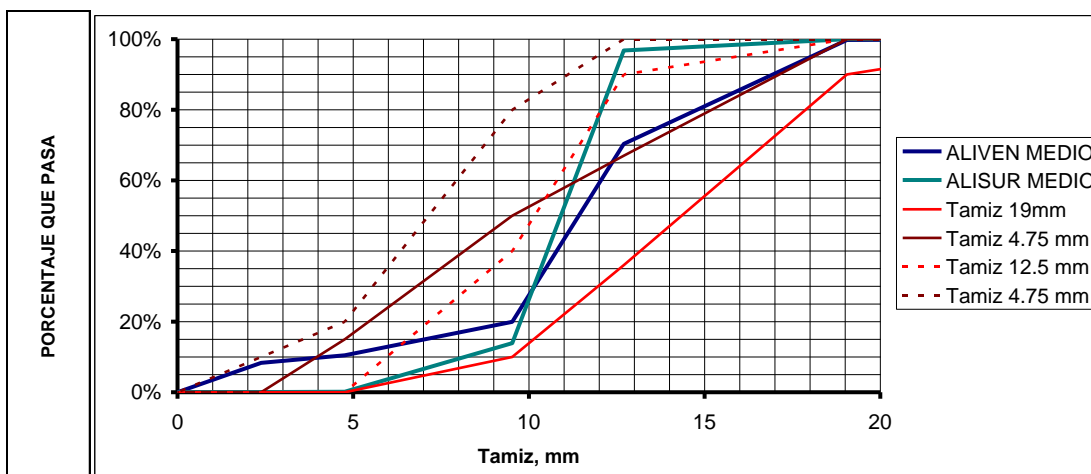


Figura 5.8. Granulometría del agregado liviano de tamaño medio.

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

Finalmente, los valores arrojados por el ensayo de granulometría para el ALIVEN y el ALISUR combinados, que fueron los tipos de agregados utilizados en la mezcla de concreto liviano con ALIVEN y ALISUR, respectivamente; mostraron el siguiente comportamiento:

Tamiz	ALIVEN FINO		ALIVEN MEDIO		100% de Aliven Combinado	ALISUR FINO		ALISUR MEDIO		100% de Alisur Combinado	REQUISITOS NTC 4045	
	% Pasa tamiz, 100%	60% de Aliven Fino	% Pasa tamiz, 100%	40% de Aliven Medio		% Pasa tamiz, 100%	60% de Alisur Fino	% Pasa tamiz, 100%	40% de Alisur Medio		Porcentaje que pasa, 4.75mm - 12.50mm	Limite 12.5 mm
Pulg (mm)												
1" (25.4)	100%	60%	100%	40%	100%	100%	60%	100%	40%	100%	100.0%	100.0%
3/4" (19.05)	100%	60%	100%	40%	100%	100%	60%	100%	40%	100%	100.0%	100.0%
1/2" (12.70)	99%	59%	70%	28%	88%	100%	60%	97%	39%	99%	90.0%	100.0%
3/8" (9.53)	95%	57%	20%	8%	65%	100%	60%	14%	6%	65%	40.0%	80.0%
No. 4 (4.76)	21%	13%	10%	4%	17%	24%	14%	0%	0%	14%	0.0%	20.0%
No. 8 (2.38)	0%	0%	8%	3%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0.0%	10.0%
Fondo	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.0%	0.0%

DATOS ADICIONALES GRANULOMETRIA		Tamaño Máximo	3/4"	3/4"
		Tamaño Máximo Nominal	1/2"	1/2"

Tabla 5.10. Datos de Granulometría del agregado liviano combinado.

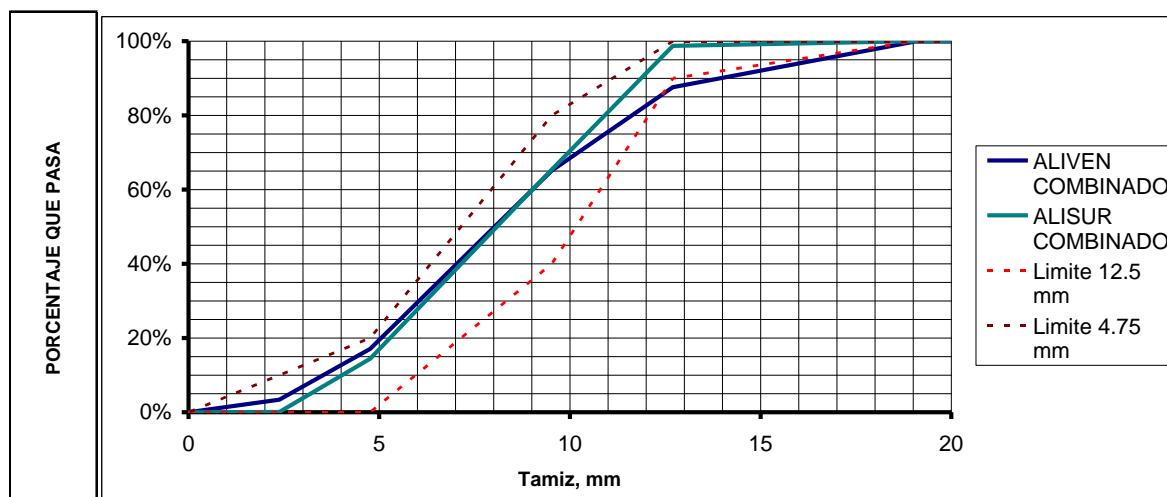


Figura 5.9. Granulometría del agregado liviano combinado.

De la Figura 5.9, se observa que las granulometrías de ALIVEN y ALISUR están dentro de los límites recomendados por la NTC 4045 para garantizar una adecuada gradación, por lo que se infiere que esta combinación de agregado fino con medio en un 60% y un 40%, respectivamente, es la adecuada para trabajar en la mezcla de concreto liviano. Así mismo, se hace evidente, que ambas mezclas tienen el mismo tamaño máximo (3/4") y el mismo tamaño nominal (1/2").

5.2.2 Masa Unitaria

Este ensayo se realizó de acuerdo con la Normas Técnicas Colombianas, NTC 92: "Determinación de la Masa Unitaria y los Vacíos entre Partículas de Agregados". En esta normativa se explica como calcular la masa unitaria suelta y compacta, por medio de la aplicación de los procedimientos de paleo y apisonamiento, respectivamente.

De la aplicación de estos procedimientos a los diferentes tipos de ALIVEN y ALISUR, se encontraron los siguientes resultados:

Tipo de Muestra	Masa Unitaria		
	Suelta	Compacta	NTC 4045
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
ALIVEN FINO	579	-	880
ALIVEN MEDIO	399	-	880
ALIVEN COMBINADO	506	-	880
ALISUR FINO	1082	1189	880
ALISUR MEDIO	1063	1168	880
ALISUR COMBINADO	1118	1183	880

Tabla 5.11. Datos de Masa Unitaria de los agregados.

Se visualiza, como los diferentes tipos de ALIVEN presentan una masa unitaria suelta entre 400 y 580 kg/m³, la cual es menor que la del agua, por lo que estos agregados flotan. Así mismo, estos áridos cumplen con el límite dado por la NTC 4045, ya que su masa unitaria es menor a 880 kg/m³, para agregado grueso.

De la misma manera, es interesante ver como los resultados de masa unitaria suelta para ALISUR, presentan alrededor del doble de la masa unitaria de los de ALIVEN, por lo que estos agregados no flotan, ni cumplen los requerimientos de la NTC 4045. En el mismo sentido, se ve como los valores de masa unitaria compacta son mayores que los de la suelta, como efectivamente predice la teoría, ya que para calcular la masa unitaria compacta se debe realizar un apisonamiento a la masa de agregados.

En general, las razones de las diferencias tan altas entre las masas unitarias de los agregados de ALIVEN y ALISUR, podrían ser las siguientes:

- La arcilla con la cual se fabricó ALISUR, no tiene la misma capacidad de expansión que la arcilla de ALIVEN, por lo que es posible obtener una mayor masa unitaria.
- El agregado ALIVEN se fabrica con adiciones, por lo que es capaz de expandir hasta un 300% su tamaño inicial, a diferencia de los agregados de ALISUR, los cuales no tienen adiciones y que en teoría alcanzarían un máximo de 88% de expansión, valor que es muy inferior al alcanzado por ALIVEN.
- El procedimiento con el cual se fabricó ALISUR de forma industrial, dista mucho del procedimiento realizado en el laboratorio con la arcilla 13.3. Basta con comparar las rampas de quema de ambas arcillas (13.3 y 13.4), para observar como estas son bastante diferentes y en el caso del proceso industrial no se ejecutó el denominado “choque térmico” al agregado, por la demora del horno en alcanzar los 1300°C de temperatura de cocción.

Aún así, el agregado ALISUR, es apto para ser utilizado en la mezcla de concreto liviano, debido a que su masa unitaria es inferior a los valores registrados por los agregados de peso normal, que fluctúan entre 1400 y 1600 kg/m³; por lo que la masa unitaria del concreto resultante con ALISUR será menor que la de un concreto de peso normal.

5.2.3 Absorción

Este ensayo se realizó de acuerdo con la Normas Técnicas Colombianas, NTC 237: “Método para Determinar la Densidad y Absorción del Agregado Fino”. Este ensayo se les realizó a la masa de agregados de ALIVEN y ALISUR, obteniendo los siguientes resultados:

Tipo de Muestra	Absorción		
	Peso material SSS (B), g	Peso material seco al horno (A)	Absorción %
ALIVEN FINO	2402	2060	17%
ALIVEN MEDIO	2317	1848	25%
ALIVEN COMBINADO	2368	1975	20%
ALISUR FINO	2079	2000	4%
ALISUR MEDIO	2075	2000	4%
ALISUR COMBINADO	2077	2000	4%

Tabla 5.12. Datos de absorción de los agregados.

De la Tabla 5.12, se observa que el ALIVEN posee una gran capacidad de absorción de agua, la cual se incrementa a medida que el tamaño del agregado es mayor. Los valores de absorción fluctúan entre 17% y 25%, tomando un valor medio de 20% para el ALIVEN combinado. Estos valores están dentro de los valores teóricos que se explicaron en el apartado 2.2.1.

Así mismo, los agregados de ALISUR presentan unos valores de absorción muy inferiores a los alcanzados por ALIVEN, localizándose un valor aproximado de 4%. Este valor es explicable, debido a que el ALISUR es poco poroso por su leve expansión.

5.2.4 Factor de Gravedad Específica

Este ensayo se realizó de acuerdo con el ACI-211.2-98: “Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete”. En esta norma se explica como calcular el factor de gravedad específica de los agregados livianos, por medio del método del picnómetro.

El factor de gravedad específica se calculó para la masa de agregado liviano de ALIVEN combinado y de ALISUR combinado. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

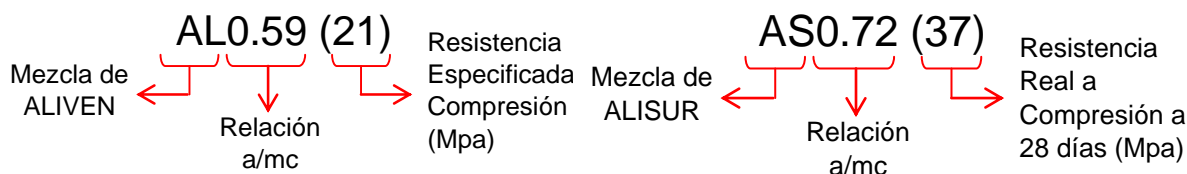
Tipo de Muestra	Factor de gravedad específica			
	Peso Material combinado (C)	Recipiente de 1L+agua (B)	Peso recipiente + material +agua (A)	Factor de gravedad específica
ALIVEN COMBINADO	514	1313	1342	1.06
ALISUR COMBINADO	608	1204	1502	1.96

Tabla 5.13. Datos del factor de gravedad específica.

Cabe resaltar que el factor de gravedad específica es importante, debido a que es un requerimiento indispensable para emplear la metodología de dosificación de mezclas para concreto liviano estructural planteada por la ACI 211.2-98. Los resultados indican que el ALIVEN presenta un menor valor que los de ALISUR, debido a que son más ligeros.

5.3 CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL

En esta sección se exponen, en una primera parte los resultados referentes a los ensayos para caracterizar los materiales utilizados en la mezcla de concreto. En una segunda parte, se enseñan los resultados de los ensayos exigidos por la NTC 4045, para catalogar a un hormigón, como concreto liviano estructural. Estos resultados, corresponden a los de los especímenes de concreto hechos con ALIVEN y con ALISUR, por lo que se procederá a adoptar la siguiente nomenclatura para la identificación respectiva de cada una de las dos mezclas:



5.3.1 Ensayos sobre Materiales

Aparte del agregado liviano, los materiales que se necesitan para formar una mezcla de concreto liviano, corresponden al cemento y a la arena de río, los cuales se procedieron a ser caracterizados para determinar las propiedades necesarias que permitieran realizar los diseños de mezclas. Se debe recordar que como el concreto hecho con ALIVEN, se realizó en una época distinta del de ALISUR, los valores tanto de las propiedades del cemento como de la arena, deben cambiar, por lo que se muestran ambos, así como los requerimientos de las normativas colombianas. A continuación se muestran las propiedades más importantes del cemento, las cuales fueron halladas en los laboratorios de Cementos Argos S.A.

ENSAYO		CEMENTO PARA ALIVEN	CEMENTO PARA ALISUR	VALORES NTC 121 y NTC 321
PARÁMETROS QUÍMICOS	MgO, %	1.18	1.17	Máx. 7.0
	SO ₃ , %	2.23	2.06	Máx. 3.5
	P.I., %	3.16	2.47	Máx. 4.0
PARÁMETROS FÍSICOS	Finura por Blaine, cm ² /g	4145	4203	Mín. 2800
	Fraguado Inicial, min	142	126	Mín. 45
	Fraguado Final, min	200	180	Máx. 480
	Densidad, g/cm ³	3.13	3.10	-
RESISTENCIAS A COMPRESIÓN	1 día, Mpa	18.42	18.52	Mín. 10.0
	3 días, Mpa	30.09	28.32	Mín. 21.0
	7 días, Mpa	34.59	37.14	-
	28 días, Mpa	49.20	46.06	-

Tabla 5.14. Propiedades del cemento utilizado en la investigación.

En cuanto a las arenas de la investigación se les realizó el ensayo de granulometría, encontrándose los siguientes datos:

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

Tamiz	GRANULOMETRIA DE LA ARENA PARA ALIVEN					GRANULOMETRIA DE LA ARENA PARA ALISUR					REQUISITOS NTC 174	
	Peso mat. Retenido en tamiz, g	% Retenido en tamiz	% Retenido acumulado en tamiz	Peso material pasa tamiz, g	% Pasa tamiz	Peso mat. Retenido en tamiz, g	% Retenido en tamiz	% Retenido acumulado en tamiz	Peso material que pasa tamiz, g	% Pasa tamiz	Porcentaje que pasa	
											Limite Inferior	Limite Superior
3/8" (9.51)	0	0.0%	0.0%	1931	100.0%	5	0.2%	0.0%	2055	99.8%	100.0%	100.0%
No. 4 (4.76)	148	7.7%	7.7%	1783	92.3%	138	6.7%	6.7%	1917	93.1%	95.0%	100.0%
No. 8 (2.38)	626	32.4%	40.1%	1157	59.9%	659	32.0%	38.7%	1258	61.1%	80.0%	100.0%
No.16 (1.19)	257	13.3%	53.4%	900	46.6%	299	14.5%	53.2%	959	46.6%	50.0%	85.0%
No.30	112	5.8%	59.2%	788	40.8%	243	11.8%	65.0%	716	34.8%	25.0%	60.0%
No. 50	170	8.8%	68.0%	618	32.0%	196	9.5%	74.5%	520	25.2%	10.0%	30.0%
No. 100	466	24.1%	92.1%	152	7.9%	348	16.9%	91.4%	172	8.3%	2.0%	10.0%
Fondo	152	7.9%	100.0%	0	0.0%	172	8.3%	99.8%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	1931	100.0%				2060	100.0%					

DATOS ADICIONALES DE LA ARENA		Modulo de Finura	Gravedad Especifica
		3.2	3.3
		2.65	2.65

Tabla 5.15. Datos de la arena de la investigación.

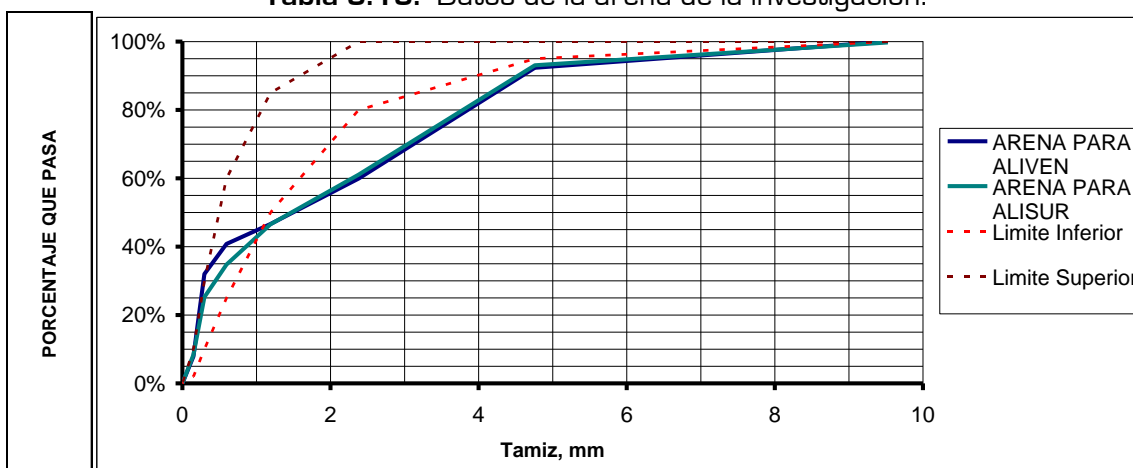


Figura 5.10. Curvas de gradación de la arena de la investigación.

En la Tabla 5.15, se observa que los resultados del cemento indican que tanto el utilizado para ALIVEN como para el de ALISUR fueron muy semejantes, ya que sus propiedades fueron muy parecidas. De los resultados se desprende, que el cemento al tener una densidad del orden de 3.10 g/cm^3 , presenta muy poca o ninguna adición. Así mismo, tiene una finura bastante mayor a la que exige las normas colombianas, lo que producirá una mayor tasa de liberación del calor de hidratación, pero que ayudará al concreto resultante a tener unas resistencias iniciales altas. Las resistencias de los cubos fueron bastante similares para ambos tipos de cementos, situándose la resistencia a los 28 días entre 46 y 49 MPa.

Ahora, los agregados finos utilizados para ALIVEN y ALISUR, arrojaron una granulometría que no cumple con la NTC 174, pero que fueron muy parecidas entre ambas. De la misma forma, estas arenas dieron módulos de finura de 3.2 y 3.3, respectivamente, que las hace clasificar como arenas gruesas. Cabe reasaltar, que la absorción de ambos tipos de arenas fue alrededor de 1%. El resultado anterior, indica que las arenas gruesas ayudaran a ganar en resistencias, pero se perderá en manejabilidad de las mezclas de concreto resultantes.

En general, se puede concluir que tanto el cemento como la arena utilizadas para las mezclas de ALIVEN y ALISUR, fueron muy semejantes en cuanto a propiedades.

5.3.2 Ensayos sobre Concreto

En esta sección se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre probetas de concreto. Cabe resaltar que a estos se les realizó un análisis en el cual se descartaron los datos que se consideraban atípicos para calcular el promedio del ensayo. Así mismo, se calculó la desviación estándar de la muestra con los datos depurados. En seguida se muestran estos resultados.

5.3.2.1 Resistencia a la Compresión

Este ensayo se realizó de acuerdo con la Normas Técnicas Colombianas, NTC 673: "Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros Normales de Concreto" y la NTC 454: "Concreto Fresco: Toma de Muestras". Véase Anexo A.

El ensayo se realizó en una máquina de compresión marca Servintegral LTDA, con capacidad máxima de 120 Toneladas y con bomba de carga marca Siemens, localizada en el laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá D.C.

Se analizaron un total de 62 cilindros de 15x30 cm, para edades de curado de 3, 7 y 28 días, seleccionando un proceso de refrentado con azufre, con el fin de homogenizar las caras de los especímenes antes de aplicar la carga en la máquina de compresión. Las probetas fueron curadas por inmersión hasta el momento del ensayo según la metodología planteada en NTC 1377 (ASTM C-192) y tal como lo permite la NTC 4045. Los resultados de este ensayo tanto para las mezclas de concreto fabricadas con ALIVEN, así como con ALISUR, se muestran a continuación:

Tipo de Mezcla	f'c Especificado MPa	Edad de ensayo días	Datos				Resistencia Promedio MPa	Desviación Estándar** MPa	Diferencia Res. Especificada y Res. promedio a 28 días, %	Diferencia Res. a los 7 días y Res. a los 28 días %
			Prob 1	Prob 2	Prob 3	Prob 4				
AL0.67 (18)	18	5	12.8	14.7	14.6		14.0	1.1	2.0%	14.2%
		7	15.4	15.6	16.3		15.7	0.5		
		29	18.0	18.4	18.7	22.34*	18.4	0.3		
AL0.59 (21)	21	3	15.9	12.0	14.3		14.1	2.0	1.3%	1.2%
		7	18.3	18.7	23.2	21.7	20.5	2.4		
		28	20.8	19.2	23.6	19.3	20.7	2.1		
AL0.55 (25)	25	3	15.1	18.0	18.4		17.2	1.8	6.6%	16.6%
		7	20.4	23.4	22.7	22.4	22.2	1.3		
		28	26.0	20.7*	26.3	27.6	26.7	0.9		
AL0.52 (28)	28	4	18.9	19.1	18.9		18.9	0.1	10.5%	20.2%
		7	21.5	21.0	17.6	19.8	20.0	1.7		
		28	26.3	25.2	23.3	25.4	25.1	1.2		
AS0.77 (29)	21	4	14.3	12.7	18.07*		13.5	1.1	38.0%	31.9%
		7	19.4	20.2	19.5		19.7	0.4		
		28	29.6	29.7	27.7		29.0	1.1		
AS0.72 (37)	28	3	20.4	20.8	17.3		19.5	1.9	31.9%	28.8%
		7	23.9	27.6	25.8	27.9	26.3	1.8		
		28	36.8	36.3	38.9	35.7	36.9	1.4		

* Dato atípico descartado.

** Desviación Estándar con datos depurados

Tabla 5.16. Datos y resultados de resistencia a la compresión.

Con base en los promedios de los resultados obtenidos, se grafican los datos de resistencia a la compresión de las mezclas de concreto con ALIVEN (AL67, AL59, AL55 y AL52) y con ALISUR (AS77 y AS72) a las edades de 3, 7 y 28 días.

Los resultados indican que tanto las mezclas de concreto con ALIVEN como con ALISUR, se comportan de acuerdo a las directrices de la tecnología del concreto, que indican que a menores relaciones a/mc, las resistencias se incrementan, así como que a medida que transcurre el tiempo, el concreto –con un buen curado- tiende a ganar en resistencia.

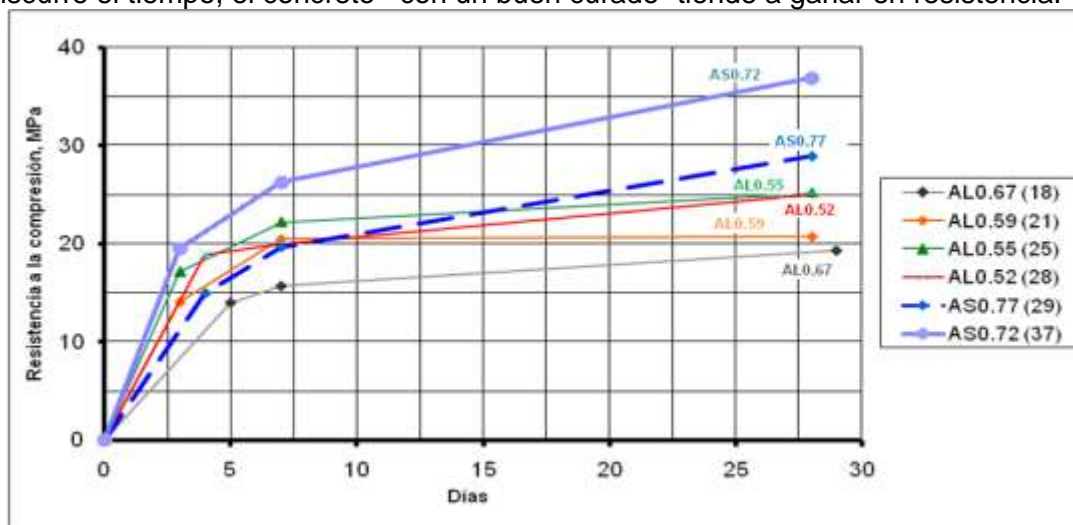


Figura 5.11. Resistencia a la compresión del concreto liviano en el tiempo.

De la Tabla 5.16 y de la Figura 5.11, se aprecia que las resistencias especificadas para concreto fabricado con ALIVEN se cumplen para los 28 días, presentando un porcentaje de diferencia entre la resistencia especificada y la real de un 1% a un 11%. Adicionalmente, se ve como la pendiente de resistencia a la compresión entre los 7 y los 28 días, tiende a ser variable, ya que presenta un rango entre un 1% a un 20%. Lo anterior se justificaría en el hecho de que los agregados “ALIVEN”, son áridos bastante heterogéneos, por lo que algunos granos presentarán una mayor resistencia propia, una mejor adherencia a la pasta de cemento y una absorción de agua distinta.

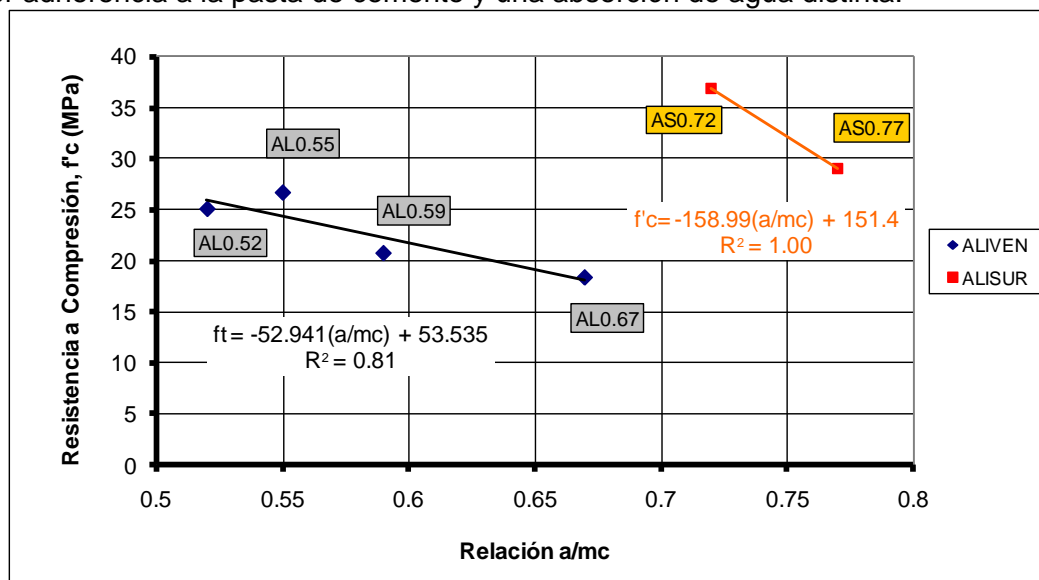


Figura 5.12. Relación resistencia a la compresión vs relación a/mc.

En cuanto a los concretos livianos fabricados con ALISUR, se encuentra que existe una diferencia grande entre la resistencia esperada y la real a los 28 días de edad, que se sitúa en el orden de un 35% aproximadamente, y que se debió principalmente a la importante ganancia de resistencia que se registró entre los 7 y 28 días de edad. Este aumento de resistencia fue alrededor de un 30%, el cual es un valor bastante mayor que los encontrados con las cuatro mezclas con ALIVEN.

En la Figura 5.12, se observa que hay una relativa buena aproximación de los datos obtenidos experimentalmente para las mezclas de ALIVEN, las cuales presentan un R^2 de 0.81. En el caso del concreto con ALISUR, se aprecia que tiene un R^2 de 1.0, debido a que se tienen 2 puntos. En ambas mezclas de concreto se ve que a medida que aumenta la relación a/mc se incrementa la resistencia a compresión.

En general, los resultados muestran varias diferencias en el comportamiento entre el concreto liviano hecho con el ALIVEN y el hormigón liviano con ALISUR. Estas se resumen a continuación:

- Se observa como las mezclas de concreto liviano con ALIVEN, con relaciones a/mc de 0.67, 0.59, 0.55 y 0.52, para resistencias especificadas de 18 MPa, 21 MPa, 25 MPa y 28 MPa, respectivamente; presentan resistencias reales a los 28 días, inferiores a las registradas por las mezclas de concreto liviano con ALISUR, a pesar de que las relaciones a/mc utilizadas para estas mezclas (0.77 y 0.72) fueran mucho mayores.
- Las mezclas fabricadas con ALISUR presentan un notorio incremento de resistencias entre las edades de 7 a 28 días, en comparación con las mezclas de ALIVEN, que son menores para las mismas edades. Así mismo, se observa que la tasa de ganancia de resistencia en el tiempo para las dos mezclas con ALISUR, son aproximadamente iguales; en contraste, las cuatro mezclas con ALIVEN presentan una gran variabilidad en la ganancia de resistencia en el tiempo.

De la misma forma, la explicación a los sucesos descritos anteriormente, basada en la componente teórica, que se explicó en la sección 3.3.1.1, y experimental de los concretos livianos, se enseña a continuación:

1. La variación entre las resistencias del concreto con ALIVEN y con ALISUR, no están influenciadas por una diferencia entre las características del cemento y la arena utilizadas, ya que, según se concluyó del apartado 5.3.1, las propiedades de cada material -para las dos mezclas- fueron prácticamente las mismas. Tampoco, estarían relacionadas con el proceso de construcción de los cilindros, puesto que para ambas mezclas se siguió el mismo procedimiento. En vista de lo anterior, la diferencia se soportaría en la única discrepancia significativa entre los dos concretos: los agregados livianos utilizados.
2. La resistencia final del concreto, se basa en el aporte de resistencias de la pasta de cemento, del agregado y de la interfase entre agregado y pasta. En ese orden de ideas, el ALISUR, al ser un agregado con una mayor resistencia propia y

probablemente con una mejor adherencia que el ALIVEN, incurrirá en un concreto con mayor resistencia final. La mejor adherencia de los agregados de ALISUR, con respecto a los de ALIVEN, se justificaría en que los primeros tienen una textura rugosa, más esférica que los segundos y a la mínima cantidad de finos en la mezcla.

3. El concreto liviano con ALIVEN se comporta como un típico concreto liviano, es decir, que el agregado liviano constituye el elemento aligerante en el hormigón, mientras que la resistencia de este, se basa en la calidad de la pasta de cemento. Esta afirmación se corrobora por la forma de falla de este concreto, expuesta en la Figura 5.15, en donde se ve que el cilindro falló por el agregado. En contraste, el concreto liviano con ALISUR se comporta como un concreto liviano de mejor desempeño, ya que hay una falla compartida entre agregado y pasta, que desde el punto de vista visual es del orden de un 30% por agregado y un 70% por pasta aproximadamente. Además, este tipo de hormigón, presenta una falla frágil y explosiva. Lo anterior evidencia que el ALISUR aporta resistencia al concreto final.
4. Otra variable importante en la resistencia de los dos concretos, consiste en que el concreto de ALIVEN presenta un agregado altamente absorbente y poroso, al cual teóricamente se le debía de realizar un prehumedecimiento antes de ser utilizados en la mezcla de concreto. Este procedimiento no se realizó ni al agregado de ALIVEN ni al de ALISUR, por lo que en parte se explica que el concreto con ALIVEN no hubiera alcanzado mayores resistencias, ya que es difícil de estimar la relación a/mc efectiva real de este concreto. En cambio, ALISUR al tener un agregado poco absorbente, el proceso de prehumedecimiento no es determinante en la resistencia final.
5. Las resistencias altas del ALISUR, también se puede explicar debido a que los tamaños máximos nominales del agregado utilizado era de $\frac{1}{2}$ " , lo que ocasionaba que los agregados se rodearan de mayor mortero, lo que incrementa la resistencia. La anterior razón también es válida para el caso de ALIVEN, ya que estos agregados, al ser tan ligeros (509 Kg/m^3), presentan poca resistencia propia, por lo cual al rodearse de mayor pasta cementante, se pueden lograr las resistencias que se obtuvieron.



Figura 5.13. Falla típica a compresión de



Figura 5.14. Falla típica a compresión de

concretos con ALIVEN.



Figura 5.15. Esquema de la falla interior del concreto con ALIVEN.

concretos con ALISUR.



Figura 5.16. Esquema de la falla interior del concreto con ALISUR.

Finalmente, es interesante anotar que los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas de ALISUR a los 7 días, dieron prácticamente iguales a los predichos por la ecuación linealizada de los ensayos pruebas a esa misma edad, lo que permite concluir que no existió variación entre los ensayos pruebas y los finales, así como permite inferir que existe poca dispersión en la determinación de resistencias a determinada edad.

5.3.2.2 Resistencia a la Tensión Indirecta

Este ensayo se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana, NTC 722: “Método de Ensayo para determinar la Resistencia a la Tensión Indirecta de Especímenes Cilíndricos de Concreto”. Véase Anexo A.

El ensayo se realizó en una máquina de compresión marca Forney, localizada en el laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá D.C.

Se analizaron un total de 52 cilindros de 15x30 cm, para una edad de falla de 28 días, tomando siempre como mínimo 8 probetas, según los requerimientos de la NTC 4045. Así mismo, a las probetas se les proporcionó un curado por inmersión durante 7 días y posteriormente fueron dejadas a 21 días de secado con las condiciones de humedad requeridas. Los resultados de este ensayo tanto para las mezclas de concreto fabricadas con ALIVEN, como con ALISUR, se muestran a continuación:

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

No.	RESISTENCIA TENSION PROMEDIO										Desviación Estándar**	% Tensión/Compresión	Coeficiente λ, NSR-10
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	PROM. ft			
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	PROM. ft	MPa		
AL0.67 (18)	2.1	2.7	2.8	2.6	2.5	2.6	2.2	1.6*	2.6	2.5	0.2	13.0%	1.02
AL0.59 (21)	2.6	2.8	2.2	2.7	2.1	1.9*	2.7	2.7	2.7	2.6	0.3	12.3%	1.00
AL0.55 (25)	2.6	2.4	2.9	2.4	1.6*	2.8	2.1	3.0	2.6	2.6	0.3	10.3%	0.92
AL0.52 (28)	2.9	1.5*	2.3	2.6	2.1	2.4	2.2	1.5*	2.4	2.4	0.3	9.7%	0.86
AS0.77 (29)	1.8*	2.4	2.2	2.9	2.5	2.8	2.1	2.5		2.5	0.3	8.6%	0.82
AS0.72 (37)	3.7	3.5	2.3*	3.5	3.2	2.8	2.7	2.7		3.2	0.4	8.5%	0.93

* Dato atípico descartado.
 ** Desviación Estándar con datos depurados

Tabla 5.17. Datos y resultados de resistencia a la tensión.

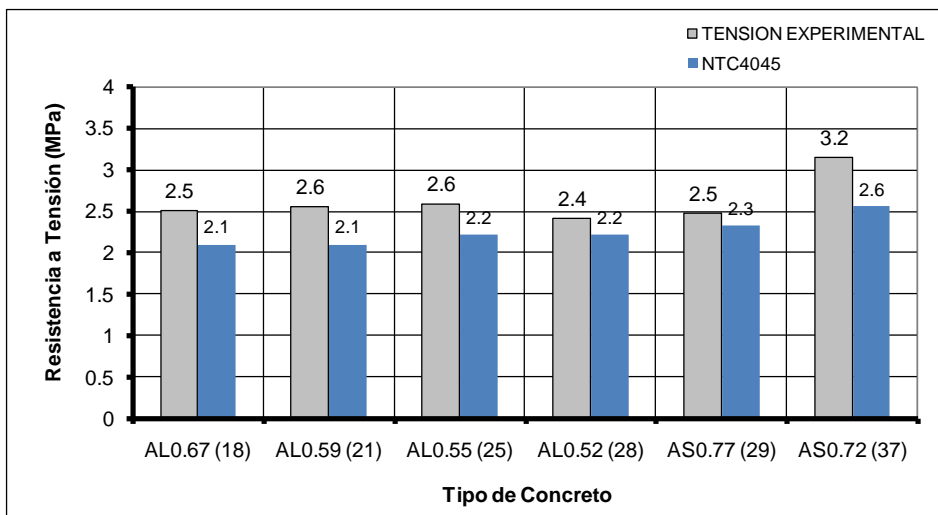


Figura 5.17. Diagrama de barras de resistencia a la tensión experimental y según NTC 4045.

De la Figura 5.17, se aprecia que las resistencias de tensión indirectas obtenidas tanto para ALIVEN como para ALISUR, están por encima de las predichas por la NTC 4045, para estos tipos de concreto. Así mismo, si se realiza una correlación entre resistencia a la tensión y la relación a/mc, se encuentra la Figura 5.18.

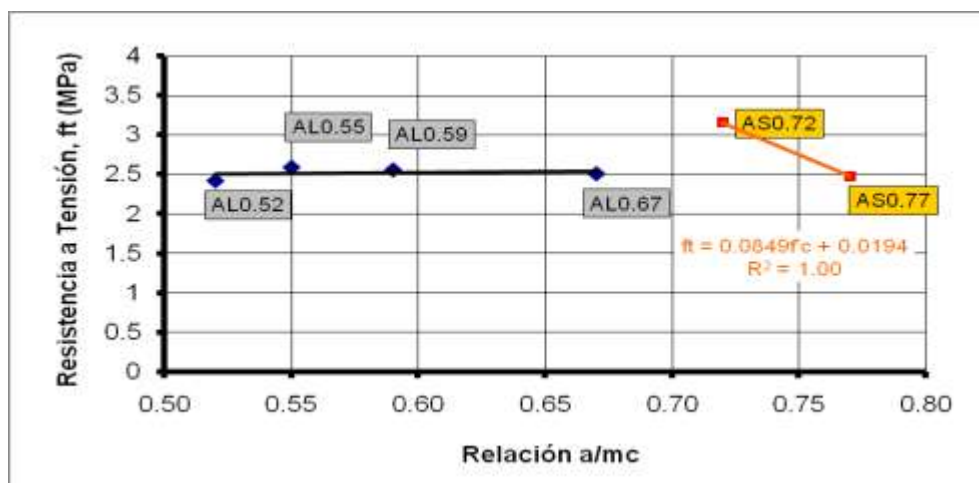


Figura 5.18. Relación Resistencia Tensión vs Relación a/mc.

De la anterior figura se encuentra que para las mezclas de ALIVEN, la resistencia a la tensión tiende a permanecer constante a pesar de la variación de la relación a/mc. El concreto con ALISUR, en cambio tiende a resistir menos a tensión a medida que se aumenta la relación a/mc. La relación entre Tensión y Compresión¹⁶ (T/C) para todas las muestras de concreto, se puede ver en la siguiente gráfica:

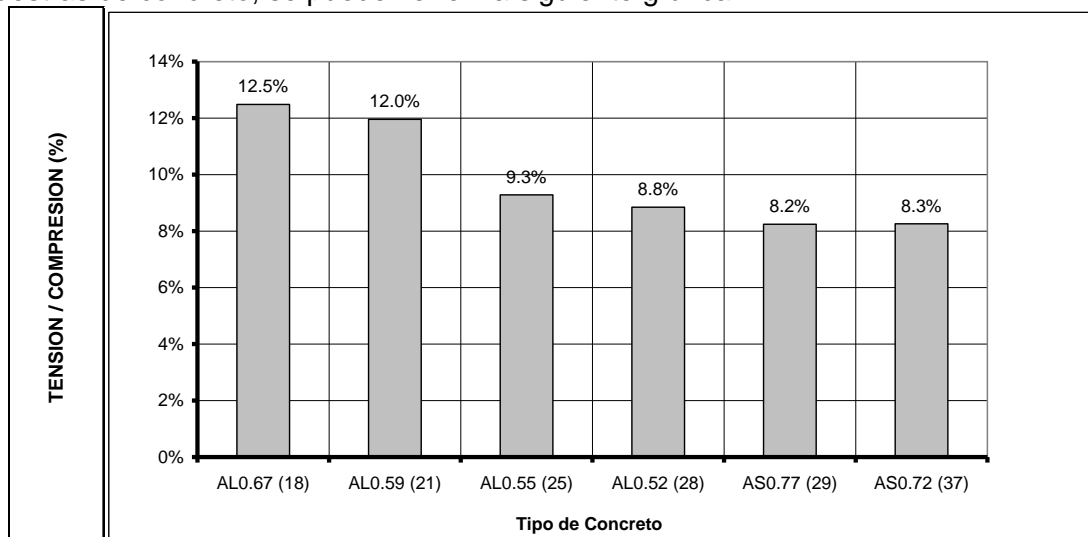


Figura 5.19. Relación Tensión/Compresión para el concreto liviano.

De la Figura 5.19 se aprecia que para las cuatro mezclas de concreto con ALIVEN, la relación T/C tiende a disminuir a medida que se aumenta la resistencia a compresión del concreto a los 28 días, entre un intervalo de 8.8% y 12.5%. Resultados que concuerdan con la teoría para esta clase de hormigones. En el caso del concreto liviano con ALISUR, se observa que prácticamente la relación de T/C para las mezclas de AS77 y AS72, tienden a ser iguales y que se sitúan en alrededor de un 8.2%.

Igualmente, se ve que el factor λ , que corresponde a la relación que existe entre un concreto de peso normal y uno liviano y que se calcula con la relación: $\lambda = ft / [0.59 * \sqrt{f'c}]$, y que está en términos de la resistencia a la tensión (ft) y a la compresión (f'c), presenta en algunos casos valores muy altos, que están por encima del λ teórico (0.85) para esta clase de hormigones. Estudiando el concreto con ALIVEN, se ve que el λ varía entre 0.86 y 1.02, que estaría asociado a que este tipo de concreto resistió lo mismo a tensión a diferentes resistencias a la compresión. En el caso de los concretos con ALISUR, el λ presentó valores entre 0.82 y 0.93.

En general, tanto las mezclas de concreto liviano con ALIVEN, así como las de ALISUR, se comportan según los lineamientos teóricos de esta clase de hormigones, que indican que la relación T/C tiende a ser de un 80% de la misma relación de un concreto de peso normal, para la misma resistencia a la compresión. Lo anterior indica que los concretos livianos tienen una menor capacidad para resistir fuerzas de corte, en comparación con un concreto de peso normal.

¹⁶ La resistencia a la compresión tomada correspondió a la real registrada por cada mezcla de concreto a los 28 días de edad.

5.3.2.3 Ensayo de absorción en frío, caliente y porosidad

Este ensayo se realizó de acuerdo con la American Society of Testing Materials, ASTM 642-06: "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".

La razón de la escogencia de este ensayo, se basó en que la NTC 4045 indica que se deben realizar ensayos de durabilidad a las muestras de concreto liviano, y a que el ensayo descrito en la ASTM 642-06, permite determinar la absorción en frío, la absorción en caliente y la porosidad de un espécimen de concreto, dando un indicativo de la permeabilidad del hormigón.

Se tuvieron en total 16 muestras de concreto liviano, 12 de las mezclas hechas con ALIVEN y 4 con ALISUR. Estas muestras se obtuvieron de la división del cilindro estándar de 15x30cm en 3 partes, a los cuales se les aplicó el procedimiento descrito en la norma, a una edad de curado de 28 días y verificando que cumplieran con el peso mínimo exigido por la normativa. Para el caso de las muestras de ALISUR, se tomaron dos pedazos por cada mezcla. Los resultados del ensayo de absorción en frío, caliente y porosidad, con su respectivo promedio se muestran en la Tabla 5.18.

No.	f'c Promedio	ENSAYO DE ABSORCION EN FRIO Y CALIENTE, %				Diferencia de absorción (1) y (2), %	M. Unitaria a los 28 días kg/m ³
		Absorción después de inmersión (1)		Absorción después de inmersión y ebullición			
Muestra	Mpa	Valores	Promedio	Valores	Promedio	Vol. Vacios	Promedio
AL0.67 (18)	19.3	11.6%	11.6%	11.6%	11.8%	19.4%	19.7%
		12.0%		12.4%		20.5%	
		11.1%		11.4%		19.3%	
AL0.59 (21)	20.7	8.7%	8.3%	9.5%	9.2%	16.6%	16.4%
		7.8%		9.0%		16.2%	
AL0.55 (25)	25.2	10.9%	10.6%	11.8%	11.3%	20.2%	19.4%
		10.4%		10.9%		18.9%	
		10.6%		11.1%		19.1%	
AL0.52 (28)	25.1	9.9%	8.1%	9.8%	8.6%	17.5%	15.2%
		7.1%		7.8%		13.9%	
		7.4%		8.1%		14.4%	
AS0.77 (29)	29.0	8.3%	8.4%	8.5%	8.5%	15.9%	15.9%
		8.4%		8.6%		16.0%	
AS0.72 (37)	36.9	7.3%	7.4%	7.7%	7.8%	14.6%	14.8%
		7.5%		7.9%		14.9%	

Tabla 5.18. Datos y resultados de absorción en frío, absorción en caliente y porosidad.

De los valores encontrados, se observa que en el caso de concretos hechos con ALIVEN, la absorción varía desde un 8.1% a un 11.6% para la absorción en frío, de un 8.5% a un 11.8% para absorción en caliente y de un 15.2% a un 19.7% de porosidad del hormigón. Así mismo, los cilindros fabricados con ALISUR muestran que la absorción en frío varió de 7.4% a 8.4%, la absorción en caliente de 7.8% a 8.5% y la porosidad de 14.8 a 15.9%.

En base a los anteriores resultados, se procedió a trazar la Figura 5.20, donde se observa el comportamiento de las mezclas de concreto liviano.

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

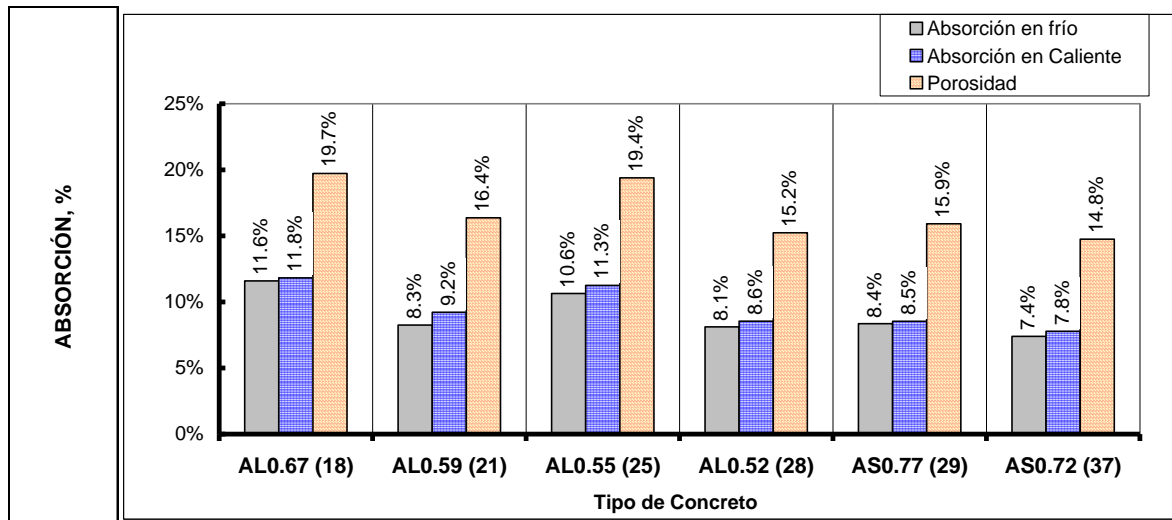


Figura 5.20. Comparación de absorción en frío, absorción en caliente y porosidad para las mezclas de concreto liviano.

Los resultados indican que tanto los concretos con ALIVEN como con ALISUR, se comportan según lo descrito en la teoría del apartado 3.4.9, es decir que a una menor relación a/mc, presentarán menores valores de absorción y de porosidad. Aunque, la anterior afirmación no se cumplió en el caso de la muestra AL59, que presentó un mejor comportamiento que los especímenes de AL55, a pesar de tener una relación a/mc más alta.

Para estudiar la relación que existe entre los porcentajes de absorción del material y la relación a/mc, se procede a trazar la siguiente figura:

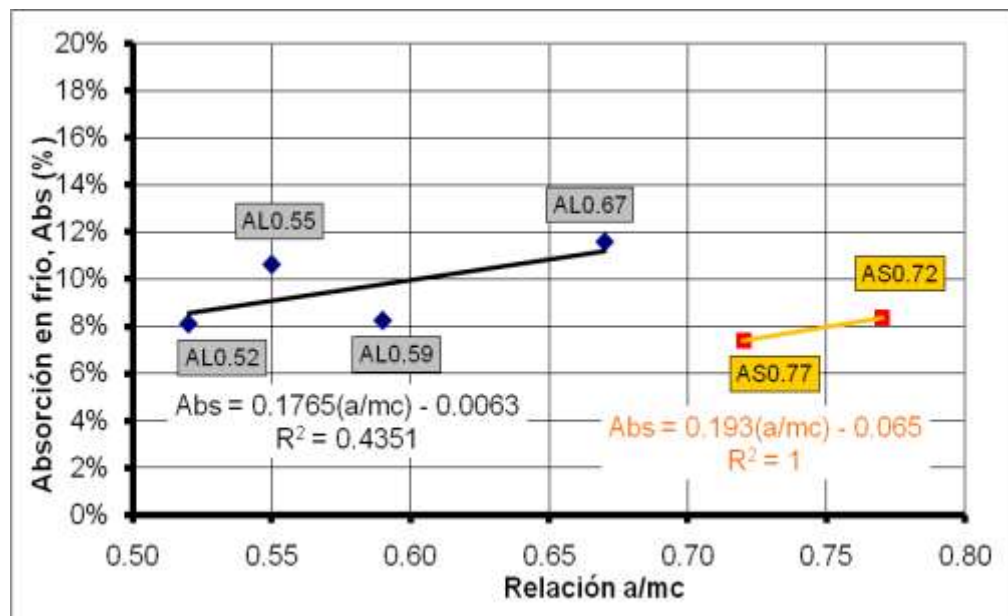


Figura 5.21. Comparación de absorción en frío, absorción en caliente y porosidad para las mezclas de concreto liviano.

La figura anterior indica que tanto los concretos hechos con ALIVEN como los de ALISUR, presentan una mayor absorción a medida que se aumenta la relación a/mc, lo que va en concordancia con la tecnología del hormigón, ya que a medida que se incrementa la relación a/mc, la pasta cementante tiende a disminuir en calidad, por lo que se vuelve más permeable.

Es interesante acotar que los resultados obtenidos de los especímenes de concreto fabricado con ALISUR, para relaciones a/mc de 0.72 y 0.77, presentaron en ambos casos mejor o casi igual comportamiento de absorción en frío, caliente y porosidad, frente a las mezclas con ALIVEN, realizadas con a/mc de 0.67, 0.59, 0.55 y 0.52.

Los anteriores resultados indican que las muestras con ALISUR, presentan mejor comportamiento frente a la permeabilidad que las de ALIVEN, a pesar de tener relaciones a/mc mucho más altas, y no están de total acuerdo con la teoría clásica que indica que la permeabilidad del concreto, depende casi exclusivamente de la calidad de la pasta de cemento, sin importar el agregado utilizado. En efecto, la explicación a estos valores tendría que estar relacionada con la calidad del agregado, ya que los agregados de ALIVEN, son áridos livianos, absorbentes y porosos, a diferencia de los de ALISUR que son poco absorbentes y poco porosos. Los anteriores resultados también indican que a mayor resistencia a la compresión de un concreto, menor porcentaje de absorción de agua.

En general, todas las mezclas realizadas presentaron un porcentaje de absorción de agua mayor al 5% y de porosidad mayor al 15%, por lo que se clasificarían como concretos de baja calidad y de durabilidad no adecuada; según los límites de clasificación del texto de Mejía de Gutiérrez (1999) y los mostrados en la Tabla 3.9, del presente texto.

5.3.2.4 Ensayo de Masa Unitaria

Este ensayo se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana, NTC 4022: “Masa Unitaria de Concreto Liviano Estructural”. El ensayo tiene como objetivo el determinar la masa unitaria seca al aire (en servicio) a los 28 días, debido al equilibrio que alcanza la masa unitaria seca del concreto estructural liviano después de su exposición a humedad relativa de 50% +/- 5% y a una temperatura de 23°C +/- 2°C por un periodo de tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio. Así mismo, en la norma se menciona que la masa unitaria de equilibrio es igual a la masa unitaria secada al horno más 50 kg/m³.

No.	f'c Promedio	M. Unitaria NTC 4045 kg/m ³	MASA UNITARIA PROMEDIO				Promedio m. unitaria 28 días (kg/m ³)	Des. Estandar M. Unitaria 28 días (kg/m ³)	Masa Unitaria Equilibrio (kg/m ³)	Promedio Seco a horno (kg/m ³)	% diferencia Equilibrio y NTC 4045 (kg/m ³)
			Probeta	Probeta	Probeta	Probeta					
Muestra	Mpa	kg/m ³	1	2	3	4					
AL0.67 (18)	19.3	1727	1858	1861	1843	1906	1867	28	1669	8.1%	
AL0.59 (21)	20.7	1755	1917	1906	1910	1897	1907	9	1776	8.7%	
AL0.55 (25)	25.2	1808	1942	1914	2002	1970	1957	38	1724	8.2%	
AL0.52 (28)	25.1	1806	1890	1891	1885	1892	1889	3	1781	4.6%	
AS0.77 (29)	29.0	1851	1976	1972	1979		1975	4	1942	6.7%	
AS0.72 (37)	36.9	1942	1957	1976	1965		1966	9	1954	1.2%	

Tabla 5.19. Datos y resultados de Masa Unitaria.

Se tuvieron en total 22 cilindros de 15x30cm, para las mezclas de concreto liviano con ALIVEN (4 probetas por cada dosificación) y ALISUR (3 probetas por cada dosificación).

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

Estas muestras fueron dejadas en un curado por inmersión durante 7 días y después se dejaron secar al aire, tal y como explica la NTC 4022. La masa unitaria seca, se calculó a los 28 días dando los resultados de la Tabla 5.19.

En la anterior tabla se observa el promedio de la masa unitaria a los 28 días y la masa unitaria estimada por la NTC 4045 para cada mezcla de concreto, la cual se determinó por interpolación lineal, teniendo en cuenta la resistencia a compresión real de cada mezcla. De la misma manera, el valor de la masa unitaria seca al horno, se determinó como el promedio de los valores de la densidad aparente seca de los especímenes utilizados en el ensayo de absorción en frío, caliente y porosidad (ASTM 642-06), que se muestra a continuación:

	Densidad Aparente Seca (kg/m ³)		Densidad Aparente Seca después de inmersión (kg/m ³)		Densidad Aparente Seca después inmersión y hervido (kg/m ³)		Densidad Aparente (kg/m ³)	
	Medida	Promedio	Medida	Promedio	Medida	Promedio	Medida	Promedio
AL0.67 (18)	1672	1669	1866	1863	1866	1866	2074	2079
	1646		1844		1850		2069	
	1690		1878		1883		2095	
AL0.59 (21)	1751	1776	1902	1922	1916	1939	2098	2123
	1801		1942		1962		2148	
	1720		1907		1922		2156	
AL0.55 (25)	1733	1724	1914	1907	1922	1918	2136	2138
	1718		1900		1909		2123	
	1791		1968		1965		2170	
AL0.52 (28)	1781	1781	1907	1926	1920	1933	2068	2102
	1771		1901		1915		2068	
	1902		2042		2048		2227	
AS0.72 (37)	1890	1896	2031	2036	2039	2044	2221	2224
	1863		2018		2022		2214	
	1863		2020		2023		2217	
AS0.77 (29)		1863		2019		2022		2216

Tabla 5.20. Datos y resultados de densidades por el método de la ASTM 642-06.

Con los valores de las anteriores tablas, se elaboran la Figura 5.22 y la Figura 5.23:

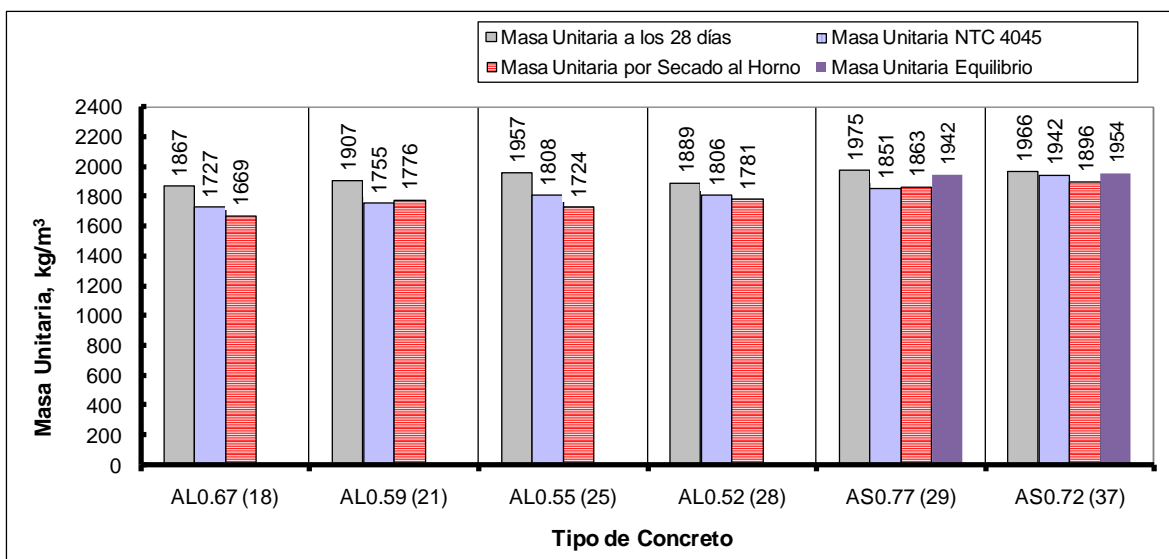


Figura 5.22. Comparación de masa unitaria experimental, NTC 4045 y Secada al horno a 110°C.

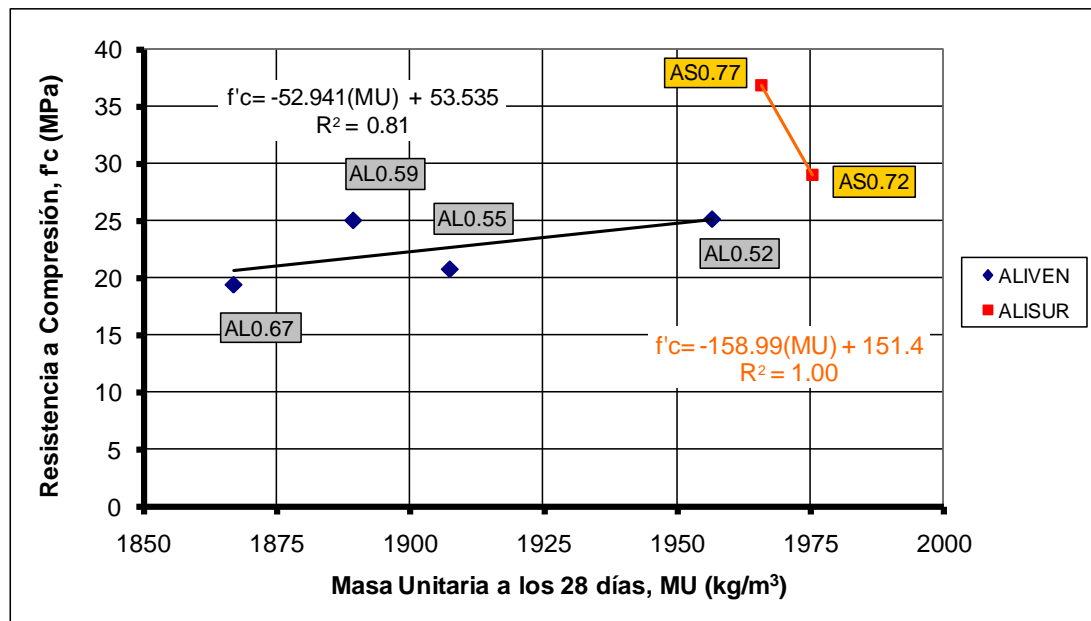


Figura 5.23. Relación resistencia vs masa unitaria a los 28 días.

En la Figura 5.22 se han graficado la masa unitaria a los 28 días, la masa unitaria según la NTC4045 y la masa unitaria secada al horno. Con respecto a los resultados del concreto con ALIVEN, todas las masas unitarias a los 28 días superan con creces a las de secado al horno y también a las predichas por la NTC 4045. Esta situación se repite para los resultados del concreto hecho con ALISUR.

De la Figura 5.20 se aprecia que los resultados tienden a mostrar un aumento de resistencia con el incremento de la masa unitaria, tal y como lo predice la teoría para esta clase de concretos. Por el contrario, los concretos de ALISUR tienden a mostrar disminución de resistencia con el aumento de masa unitaria. Este comportamiento se explicaría en el hecho de que los concretos con ALISUR, se dosificaron de acuerdo con la metodología de la ACI 211.2, por lo que los resultados enseñaban el mismo peso unitario fresco para las dos relaciones a/mc estudiadas, por lo que la diferencia final en peso correspondería al agua que se evaporó de la mezcla.

En general, los resultados muestran las siguientes características:

- Los concretos realizados con ALISUR resultan más pesados que los fabricados con ALIVEN. Esto se debe a que la densidad del agregado liviano utilizado para el hormigón con ALISUR es mayor que la del concreto hecho con ALIVEN; ya que, la densidad del cemento y del agregado fino fue prácticamente igual en ambos casos.
- Se observa como para la mezclas de ALIVEN y las de ALISUR, la diferencia entre masa unitaria a los 28 días y la de secado, es mayor a los 50 kg/m³, que se mencionan en la NTC 4045. Lo anterior, debido a que las probetas de ambas mezclas realmente no han alcanzado la masa unitaria de equilibrio a los 28 días,

puesto que deberá haber una variación porcentual de +/- 0.1%, en los pesajes sucesivos cada 28 días de las probetas, tal y como dice la NTC 4045.

- Se ve como las mezclas hechas con ALIVEN presentan un mayor rango de variación de la masa unitaria a los 28 días con respecto a las de secado al horno que las realizadas con ALISUR. Lo anterior se debe a la mayor capacidad de absorción de los agregados de ALIVEN en contraste con los de ALISUR que son poco porosos y absorbentes.
- Las masas unitarias a los 28 días de las dos mezclas hechas con ALISUR, son prácticamente iguales, a pesar de que tienen una resistencia a la compresión diferente. Esto se debe a que el proporcionamiento de las mezclas se realizó con la metodología de la ACI 211.2, por lo que el peso fresco debería ser igual para ambas mezclas y la variación en estado seco se debería a la cantidad de agua evaporada de cada dosificación.

En general, los resultados muestran que la masa unitaria seca a los 28 días de las probetas de concreto con ALIVEN cumplen con los requerimientos expuestos por la normativa americana, la ACI213R-03, ya que se encuentran en el rango comprendido entre 1120 y 1920 kg/m³; a diferencia de las muestras fabricadas con ALISUR. Así mismo, ninguno de los especímenes trabajados, presentan masas unitarias secas menores a 1840 kg/m³, como lo exige la norma NSR-10.

Es interesante mencionar que la masa unitaria de equilibrio (en servicio) del concreto hecho con ALISUR, se encuentra alrededor de 1950 kg/m³. Si a ese valor se le suma el peso del acero de refuerzo (alrededor de 100 kg/m³), se encuentra un valor aproximado de la masa unitaria del concreto liviano reforzado de 2050 kg/m³, valor inferior al 2400 kg/m³, con el que normalmente se trabaja en diseño estructural.

5.3.2.5 Ensayo de Modulo de Elasticidad y Relación de Poisson

Estos ensayos se realizaron de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana, NTC 4025: "Método de Ensayo para Determinar el Modulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson en Concreto a Compresión".

Se realizó el ensayo de modulo de elasticidad y de la relación de Poisson a probetas de concreto liviano tanto de ALIVEN como de ALISUR de dimensiones de 15x30cm. En total, fueron 13 especímenes a los cuales se les determinó el módulo de elasticidad, por medio de un compresometro que contiene deformímetros para medir las deformaciones transversales y longitudinales, mediante la aplicación de carga por una máquina de compresión marca Servintegral LTDA.

Se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla siguiente:

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

No.	f'c Promedio	M. Unitaria 28 días	Datos Experimentales		MODULO DE ELASTICIDAD, Mpa			Porcentaje de Variación		
			Deformación	Esfuerzo	Datos Experimental	Promedio	Teórico Según ACI 318	Teórico Según NSR-10	Teórico vs. ACI 318	Teórico vs. NSR-10
AL0.67-1 (18)	19.35	1867	0.000718	9.05	12618	12618	15257	17573	17%	28%
AL0.59-1 (21)	20.73	1907	0.000572	9.05	15843	15942	16308	18188	2.2%	12.3%
AL0.59-2 (21)			0.000635	10.19	16041					
AL0.55-1 (25)	25.16	1957	0.000743	11.32	15233	16528	18669	20041	11.5%	17.5%
AL0.55-2 (25)			0.000667	11.88	17823					
AL0.52-1 (28)	25.06	1889	0.000724	11.88	16416	16416	17676	19998	7.1%	17.9%
AL0.52-2 (28)			0.001067	12.45	11670					
AS0.77-1 (29)	28.98	1975	0.000660	12.88	19511	19822	20323	21506	2.5%	7.8%
AS0.77-2 (29)			0.000578	12.24	21178					
AS0.77-3 (29)			0.000692	13.00	18778					
AS0.72-1 (37)			0.001092	16.18	14811					
AS0.72-2 (37)	36.93	1966	0.001518	16.18	10659	17568	22777	24277	22.9%	27.6%
AS0.72-3 (37)			0.000921	16.18	17568					

* Dato atípico descartado.

Tabla 5.21. Datos y resultados de modulo de elasticidad.

De la Tabla 5.21, se deduce como primera medida que los resultados de modulo de elasticidad son bastante dispersos, ya que se tomaron 2 medidas de este para una misma edad y composición del hormigón, obteniendo valores diferentes. Así mismo, se procedió a comparar los valores experimentales obtenidos, con los teóricos dados por las formulas que se encuentran en la NSR-10 y ACI 318, las cuales se reproducen nuevamente a continuación:

$$Ec = \lambda \cdot 4700 \cdot \sqrt{f'c} \tag{Ec. 5.1}$$

$$Ec = w_c^{1.5} \cdot 0.043 \cdot \sqrt{f'c} \tag{Ec. 5.2}$$

Donde:

Ec= Módulo de Elasticidad del concreto (Mpa).

f'c= Resistencia a la compresión especificada a los 28 días (Mpa).

λ= Coeficiente de modificación, cuyo valor es de 0.85 cuando se reemplazan los agregados gruesos en su totalidad por agregados livianos y se utiliza arena de peso normal.

wc= densidad del concreto en estado seco comprendida entre 1440 y 2560 kg/m³.

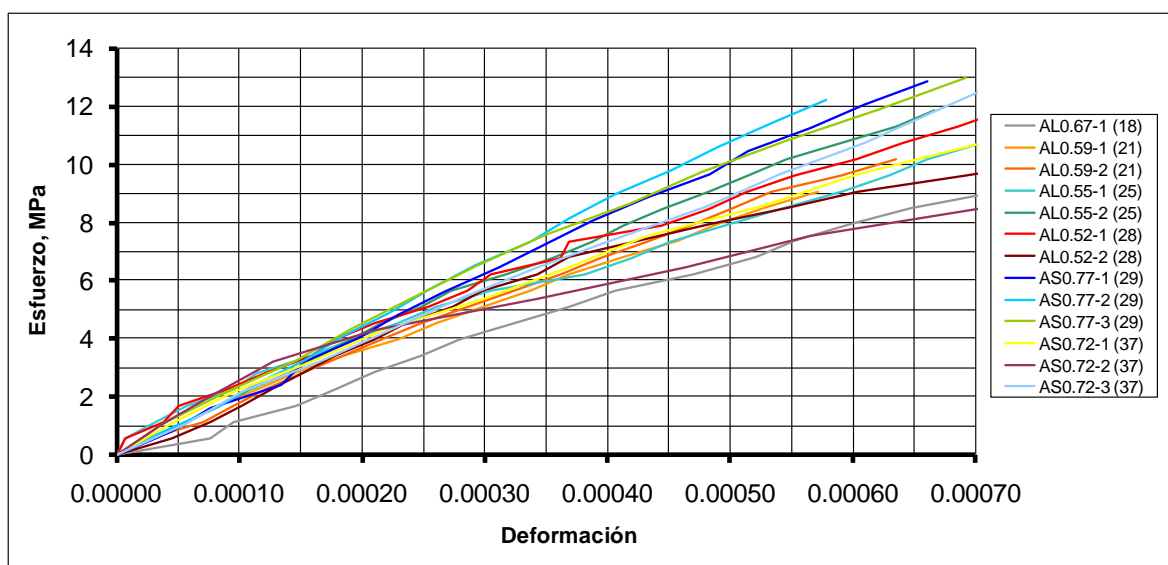


Figura 5.24. Familia de curvas de esfuerzo-deformación para determinar el modulo de elasticidad.

En el caso de los cilindros hechos con ALIVEN, se observa que en general, a medida que el concreto resiste más a la compresión, también aumenta el módulo de elasticidad, tal como se esperaba. De la misma forma, se aprecia una variación importante entre el valor experimental hallado y el teórico de la ACI 318 y de la NSR-10, hallándose diferencias altas, aunque según la ACI 213 R-03, se permiten diferencias de los módulos de elasticidad experimentales y los predichos por la fórmula, hasta de un 20 % para concretos en servicio.

Con respecto a los especímenes de concretos hechos con ALISUR, se aprecia que en el caso de los cilindros con relación a/mc de 0.77, el módulo de elasticidad experimental da bastante parecido a los dos teóricos, caso que no se presenta para el concreto con relación a/mc de 0.72, donde se presentan unas diferencias mayores comparando con la ACI 318 y con la NSR-10. Es de investigar el resultado obtenido para el concreto con relación a/mc de 0.72, ya que presenta un menor módulo de elasticidad que el concreto con relación a/mc de 0.77, a pesar de que el concreto con relación a/mc de 0.72 tiene una resistencia a la compresión mayor que el hormigón con relación a/mc de 0.77.

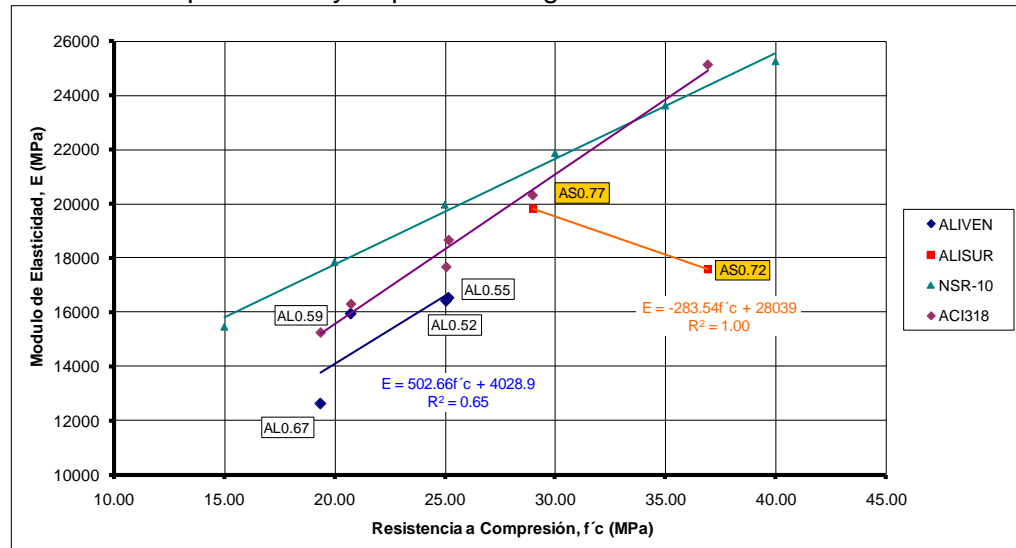


Figura 5.25. Relación Módulo de elasticidad vs Resistencia Compresión.

De la Figura 5.25 se aprecian los límites teóricos de la ACI 318 y de la NSR-10, los cuales se compararán gráficamente con los resultados de ALIVEN y ALISUR. En efecto se ve, que casi todos los puntos experimentales se encuentran cubiertos por el límite del 20% fijado por la ACI 213R03 para concretos en servicio, a excepción del módulo de elasticidad de la relación a/mc de 0.72 para el hormigón con ALISUR.

En general, se observa que los valores de módulo de elasticidad obtenidos tanto para el concreto con ALIVEN como con ALISUR, siempre están por debajo de los teóricos y que los concretos fabricados con ALISUR presentan un mayor módulo de elasticidad que los de ALIVEN, lo cual se puede explicar, debido a probablemente el módulo de elasticidad del agregado ALISUR sea más alto que el del agregado de ALIVEN, por lo que se recomienda un estudio en el cual se determinen el módulo de elasticidad de estos agregados. Es evidente, que efectivamente los concretos livianos presentan un módulo de

elasticidad menor que los concretos de peso normal, tal y como se explica en el apartado 3.3.1.3.

Así mismo, también se aprecia que la curva esfuerzo deformación de estos tipos de hormigones es mas lineal, en comparación con la curva que presentan los concretos de peso normal. Lo anterior se explicaría en el hecho de que hay una mayor compatibilidad entre el agregado liviano y la pasta de cemento, debido a la similitud entre los módulos de elasticidad de ambos y a una probable mejor adherencia entre la pasta de cemento y el agregado liviano. Esta tendencia se comporta según lo que predice la teoría de los hormigones livianos que se explica en el apartado 3.3.1.1.

Con respecto a la relación de Poisson, se realizaron 11 ensayos, 7 para las muestras de hormigón con ALIVEN y 4 para las de ALISUR. Se encontraron los siguientes valores:

No.	f'c Promedio	RELACION DE POISSON							% Rango Diferencia
		EDAD	Esfuerzo a 0.45f'c	Longitudinal a 0.45f'c	ε transversal a 0.45f'c	Poisson Experimental	Poisson Promedio	Poisson Teórico	
AL0.67 (18)	19.3	29	8.49	0.000718	0.000110	0.15	0.15	0.17	10%
AL0.59-1 (21)	20.7	28	9.05	0.000572	0.000102	0.18	0.17	0.17	-2%
AL0.59-2 (21)		28	8.49	0.000502	0.000085	0.17			
AL0.55-1 (25)	25.2	28	11.32	0.000743	0.000110	0.15	0.16	0.17	4%
AL0.55-2 (25)		28	11.88	0.000667	0.000119	0.18			
AL0.52-1 (28)	25.1	28	11.88	0.000724	0.000102	0.14	0.13	0.17	25%
AL0.52-2 (28)		28	12.45	0.001067	0.000123	0.12			
AS0.77-1 (29)	29.0	28	16.18	0.001092	0.000102	0.09	0.16	0.17	5%
AS0.77-2 (29)		28	12.24	0.000578	0.000093	0.16			
AS0.72-1 (37)	36.9	28	12.88	0.000660	0.000085	0.13	0.13	0.17	25%
AS0.72-2 (37)		28	16.18	0.001518	0.000110	0.07			

* Dato atípico descartado.

Tabla 5.22. Datos de Relación de Poisson.

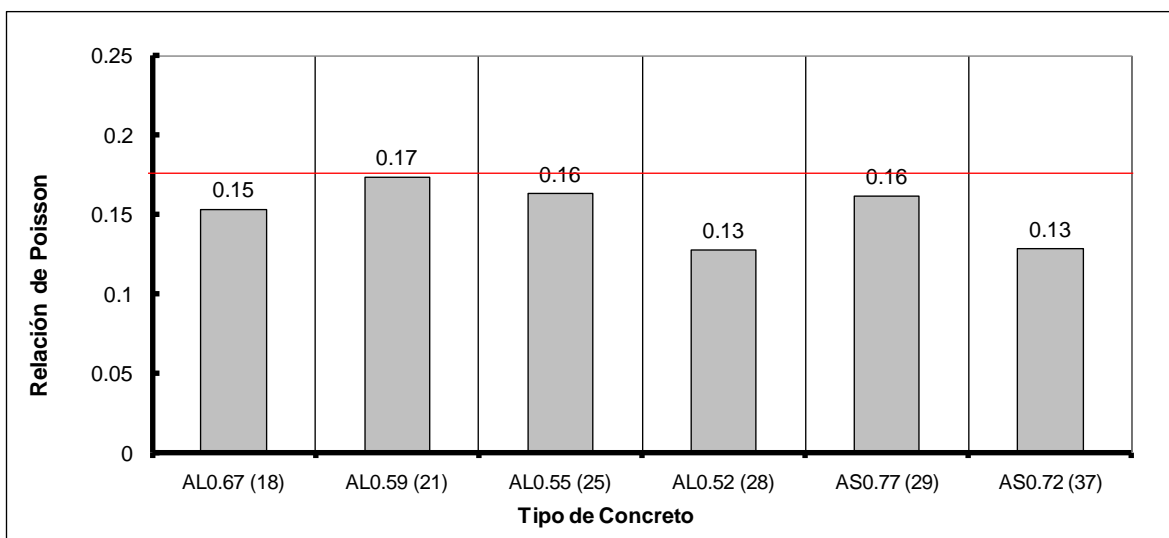


Figura 5.26. Relación de Poisson.

De la Figura 5.26, se ve que al igual que en el caso del modulo de elasticidad, los valores de relación de Poisson son bastante dispersos. En general, se encuentra que los valores de relación de Poisson son mayores para los concretos hechos con ALIVEN, que los hechos con ALISUR. En efecto, estos últimos presentan en algunos casos valores

extremadamente bajos, en comparación a lo que dice la teoría resumida en el apartado 3.3.3.3, que los fija entre 0.15 a 0.20, por lo que estos se consideraron atípicos y se descartaron.

En general, tanto los concretos con ALIVEN como con ALISUR presentan relaciones de Poisson experimentales muy cercanas al límite inferior de esta clase de concreto, es decir 0.15.

5.3.2.6 Ensayo de asentamiento por el cono de Abrams

Este ensayo se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana, NTC 396: “Método de Ensayo para Determinar el Asentamiento del Concreto”. Véase Anexo A.

Para cada mezcla de concreto liviano con ALIVEN y con ALISUR, se realizó el ensayo de asentamiento, por lo que se tuvieron en total 6 datos, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

No. Muestra	Asentamiento cm	Resistencia Compresión, Mpa
AL0.67 (18)	10	19.3
AL0.59 (21)	5	20.7
AL0.55 (25)	3.5	25.2
AL0.52 (28)	2.5	25.1
AS0.77 (29)	12	29.0
AS0.72 (37)	3	36.9

Tabla 5.23. Datos del ensayo de Asentamiento.

De la anterior tabla, se aprecia que con respecto a ALIVEN, el asentamiento tiende a disminuir a medida que la relación a/mc tiende a bajar, como efectivamente lo predice la teoría. A pesar de que estos concretos mostraron en algunos casos valores bajos de manejabilidad por el ensayo de asentamiento, se evidenció de forma práctica que eran mezclas trabajables. La explicación a lo anterior, se centraría en el caso de que los agregados de ALIVEN son muy ligeros, por lo cual este ensayo no es el más apropiado para medir la manejabilidad. De la misma forma, la literatura recomienda asentamientos por cono de Abrams de máximo 10cm, para estos concretos, con el objeto de evitar la segregación por flotación del agregado ligero, lo que se cumple en todos los casos de las mezclas con ALIVEN.

En el caso de los concretos hechos con ALISUR, es apreciable como a pesar de tener relaciones a/mc de 0.77 y 0.72, las cuales son bastante altas y parecidas, la manejabilidad tiende a cambiar drásticamente. Efectivamente, lo anterior se comprobó en las mezclas prueba, en donde para relaciones a/mc más bajas, se encontraron asentamientos de 0 y 1 cm, lo que evidencia que este tipo de concreto tiene un problema de manejabilidad, causado por el agregado liviano utilizado que tiende a dificultarse a medida de que se disminuye el agua en la mezcla. Lo anterior solo se puede solucionar con el empleo de aditivos plastificantes para aumentar la trabajabilidad.

6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de la parte experimental de la investigación, a continuación se enumeran las principales conclusiones relacionadas con el **Concreto Liviano Estructural con Arcilla Expandida Térmicamente del Sur de Bogotá**:

1. **El concreto es liviano.** Esto se argumenta en el hecho de que este hormigón, presenta masas unitarias de equilibrio, alrededor de 1950 kg/m^3 , valor que es bastante inferior a la masa unitaria de los concretos de peso normal, lográndose una disminución en peso entre un 15 y 20% con respecto a este último. Adicionalmente, este valor es bastante aceptado entre la comunidad de ingenieros, como un límite máximo de un concreto liviano estructural.
2. **El concreto es estructural.** Se encontraron en los concretos estudiados, resistencias a la compresión a los 28 días de 29 y 37 MPa para relaciones a/mc de 0.77 y 0.72, respectivamente; las cuales son muy superiores a la mínima requerida por la normativa ACI 213R-03 (17.5 MPa) para clasificarlo como hormigón estructural. Así mismo, estas resistencias alcanzadas superan el mínimo valor de resistencia a la compresión (21 MPa) especificado por la NSR-10, para ser utilizado en sistemas sismo-resistentes.
3. Al igual que otros concretos livianos, el concreto fabricado con ALISUR, presenta problemas de **manejabilidad** para relaciones a/mc bajas y medias. En el caso de relaciones a/mc altas, como en la presente investigación, la fluidez de la mezcla permitió una adecuada trabajabilidad. En general, se recomienda el uso de aditivos plastificantes para este tipo de concreto.
4. Los ensayos de **absorción y porosidad** de los concretos hechos con ALISUR, sugieren la probabilidad de que la durabilidad de estos concretos no sea la requerida. Aunque, lo anterior se explica en el hecho de que son hormigones que se fabricaron con relaciones a/mc bastante altas, buscando obtener una adecuada manejabilidad. En el caso, de que se requiera un concreto con mejores características de durabilidad, se deberá disminuir la relación a/mc tanto como amerite el tipo de ambiente al que se encuentre expuesto el material, obteniendo predominancia de la durabilidad sobre la resistencia mecánica.
5. Respecto al **Modulo de Elasticidad**, se encontró que este concreto presenta valores experimentales menores a los predichos por las formulaciones teóricas de la ACI 318 y de la NSR-10. En algunas ocasiones estas diferencias son bastante altas como es el caso del concreto con relación a/mc de 0.72. En general, la fórmula teórica que más se aproxima al valor experimental del modulo de elasticidad corresponde a aquella que involucra a la masa unitaria seca y a la resistencia a la compresión para su determinación.
6. Se corroboró que la **resistencia a la tensión** de este concreto, está por encima de la mínima especificada por la NTC 4045. Así mismo, la relación f_t/f'_c se ubica

alrededor de un 8.2%, valor que es inferior al de los concretos de peso normal (10-15%), pero que se justifica por la gran resistencia a la compresión que desarrolla.

7. Se encontró que este hormigón presenta valores de **relación de Poisson** dentro de los límites normales teóricos (0.15-0.20), pero que tienden hacia el límite inferior de 0.15.
8. Desde el punto de vista comercial, se puede afirmar que los concretos con arcilla calcinada, presentan una viabilidad de ser desarrollados y de llegar a ser competitivos en cuanto a precio, debido a las siguientes razones:
 - Para lograr una determinada resistencia, estos concretos disponen en su dosificación, de una menor cantidad de cemento con respecto a un concreto tradicional y como se sabe, el cemento corresponde al componente más costoso del hormigón.
 - El proceso de fabricación industrial del agregado liviano se fundamenta en la utilización de arcilla calcinada, es decir que no se necesitan canteras con arcillas de propiedades especiales, ya que bastan depósitos de arcillas que sean destinados al sector de la construcción, los cuales son abundantes.
 - La fabricación del agregado calcinado se produce industrialmente en grandes hornos rotarios a temperaturas entre 1200 y 1300 °C, similares a los que se utilizan en la industria cementera, por lo que el precio de la producción del agregado liviano estaría dentro de límites admisibles.

A continuación se procede a dar las conclusiones respecto a la comparación de los **concretos livianos hechos con ALIVEN y los fabricados con Arcillas del Sur de la Sabana de Bogotá.**

1. Se comprobó que los agregados absorbentes y porosos, producen concretos livianos con moderada capacidad estructural, debido a la baja resistencia propia que estos áridos presentan. Igualmente, se verificó que la resistencia del agregado influye notablemente en la resistencia del concreto resultante y en general en todas las propiedades del hormigón. En general, se encontró que el agregado ALISUR se comporta mejor que el de ALIVEN, para requisitos de resistencias mecánicas.
2. A pesar de que las mezclas de concreto con ALIVEN tuvieron menores relaciones a/mc que la de los hormigones con ALISUR, presentaron resistencias a la compresión inferiores que las de estos últimos. Lo anterior evidencia que los concretos hechos con ALISUR permiten cumplir con relativa facilidad resistencias a la compresión por encima de 21 MPa para relaciones a/mc altas.
3. Se corroboró que los concretos hechos con agregados con bajas resistencias propias, como es el caso del agregado ALIVEN, fallan por el agregado. En

contraste, agregados como el ALISUR, que tienen mayor capacidad mecánica, presentan una falla combinada de agregado e interfase pasta de cemento y agregado, donde la proporción de cada una dependerá de la calidad del mortero utilizado en la dosificación.

4. Con respecto a la masa unitaria, se encontró que el concreto hecho con ALIVEN presenta menores masas unitarias que el del concreto fabricado con ALISUR. No obstante, estas diferencias no superan los 100 kg/m^3 , lo que permite inferir que la relación resistencia-peso es mejor para los concretos de ALISUR que los de ALIVEN.
5. Se evidenció que las mezclas de concreto con ALIVEN, presentan una tendencia general de aumento de resistencia a la compresión, en la medida que la masa unitaria crece. Esto está en concordancia con la teoría para concretos de este tipo. Este comportamiento no se observó en el caso de concretos con arcillas del sur de Bogotá, debido a que se utilizó la metodología ACI 211.2-98, por lo que las dos mezclas ensayadas presentaron igual peso fresco, a pesar de tener una dosificación de materiales distinta.
6. Se encontró que los concretos con ALISUR presentan una mayor tasa de ganancia de resistencia en el tiempo que los de ALIVEN. Lo anterior estaría asociado a que el agregado ALISUR aporta mayores resistencias que el ALIVEN, a la capacidad mecánica final del concreto.
7. Se hizo evidente que el concreto con ALISUR presenta un mayor modulo de elasticidad que el hormigón fabricado con ALIVEN. Lo anterior se debería al modulo de elasticidad del agregado liviano, que sería más alto para el agregado tipo ALISUR que para el árido tipo ALIVEN.
8. A pesar de que el concreto con ALIVEN tenía relaciones a/mc menores que las utilizadas en los concretos con arcillas del sur de Bogotá, no se presentó una disminución importante en la absorción de agua de estos hormigones. Esto evidencia que la absorción en el concreto depende tanto de la calidad de la pasta cementante como del agregado utilizado.
9. No se encontró una relación constante entre la resistencia a la compresión y la relación a/mc para los concretos de ALIVEN. Esto estaría asociado a la variabilidad del agregado liviano utilizado, ya que algunos son más porosos y absorbentes que otros.
10. Finalmente, se hace evidente que los concretos livianos presentan mayores dispersiones en los resultados que los de peso normal.

En seguida se muestran las conclusiones respecto a los **agregados livianos** utilizados:

1. Se verificó que la mezcla de un agregado liviano en una proporción de un 60% tamaño fino (5 a 10mm) y un 40% tamaño medio (10 a 15mm) permite lograr una granulometría adecuada, cumpliendo los requisitos de la NTC 4045 y garantizando un buen funcionamiento en el hormigón.
2. Se encontró que el agregado ALIVEN presenta una mayor porosidad y absorción que el de ALISUR. Estas propiedades se encuentran directamente influenciadas por el proceso de fabricación del agregado

Respecto al proceso para obtener **arcillas expandidas térmicamente**, la investigación arrojó las siguientes conclusiones:

Se encontró que no todas las arcillas tienen capacidad de expansión por temperatura. Así mismo, se confirmó que la composición química de la arcilla da una idea inicial de la aptitud al hinchamiento de este material, la cual se confirma con un estudio mineralógico, con el objeto de determinar si las arcillas poseen minerales arcillosos con capacidad de expandir.

Se obtuvo que las arcillas aptas a la expansión, tienden a expandir más a medida que la temperatura de quema se acerca a su temperatura de fusión. De la misma forma, se obtuvo que el procedimiento de quema rápida es el que mejores resultados de expansión presenta y que los gránulos presentan un mayor aumento de volumen, para tamaños menores a 12mm.

Las razones de la diferencia de expansión entre las Arcillas Expandidas Térmicamente (AET) comerciales y las arcillas tratadas en el presente documento, se fundamentan en el proceso de quemado del material. En ese sentido, la máxima expansión de las arcillas se originará por un procedimiento de quema rápida que produzca un choque térmico en la arcilla y por la inclusión de agentes expansores en las mismas.

7. RECOMENDACIONES

La presente investigación arrojó algunas inquietudes, que no fueron resueltas en este trabajo, debido a que no eran objeto del mismo. Algunas de estas, relacionadas con la parte de Arcillas Expandidas Térmicamente, son las siguientes:

- Se recomienda estudiar las características de expansión de las arcillas en un horno rotatorio apropiado, que permita producir un choque térmico, que garantice la máxima expansión.
- Se recomienda estudiar las características de expansión de arcillas adicionadas con agentes promotores del hinchamiento en el material a diferentes temperaturas, con el objeto de establecer el punto de fusión de las arcillas adicionadas y la temperatura adecuada para la mayor expansión.

Se sugiere la realización de las siguientes investigaciones, relacionadas con concreto liviano y las arcillas calcinadas que lo conforman:

- Estudiar las propiedades mecánicas de un concreto liviano, realizado con arcilla calcinada de alguna cantera comercial, con diferentes relaciones a/mc y empleo de plastificantes, con el objeto de conocer el comportamiento del hormigón en su manejabilidad, resistencia y durabilidad.
- Verificar y analizar las características de retracción y fluencia de estos tipos de hormigón y su influencia en los elementos estructurales.
- Estudiar las propiedades de resistencia y durabilidad de concretos livianos adicionados con diferentes adiciones cementantes, como humo de sílice o cenizas volantes.
- Ensayar concretos con aditivos incorporadores de aire y reductores de agua de alto rango, con el objeto de optimizar las características del material.
- Estudiar la obtención, el diseño y el comportamiento de los concretos livianos de alta resistencia para elementos estructurales verticales y horizontales.
- Desde el punto de vista industrial, es conveniente estudiar la bombeabilidad de los concretos con agregados livianos.
- Estudiar los efectos del no curado en esta clase de concretos.
- Realizar un estudio de los módulos de elasticidad de los agregados livianos.
- En concretos livianos con agregados altamente absorbentes, estudiar el efecto del curado interno en el hormigón.
- Estudiar la exudación del concreto para diferentes relaciones a/mc.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGRAMATI LANDSBERGER, Galit. Estudio sobre la capacidad de los modelos de cálculo de la fluencia y retracción al hormigón autocompactable. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- [2] ALIVEN. Obtenido el 05 de mayo de 2008 en <http://www.aliven.com.ve/>
- [3] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.2-98. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. Reported by ACI Committee 211. 2004.
- [4] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 213R-03. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. Reported by ACI Committee 213. 2003.
- [5] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario. Producido por el Comité 318. 2008.
- [6] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM 642-06. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. 2006.
- [7] ARCILLEX. Obtenido el 02 de enero de 2010 en <http://arcillex.com.ar/superlec.htm>
- [8] ARLITA. Obtenido el 02 de enero de 2010 en <http://www.maxit.es>
- [9] ATCIN, P.-C. High Performance Concrete. Modern Concrete. E & FN Spon. Université of Sherbrooke, Québec, Canada. 1998.
- [10] BASHEER, P. A. M. A Brief Review of Methods for Measuring the Permeation Properties of Concrete In-Situ. En: Building and Structures, Institution of Civil Engineers, Feb 1993. 74-83 p.
- [11] BILODEAU, A., and HOFF, O. Proc. Int. sym. Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sanderfjord, Norway, (I. Haland, T.A. Hammer, and F. Fluge, eds.) p. 363 (1995).
- [12] BILODEAU, A; CHEVRIER, R; y MALHOTRA, M. Mechanical Properties, Durability and Fire resistente of High Strength Lightweight Concrete, Int Symp. Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp. 432-443, Sandefjord, Norway (1995).
- [13] CABALLERO SEGURA, Iván Alberto. Desarrollo de Resistencia a Compresión de Concretos Adicionados con Ceniza Volante. Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., 2001.
- [14] CASTELLS, Xavier Elías. Árido ligero expandido a base de residuos: aspectos técnicos y económicos. Bolsa de Subproductos de Cataluña. Barcelona, junio de 2000. Revista de Subproductos Industriales de Colombia. Marzo de 2001. No. 2.

- [15] CEDEÑO, Jorge; CUELLAS, Paul; IZURIETA, Oswaldo. Fisuras por retracción en el hormigón. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.
- [16] Centro de Investigaciones en Tecnología del Hormigón-CIATH. Composición del hormigón liviano estructural. Córdoba, Argentina.
- [17] CHANDRA, Satish y BERNTSSON, Leif. Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications. Chalmers University of Technology de Suecia. Noyes Publications. Norwich, New York, U.S.A. 2002.
- [18] COMISIÓN DE MATERIALES DEL COMITÉ ESPAÑOL DEL C.E.B. Recomendaciones para hormigones estructurales de áridos livianos.
- [19] COMMITTEE ACI 201.25.
- [20] CRUZ, Gabriel; BUNCUGA, Verónica; CAHUAPE, Marina; FORGIONE, Fabricio; NAVARRETE, Arnoldo. HORMIGONES CON AGREGADOS LIVIANOS. Facultad de ciencias exactas y agrimensura – U.N.R. Buenos Aires, 2003.
- [21] CUBAUD, J. C. y MURAT, M. Fabricación industrial de arcilla expandida. Materiales de construcción. N° 133, pp. 5-16. Madrid, Ene - Mar 1969.
- [22] DE SUAZA SANTOS, Pérsio. Argilas para a fabricação de agregados leves. En: Tecnologia de argilas - aplicada ás argilas Brasileiras. Cap 20, pp 439-467. São Paulo, Fevereiro do 1972.
- [23] ESCSI. Internal Curing Using Expanded Shale, Clay and Slate Lightweight Aggregate. Publication # 4362. July, 2006.
- [24] ESPITIA, Carlos; QUINTERO, Javier; RODRIGUEZ, Antonio; BERNAL, Flor; ROMERO, Freddy; MOJICA, Jaime; CABEZAS, Hernán; PACHÓN, Marcela; MÚNERA, María; RAMÍREZ, Jairo. Catálogo De Propiedades Físicas, Químicas Y Mineralógicas De Las Arcillas Para Cerámica Roja En Los Centros Urbanos De Medellín, Ibagué Y Sabana De Bogotá. Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS. Bogotá, Marzo 2003.
- [25] EUROLIGHTCON. LWAC Material Properties State of the Art. European Union. Document BE96-3942/R2, December 1998.
- [26] GRAF, Alejandro. Características del concreto Bombeable. Revista IMCYC, Vol. X, No. 56, mayo-junio 1972.
- [27] GRASES, José; RAMOS, Carlos. Presente y futuro en el desarrollo de los concretos livianos. Boletín IMME-Año VI, No 22, Abril-Junio, 1968.

- [28] FAUST, T., Properties of Different Matrices and Lightweight Aggregate Concrete, Proc. 2nd Int. Symp. Structural Lightweight Aggregate Concrete 2000, Kristiansand, Norway, pp 502-511 (Jun. 2000).
- [29] FORNASIER, Gaston y FAVA, Carlos. Ensayo Rápido de Permeabilidad al Ion Cloruro: Evaluación de Hormigones con Escoria de Alto Horno. Buenos Aires, Loma Negra. 9 p.
- [30] GARCIA GONZALES, Germán Jair. Concreto Estructural aligerado con perlas de poliestireno preexpandido. Universidad Pontificia Javeriana. 1998.
- [31] GARCIA ROMERO, Emilia y SUÁREZ BARRIOS, Mercedes. Las arcillas: Propiedades y usos. Universidad Complutense. Madrid (España).
- [32] GIRALDO CÁRDENAS, Karyn Alexandra. Estudio Experimental sobre la expansión térmica de arcillas. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2004.
- [33] GOMEZ, José Gabriel. Materiales para Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., 2001.
- [34] GONZALES, Enrique. Control de hormigones livianos. Hormigón y Acero. Núms. 228-229, 2do y 3er trimestre 2003.
- [35] GONZALEZ-ISABEL, Germán. Hormigón de Alta Resistencia. Intemac. Madrid, 1993.
- [36] GUEVARA, Diana; LIZARAZO, Vilma. Estudio de los procesos para la obtención de Concretos Livianos. Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero Químico. Universidad Nacional de Colombia. Bogota D.C., 1999.
- [37] HELENE, Paulo Roberto. Proyectar para la durabilidad. Seccional Colombiana de la American Concrete Institute. Traducido por el Ing. Carlos A. Arcila López.
- [38] HELLAND, S and MAAGE, M. Strength loss in unremixed LWA-Concrete, Proc. Int. Symo. Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sanderfjord, Norway, (Holand, et al., ed.) pp. 533-540 (Jun. 20-24,1995).
- [39] HERNÁNDEZ OSORIO, Oscar. VÁSQUEZ ARDILA, Luís Manuel. Proceso para fabricar agregados livianos a baja temperatura. Patente publicada en World Intellectually Property Organization.
- [40] HOLM, T.A., Bremner, T.W., y Vaysburd, A. Carbonation of Marine Structural Lightweight Concrete, 2nd Int. Con. Performance of concrete in Marine Environment, p. 11, St. Andrews, N. B., Canada, ACI, SP 109, (Aug. 21-26, 1988).

- [41] HOU HUANG, Diana Elizabeth; Caicedo, José Luis; FALCONI, Alberto Augusto. Hormigones Livianos de Alto Desempeño. Revista Tecnológica ESPOL. Guayaquil, Ecuador.
- [42] HUMMEL, Alfred. Prontuario del Hormigón. Editores Técnicos Asociados, da edición, Barcelona, España, 1966, pp 3-37, 245-261.
- [43] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 92. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. 1995.
- [44] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 237. Método para determinar la densidad y absorción del agregado fino. 1995.
- [45] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 722. Método de Ensayo para determinar la Resistencia a la Tensión Indirecta de Especímenes Cilíndricos de Concreto. 2000.
- [46] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 673. Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros Normales de Concreto. 1995.
- [47] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 1486. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. 2008.
- [48] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 4022. Masa Unitaria de Concreto Liviano Estructural. 1994.
- [49] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 4025. Método de Ensayo para Determinar el Modulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson en Concreto a Compresión. 2006.
- [50] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 4045. Agregados Livianos para Concreto Estructural. 1997.
- [51] INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS. Obtenido el 03 de enero de 2010 en http://www.tdr.cesca.es/TDX/TDR_UC/TESIS/AVAILABLE/TDR-1026105-172303/1de5.VKcap1.pdf
- [52] JOVANE, Manuel. Comparación de permeabilidad en el concreto mediante ensayos de sortividad y permeabilidad superficial inicial. Tesis de Maestría en estructuras. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. 2009.
- [53] LECA. Obtenido el 02 de enero de 2010 en <http://en.wikipedia.org/wiki/LECA>
- [54] LEY DE BRAGG. Obtenido el 15 de enero de 2010 en http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Bragg

- [55] LIZARAZO, Juan. Ensayos Típicos en la determinación de la durabilidad del concreto. Grupo de Investigación en Análisis y Diseño. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [56] LOPEZ, Mauricio*; KAHN, Lawrence F**. Hormigón Liviano de alto desempeño - una comparación entre pérdidas de pretensado reales y estimadas por los códigos de diseño.*Pontificia Universidad Católica de Chile, CHILE; **Georgia Institute of Technology, EEUU. Agosto, 2006.
- [57] MARTIN, Isabel Gayo. Características Técnicas y aplicaciones con hormigón liviano. Hormigón y Acero. Núms. 228-229, 2do y 3er trimestre 2003.
- [58] MOJICA, J. J. Ipus. PÉREZ ALCÁZAR, G. A. Caracterización de arcillas colombianas por espectroscopia Mössbauer y difracción de rayos-x. Revista colombiana de física, vol. 37, no. 1, 2005. Cali.
- [59] NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. Noriega Editores. México, 1988.
- [60] NEVILLE, A. M. y BROOKS, J. J. Tecnología del concreto. Editorial Trillas. México, 1998.
- [61] NORMA SISMO-RESISTENTE COLOMBIANA. NSR-10.
- [62] PARRA HENAO, Diana Lucia. Estudio preliminar de expansión térmica de arcillas a escala de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia –Sede Medellín-. Facultad Nacional de Minas. Medellín, 2000.
- [63] PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Structural Lightweight Concrete. Design and Control of Concrete Mixtures. Capítulo 13, T 12-11, edición de Julio de 1968.
- [64] PELLICER, Domingo. El hormigón liviano. Capítulo D: Otros materiales de construcción.
- [65] RODRIGUEZ, Luis Fernando. Agregados Livianos como sustitutos de los agregados tradicionales de la zona centro. Argos. Bogotá, septiembre 2007.
- [66] RODRÍGUEZ MORENO, Mario Alberto. Estabilización de Bases granulares con ceniza y cal. Universidad de los Andes.
- [67] R. Calvet, R. Prost; Clays Clay Min., 19 (1971) 175.
- [68] ROSSIGNOLO, Joao; AGNESINI, Marcos; MORAIS, Jerusa. Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. University of Sao Paulo. Brasil, 2000.
- [69] RUIZ CAMPO, Alicia. Origen, Formación y Comportamiento de la Arcilla de Bogotá. Proyecto de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., 2006.

- [70] SALAZAR, Edward. Conceptos básicos de geología de arcillas y preparación y montaje de arcillas en lámina orientada y polvo total. Ingeominas. Bogotá, 2009.
- [71] SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. Biblioteca de la Construcción. Bhandar Editores. Bogotá, 2001.
- [72] SENDRA, José. Dosificación y fabricación de hormigones livianos. Hormigón y acero. 2003.
- [73] SCHELLMANN W., FASTABEND H. Investigaciones de laboratorio para la apreciación de las arcillas dilatadas. En: Materiales de construcción. N°147, pp. 5-19. Madrid, Jul - Sep 1972.
- [74] SHETTY M.S. Concrete Technology. S. Chand & company Ltd. Ram Nagar, New Delhi. 2005.
- [75] SHORT, Andrew. Concreto liviano: cálculo, fabricación, diseño y aplicaciones”, Editorial Limusa, México, 1967.
- [76] SCHLUBACH, Carlos. Hacia la introducción de concretos livianos en Colombia. Reunión del Concreto 1988. Agosto 10, 11 y 12. Cartagena, 1988.
- [77] STRUNGE, H., and CHATTERJI, S., Microscopic Observations on the mechanism of concrete Neutralization, Durability of concrete, aspects of admixtures and industrial By-products, 2nd Int. seminar, Chalmers university of Technology, Doc, D9-1989, p.229, Swedish Council of Building Research, Stockholm (1989).
- [78] VALDERRAMA, Patricia. Evaluación del desempeño durable de concretos adicionados con cenizas volantes. Tesis de Maestría en Estructuras. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. 2009.
- [79] VIDELA, Carlos; LOPEZ Mauricio. Dosificación de Hormigones Estructurales con Áridos Livianos. Revista Bit. Diciembre 2000. Chile.
- [80] VIEIRA DE SOUZA, Jefferson e BERGSTRÖM LOURENÇO, Oscar. Notas preliminares sobre o emprego de argilas e folhelho do recôncavo do estado da Bahia para a fabricação de agregados leves. Instituto Brasileiro do concreto - IBRACON. São Paulo, 1973.
- [81] VIRELLA, Alberto. Áridos de arcilla expandida. Sección Hormigón. Número 503, 1976.
- [82] WEIGER, Helmut y KARL, Sieghart. Hormigones Livianos Armados. Editorial Gustavo Gilí. Barcelona, 1974.

ANEXOS

ANEXO A:

RESUMEN DE ALGUNAS DE LAS NORMAS APLICADAS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS ENSAYOS

A.1. ENSAYOS SOBRE ESPECIMENES DE CONCRETO

A.1.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El ensayo más universalmente reconocido para ejecutar pruebas de resistencia mecánica a la compresión simple de cilindros es el ensayo de probetas cilíndricas, las cuales se funden en moldes especiales de acero o hierro fundido que tienen 150 mm de diámetro por 300 mm de altura (relación diámetro 1:2). Los procedimientos relativos a este ensayo se encuentran especificados en las normas NTC 550 y 673 que hacen referencia a la confección de los cilindros y el ensayo de resistencia a la compresión, respectivamente. A continuación se describen brevemente.

Una vez que la muestra de concreto fresco ha sido correctamente seleccionada de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma NTC 454 (hormigón fresco-toma de muestras), de manera que sea representativa de toda la masa, se procede de la siguiente manera:

Antes de colocar el concreto en el molde, es necesario aceitar el interior del cilindro para evitar que el concreto se adhiera al metal; para hacer ésto, es suficiente untar las paredes y el fondo con una brocha impregnada de aceite mineral; la capa de aceite debe ser delgada y en el fondo no se debe acumular aceite.

El cilindro se llena en tres capas de igual altura (10cm) y cada capa se apisona con una varilla lisa de 16mm (5/8") de diámetro, con uno de sus extremos redondeados, la cual se introduce 25 veces por capa en diferentes sitios de la superficie del concreto teniendo cuidado de que la varilla sólo atraviese la capa que se está compactando, sin pasar a la capa siguiente. Al final de la compactación se completa el llenado del molde con más mezcla y se alisa la superficie con la ayuda de un palustre o de una regla.

Una vez que se ha llenado cada capa, se dan unos golpes con la varilla o con un martillo de caucho a las paredes de éste, hasta que la superficie del concreto cambie de mate a brillante, con el objeto de eliminar las burbujas de aire que se hayan podido adherir al molde o hayan quedado embebidas en el concreto.

Los cilindros recién confeccionados deben quedar en reposo, en sitio cubierto y protegidos de cualquier golpe o vibración y al día siguiente (20+/- 4 horas después de elaborados) se les quita el molde cuidadosamente.

Inmediatamente después de remover el molde, los cilindros deben ser sometidos a un proceso de curado en tanques de agua con cal, o en un cuarto de curado a 23°C +/- 2°C, con el fin de evitar la evaporación del agua que contiene el cilindro, por la acción del aire o del sol, y en condiciones estables de temperatura para que el desarrollo de resistencia se lleve a cabo en condiciones constantes a través del tiempo. En estas condiciones, los cilindros deben permanecer hasta el día del ensayo.

La resistencia a la compresión del concreto se mide con una prensa que aplica carga sobre la superficie superior del cilindro (Norma NTC 673). Generalmente esta superficie es áspera y no plana, lo cual puede conducir a concentraciones de esfuerzo que reducen considerablemente la resistencia real del concreto. Una falta de planicie de 0.25mm puede reducir en un tercio la resistencia. Para remediar esta situación, normalmente se hace un refrentado o cabeceado de las tapas del cilindro con materiales como yeso o mezclas compuestas de azufre, tal como se especifica en la norma NTC 504. La resistencia a la compresión, como ya se mencionó, se acostumbra a dar en términos de esfuerzo, o sea fuerza por unidad de área, en kg/cm², con aproximación de 1 kg/cm².

D.1.2. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.

La resistencia a la tracción es difícil de medir por medio de ensayos indirectos, debido a las dificultades para montar las muestras y las incertidumbres que existen sobre los esfuerzos secundarios inducidos por los elementos que sujetan las muestras.

Para evitar este problema, L. Carneiro y A. Bercellos desarrollaron en Brasil un método indirecto llamado "Tensión Indirecta" o ensayo brasilero en honor a ellos, aunque independientemente también se desarrolló en Japón. En este método la resistencia a la tracción (T) es determinada cargando a compresión el cilindro convencional de 15x30cm a lo largo de dos líneas diametralmente opuestas (acostado). El Icontec ha estandarizado este ensayo en su norma 722 (ASTM C-496) y la resistencia a la tracción indirecta se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$T = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Donde:

T= Resistencia a la tracción indirecta en kg/cm²

P= Carga máxima aplicada en kg.

L= Longitud del cilindro en cm.

D= Diámetro del cilindro en cm.

Sin embargo, esta resistencia T, aparentemente de acuerdo con algunas investigaciones, es aproximadamente un 15% más allá que la determinada por ensayos de tracción directa.

D.1.3. ENSAYO DE ASENTAMIENTO.

Este ensayo se encuentra especificado en la NTC 396, también se denomina ensayo de cono de Abrams y se resume a continuación en el siguiente procedimiento:

3. El cono de Abrams se prehumedece y se coloca sobre una superficie plana, húmeda y no absorbente.
4. El molde se coge por las agarraderas y se presiona hacia abajo, posteriormente se introduce una primera capa –de tres- de concreto con una altura de un tercio del molde, se apisona 25 veces con una varilla lisa de 5/8” de más o menos 60 cm de largo y con un elemento apropiado se golpea exteriormente de forma suave, con el objeto de sacar las burbujas de aire en la mezcla.
5. Se introduce una segunda capa de concreto y se realiza el mismo procedimiento del paso 2.
6. Se introduce la tercera y última capa de concreto, se procede como en el paso 1 y posteriormente con un elemento se enrasa la superficie de arriba del cono.
7. Finalmente, el molde se retira y la diferencia entre la altura del molde y la altura medida sobre el centro original de la base superior del concreto abatido se llama asentamiento.

A.2. ENSAYOS SOBRE AGREGADOS LIVIANOS

A.2.1. ENSAYO DE MASA UNITARIA EN AGREGADOS (NTC 92- ASTM C29).

La Norma Técnica Colombiana NTC 92 especifica que: *“el procedimiento por paleo debe ser usado para la determinación de la masa unitaria suelta. Por otro lado, la masa unitaria compacta debe determinarse por el procedimiento de apisonamiento para agregados con tamaños nominales de 37.5 mm (1 ½”) o menores, o por el procedimiento de golpeteo para agregados que tienen un tamaño nominal superior a los 37.5 mm (1 ½”) y que no exceda los 150 mm (6”)”*.

A.2.1.1. Masa Unitaria Suelta

De acuerdo con lo anterior, para determinar la masa unitaria suelta se procede a describir el procedimiento del paleo.

Procedimiento por paleo.

- Se llena completamente el molde por medio de una pala o cuchara, descargando el agregado desde una altura que no exceda los 50 mm sobre el borde del molde. Se prevé, en lo posible, la segregación de los tamaños de las partículas que componen la muestra.

Se nivela la superficie del agregado con los dedos o con una plantilla recta de tal forma que las partes sobresalientes de las partículas más grandes que conforman el agregado grueso compensen aproximadamente los vacíos dejados en la superficie bajo el borde del molde.

- Se determina la masa del molde más su contenido y la masa del molde por separado. Se registran los valores con una precisión de 0.05 kg.

Cálculos

Se realizan utilizando la siguiente fórmula, con la condición explícita que es para agregados en condición de secado al horno.

$$Masa\ Unitaria\ Agregado = \frac{Masa\ Agregado\ más\ molde - Masa\ molde}{Volumen\ molde}$$

A.2.1.2. Masa Unitaria Compacta

- Se llena una tercera parte del molde y se nivela la superficie con los dedos. Se apisona la capa del agregado con 25 golpes de la varilla de apisonamiento, distribuidos uniformemente sobre la superficie. Luego se completan las dos terceras partes del molde y se nivela y se apisona nuevamente. Finalmente, se llena el molde completo y se apisona de nuevo en la forma antes descrita. Se nivela la superficie del agregado con los dedos o con una plantilla recta de tal forma que las partes sobresalientes de las partículas más grandes que conforman el agregado grueso compensen aproximadamente los vacíos dejados en la superficie bajo el borde del molde.

- En el apisonamiento de la primera capa, no se debe permitir que la varilla de apisonamiento golpee el fondo del molde. En el apisonamiento de la segunda y tercera capas, se aplica un esfuerzo vigoroso, pero no tan exagerado que cause la penetración de la varilla de apisonamiento en la capa previa del agregado.

- Se determina la masa del molde más su contenido y la masa del molde por separado. Se registran los valores con una precisión de 0.05 kg. Los cálculos se realizan utilizando la misma fórmula que para masa unitaria suelta.

ANEXO B:

**PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE MEZCLAS DE
CONCRETOS LIVIANOS POR LOS MÉTODOS DEL ACI
211.2 Y DE CHANDRA Y BERNTSSON**

ANEXO B. PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETOS LIVIANOS POR LOS METODOS DE LA ACI 211.2 Y DE CHANDRA Y BERTSSON

A continuación se procederá a explicar los métodos: ACI 211.2 y de Chandra & Bertsson, los cuales se utilizan para determinar dosificaciones de concretos livianos estructurales.

B.1. Método ACI 211.2

En el presente apartado se va a explicar el método 1 del ACI 211.2, es decir, el método del peso o de gravedad específica por picnómetro. Este procedimiento se aplica para mezclas de concreto que tienen agregado grueso ligero y agregado fino de peso normal. En la sección 2.3.1 de la norma ACI 211.2, se define al método de la gravedad específica como aquel que: *“consiste en determinar el proporcionamiento del concreto liviano en base a una relación aproximada de agua-material cementante (a/mc), relacionando esta con la absorción de los agregados livianos. Este método se basa en el hecho de que la suma de los pesos por unidad de volumen de todos los ingredientes en la mezcla es igual al peso total de la misma mezcla. Si el peso del concreto especificado por unidad de volumen, el cual contiene un agregado particular, es conocido o puede ser estimado del factor de gravedad específica del agregado, el peso de los agregados livianos en ese volumen de concreto puede ser determinado”*. El procedimiento se explica a continuación:

Paso 1: Selección del asentamiento en cono de Abrams.

La selección del asentamiento se acostumbra a ser seleccionada de acuerdo con la obra a realizar. Sánchez de Guzmán [71] da como referencia la siguiente tabla:

Tipo	Consistencia	Asentamiento, mm		Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de Colocación	Sistema de Compactación
		Lim. Inf.	Lim. Sup.			
1	Muy seca	0	20	Prefabricados de alta resistencia, pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta, concretos de proyección neumática (Lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerir presión
2	Seca	20	35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
3	Semi-seca	35	50	Pavimentos, fundaciones en Concreto Simple	Colocación con máquinas operadas manualmente.	Secciones simplemente reforzadas con vibración

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

4	Media	50	100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas	Manual	Secciones medianamente reforzadas sin vibración
5	Húmeda	100	150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones muy reforzadas sin vibración
6	Muy Húmeda	150	> 150	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo, Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (no adecuadas para vibrarse).

Tabla B.1. Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación [5].

Paso 2: Selección del tamaño máximo del agregado.

El tamaño máximo del agregado está constituido entre 3/8" (9.5 mm), 1/2" (12.7 mm) y 3/4" (19 mm). Se ha encontrado experimentalmente que se debe limitar el tamaño máximo nominal del agregado liviano a 20 mm, por razones de durabilidad y de manejabilidad.

Paso 3: Estimación del contenido de aire.

Se ha determinado que desde la operación de mezclado queda aire naturalmente atrapado en el concreto; estos valores fluctúan entre un 0.5 y 2% del volumen total del hormigón, dependiendo de las condiciones de colocación y compactación.

Tamaño Agregado	3/8 in.	1/2 in.	3/4 in.
	(9.5 mm)	(12.7 mm)	(19.0 mm)
Contenido de aire-incorporado			
	Agua, kg/m ³ de concreto		
Asentamiento, 1 a 2 in. (25 a 50 mm)	181	175	166
Asentamiento, 3 a 4 in. (75 a 100 mm)	202	193	18
Asentamiento, 5 a 6 in. (125 a 150 mm)	211	199	187
	Promedio recomendado** de contenido de aire total, %, por nivel de exposición		
Exposición ligera	4.5	4.0	4.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0
Exposición severa***	7.5	7.0	6.0
Concreto con aire-no incluido			
Asentamiento, 1 a 2 in. (25 a 50 mm)	208	199	187
Asentamiento, 3 a 4 in. (75 a 100 mm)	228	217	202
Asentamiento, 5 a 6 in. (125 a 150 mm)	237	222	208
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto con aire-no incluido, %		
	3.0	2.5	2.0

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

* Las cantidades de agua de mezclado dadas para concreto con aire-incorporado están basados en contenidos típicos totales como se muestra en "exposición moderada" en la tabla de arriba. Estas cantidades de agua de mezclado son para uso con contenido de cemento o contenido de material cementante para batchadas de 68 a 77°F (20 a 25 °C). Estos son valores máximos para agregados razonablemente bien gradados de forma angular sin límites aceptados de especificaciones. El uso de aditivos químicos reductores de agua (ASTM C 494) deben reducir el agua de mezclado en un 5% o más. El volumen de las adiciones líquidas es incluida como parte del volumen total del agua de mezclado. Los valores de asentamiento de 7 a 11 pulgadas (175 a 275 mm) son sólo obtenidos por medio del uso de aditivos químicos reductores de agua; ellos son para concreto que contiene agregados de tamaños máximos nominales no más grandes de 1 in (25mm).

** Recomendaciones adicionales para contenido de aire y tolerancias necesarias para el contenido de aire para control en el campo están dadas en varios números de documentos ACI, incluyendo ACI 201.2R, 345R, 318, 301, y 302.1R. La norma ASTM C94 para concreto pre-mezclado también da límites de contenido de aire. Los requerimientos en otros documentos no deben siempre concordar exactamente, entonces la proporción de concreto, las consideraciones deben estar dadas en seleccionar un contenido de aire que provea las necesidades del trabajo y también provea las especificaciones aplicables.

*** Estos valores son basados en el criterio que el 9% de aire es necesitado en la fase de mortero del concreto. Si el volumen de mortero es substancialmente diferente del determinado en la práctica recomendada, será deseable calcular el contenido de aire necesitado para tomar el 9% del valor actual del mortero.

Tabla B.2. Agua aproximada de mezclado y requerimientos de aire contenido para diferentes asentamientos y tamaños máximos nominales de agregados [1].

Actualmente, es crucial introducir aire incorporado en el hormigón, debido principalmente a varios factores, entre los que podemos mencionar la disminución de la segregación, la exudación, aumenta la manejabilidad de la mezcla y mejora la durabilidad del concreto; en contraposición, se disminuye en parte la resistencia del hormigón.

La selección del contenido de aire a introducir varía principalmente de acuerdo a las condiciones de exposición del elemento de concreto y se pueden clasificar entre ligeras, moderadas y severas, tal como se observa en la mencionada tabla, se escoge el nivel de exposición, y con el tamaño máximo nominal del agregado liviano se encuentra un valor promedio de aire incorporado en la mezcla de concreto.

Así mismo, la ACI 211.2 explica que se debe limitar la relación a/mc para los concretos con exposiciones severas, por lo cual limita estas a los valores dados en la Tabla B.3.

Tipo de estructura	Estructura sometida frecuentemente a humedad; expuestas a congelamiento y descongelamiento**	Estructura expuesta a agua del mar o sulfatos
Secciones delgadas	0.45	0.40 ***
Todas las otras estructuras	0.50	0.45 ***

* Basado en ACI 201.2R.

** Concreto debe tener aire incluido

*** Si se usa cemento resistente a sulfatos (Tipo II o tipo V o ASTM C 150), las relaciones a/c o a/mc deben incrementarse 0.05.

Tabla B.3. Máxima relación permisible de a/mc para concretos con exposiciones severas [1].

Paso 4: Estimación del contenido de agua de mezclado.

El agua de mezclado cumple las funciones de hidratar las partículas de cemento y es la responsable de dar la fluidez al hormigón. Se sabe que se necesita de una relación a/mc de 0.25 para hidratar al cemento y el restante tiene la función de darle manejabilidad a la mezcla de concreto.

La ACI 211.2, determina el agua de mezclado en base al asentamiento por el cono de Abrams, el tamaño máximo nominal del agregado y si el concreto presenta aire incorporado en su dosificación. Con estos valores, se busca en la tabla 3.2 de la ACI-211.2 y se encuentra el contenido de agua de mezclado.

Paso 5: Determinación de la resistencia de diseño.

De acuerdo con las condiciones de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente (NSR-10), el concreto debe diseñarse y producirse para asegurar una resistencia promedio requerida a la compresión (f'_{cr}) n veces por encima de la resistencia especificada a la compresión (f'_c). La formulación de la norma está basada en indicar la dosificación de la mezcla fundamentada en la experiencia en obra o en mezclas de prueba o ambas. Básicamente se debe seguir el siguiente procedimiento:

8. Si la instalación productora de concreto no tiene ó tiene menos de 15 registros de ensayos de resistencia en obra para el cálculo de la desviación estándar s_s , la resistencia a la compresión requerida de la mezcla deberá calcularse con la tabla C.5.3.2.2.

TABLA C.5.3.2.2 - RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO NO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA

Resistencia especificada a la compresión, Mpa	Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa
$f'_c < 35$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

Tabla B.4. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra [4].

9. Si la instalación productora de concreto tiene registros de ensayos menores a 12 meses de antigüedad, basados en 15 a 29 ensayos consecutivos, se debe establecer la desviación estándar de la muestra s_s como el producto de la desviación estándar de la muestra calculada y el factor de modificación de la tabla C.5.3.1.2.

TABLA C.5.3.1.2 - FACTOR DE MODIFICACIÓN PARA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA CUANDO SE DISPONE DE MENOS DE 30 ENSAYOS

Número de ensayos*	Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra**
Menos de 15	Emplee la tabla C.5.3.2.2
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30	1.00

* Interpolarse para un número de ensayos intermedios

** Desviación Estándar de la muestra modificada, s_s , para usar en la determinación de la resistencia promedio requerida f'_{cr} de C.5.3.2.1.

Tabla B.5. Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone de menos de 30 ensayos [4].

10. Si se tienen más de 30 ensayos consecutivos, se debe emplear la tabla C.5.3.2.1.

TABLA C.5.3.2.1 - RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c \leq 35$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones (C.5-1) y (C.5-2)
	$f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ (C.5-1)
	$f'_{cr} = f'_c + 2.33s_s - 3.5$ (C.5-2)
$f'_c > 35$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones (C.5-1) y (C.5-3)
	$f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ (C.5-1)
	$f'_{cr} = 0.90f'_c + 2.33s_s$ (C.5-3)

Tabla B.6. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra [4].

Paso 6: Selección de la relación agua-cemento.

Se selecciona esta relación de la Tabla B.7, dependiendo de la resistencia promedio requerida de la mezcla, hallada en el paso anterior, y teniendo en cuenta si hay aire incorporado o no.

Tabla 3.3- Relación aproximada a/c y resistencia a la compresión del concreto*		
Resistencia a la compresión a los 28 días, Mpa	Relación aproximada agua-cemento, por peso	
	Concreto con Aire-No incorporado	Concreto con Aire-Incorporado
41.40	0.41	-
34.50	0.48	0.40
27.60	0.57	0.48
20.70	0.68	0.59
13.80	0.82	0.74

* Estos valores son resistencias promedio estimadas para concreto con contenido de aire mayor de 2% para concreto de aire no-incorporado y 6% contenido total de aire para concreto de aire-incorporado. Para una relación constante de a/c o a/mc, la resistencia del concreto es reducida tal como el contenido de aire es incrementado. Los valores de resistencia a los 28 días deben ser conservativos y deben cambiar cuando varios materiales cementicios son usados. La tasa en la cual la resistencia a los 28 días es desarrollado deberán también cambiar.

La resistencia está basada en cilindros de 6x12 in. (150x300 mm) curados por 28 días de acuerdo con las secciones en el "curado inicial" y el "curado de los cilindros para chequear la adecuación de laboratorio de las proporciones de mezcla para resistencias o en base a la aceptación o para control de calidad" de ASTM C 31 de la *facturación y curado de las muestras de concreto en el campo*. Estos son cilindros curados a 73.4 +/- 3°F (23 +/- 2°C) antes de las pruebas.

La relación en esta tabla asume un tamaño de agregado máximo nominal de cerca de 3/4 a 1 in. (19 a 25 mm). Para una fuente dada de agregado, la resistencia producida esta dada en un relación a/c o a/mc dada que se incrementa tal que el tamaño máximo de agregado nominal decrece.

Tabla B.7. Relación aproximada de a/mc y resistencia a la compresión del concreto [1].

Paso 7: Cálculo del contenido de cemento.

Una vez hallado el contenido de agua de mezclado (paso 4), y la relación agua-cemento (paso 6), se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{A}{(a/mc)} \quad (\text{Ec. B.8.1})$$

Donde:

C= Contenido de cemento, en kg/m³.

A= Cantidad de agua de mezclado, en kg/m³.

a/mc= Relación agua-material cementante, por peso.

Paso 8: Estimación de las proporciones de los agregados livianos

Se procede a determinar el volumen de agregado grueso liviano por metro cúbico de concreto, basado en el módulo de finura de la arena y el tamaño máximo del agregado, empleando la Tabla B.8. Luego se determina el contenido del agregado en peso, utilizando el peso unitario compactado del agregado.

Tabla 3.5- Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto*				
Tamaño Máximo de Agregado, in. (mm)	Volumen de agregado grueso saturado y superficialmente seco por unidad de volumen de concreto para diferentes modulus de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8 (9.5)	0.58	0.56	0.54	0.52
1/2 (12.7)	0.67	0.65	0.63	0.61
3/4 (19.0)	0.74	0.72	0.70	0.68

* Los volúmenes son basados en agregados secos y compactos con varilla, como se describe en la ASTM C29/C 29M por peso unitario de agregado. Estos volúmenes se han seleccionado de relaciones empíricas para producir un concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para la construcción reforzada usual. Para concretos más manejables, tales como aquellos que son requeridos cuando la colocación es por bombeo, ellos se pueden reducir hasta en un 10%.

Tabla B.8. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto [1].

Paso 9: Estimación del peso del concreto liviano fresco.

Ahora, se puede determinar un peso aproximado del concreto liviano fresco, basándose en el factor de gravedad específica del agregado liviano y del porcentaje del contenido de aire incorporado de la mezcla, y con estos valores, se va a la Tabla B.9 y se encuentra el peso del concreto liviano en estado fresco. Como se observa de la tabla, a mayor contenido de aire incorporado el concreto final es más ligero.

Tabla 3.6- Primer estimativo de peso del concreto liviano fresco comprimido de agregado grueso ligero y agregado fino normal			
Factor de gravedad específica	Primer estimativo del peso de concreto liviano, (kg/m³) *		
	Contenido de aire Incorporado		
	4%	6%	8%
1.00	1596	1561	1519
1.20	1680	1644	1608
1.40	1769	1727	1691
1.60	1852	1810	1775
1.80	1935	1899	1858
2.00	2024	1982	1941

* Valores para concretos de riqueza media (326 kg/m³) y asentamiento medio con requerimientos de agua basados en valores de asentamiento de 3 a 4 in. (75 a 100 mm) de la Tabla 3.2. Si se desea, el peso estimado debe ser refinado como sigue, si la información necesaria está disponible: por cada 10 lb (5.9 kg) de diferencia en el agua de mezclado de la Tabla 3.2, corregir el peso por yd³ 15 lb en la dirección opuesta (8.9 kg por m³); por cada 100 lb (59.3 kg) de diferencia del contenido de cemento desde 326 kg, corregir el peso por yd³ 15 lb en la misma dirección (8.9 kg por m³).

Tabla B.9. Primer estimativo de peso del concreto liviano fresco comprimido de agregado grueso ligero y agregado fino normal [1].

Paso 10: Ajuste por humedad y absorción de los agregados.

Finalmente, una vez conocida la dosificación final de la mezcla de concreto liviano, se debe realizar el ajuste del agua real en el diseño de mezcla, ya que como se ha explicado, los agregados ligeros son muy porosos y por consiguiente tienen una gran absorción, por lo que estos tienden a tomar parte del agua de mezclado, necesaria para que el cemento se hidrate y para garantizar una adecuada manejabilidad. Es por lo anterior, que en base a la absorción y la humedad del agregado liviano grueso y del agregado fino, se corrige el agua real de mezcla por la siguiente ecuación:

$$A_{Real} = A + MAG \cdot (Abg - Hg) + MAF \cdot (Abf - Hf) \quad (\text{Ec. B.8.2})$$

Donde:

A_{Real} = Agua Real de la mezcla, en kg/m^3 .

A = Contenido de agua teórico, en kg/m^3 .

MAG = Masa de los agregados gruesos, en kg/m^3 .

Abg = Absorción de los agregados gruesos, en %.

Hg = Humedad de los agregados gruesos, en %.

MAF = Masa de los agregados finos, en kg/m^3 .

Abf = Absorción de los agregados finos, en %.

Hf = Humedad de los agregados finos, en %.

Así mismo, los agregados se ajustan por medio de las siguientes expresiones:

$$\text{Agregado fino} = \frac{MAF \cdot (100 + Hf)}{(100 + Abf)} \quad (\text{Ec. B.8.3})$$

$$\text{Agregado grueso} = \frac{MAG \cdot (100 + Hg)}{(100 + Abg)} \quad (\text{Ec. B.8.4})$$

B.2. Método de Chandra & Berntsson

Este método se base en que los componentes principales de la mezcla de concreto liviano corresponden a la pasta de cemento y al agregado liviano, por consiguiente se deben conocer los siguientes requerimientos:

- Se debe cumplir la curva de distribución de tamaños de partículas de agregados combinados.

La curva de distribución de tamaños de partículas combinadas es una curva modificada de Fuller para partículas continuas de acuerdo con la fórmula:

$$\rho = \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (\text{Ec. B.8.5})$$

Donde:

p= Volumen que pasa a través del tamiz.

d= Tamaño de la abertura del tamiz, en mm.

D= Tamaño máximo de las partículas.

n= factor de acuerdo a la tabla 3.19.

Tamiz, mm	n
0.125	0.7
0.25	0.65
0.5	0.6
1	0.55
>=2	0.5

Tabla B.10. Factor n, de la fórmula de fuller [2].

- Es necesario conocer la densidad de las partículas del agregado liviano, así como su resistencia a la compresión.
- La resistencia del concreto es una función del volumen y resistencia del mortero en el concreto y de la resistencia del agregado ligero. El volumen de las partículas de agregado ligero de tamaño entre 2mm y 12mm deben estar en el rango de 40+/-5 % de volumen. Se necesita la densidad aparente del mortero para el proporcionamiento.
- El volumen de la pasta de cemento deberá estar en el rango de 0.28-0.35 m³ por 1 m³ de concreto. El volumen de la pasta depende del contenido de aire incorporado y de la resistencia. El contenido de cemento se calcula del volumen conocido y la relación agua/material cementante.

Ya conocidos las especificaciones clave del método de Chandra & Berntsson, se procede a explicar el procedimiento de proporcionamiento en detalle.

Paso 1: Determinar la resistencia de diseño

La resistencia de diseño, se determina siguiendo el mismo procedimiento del Paso 5 del método del ACI 211.2, ya que la resistencia promedio requerida (f'_{cr}) debe de basarse según los lineamientos dados por la Norma Sismo-Resistente Colombiana.

Paso 2: Determinar la resistencia de las partículas del agregado liviano.

Esta se determina en base a la siguiente fórmula:

$$f_{la} = a \cdot 10^{b \cdot \rho / 1000} \quad (\text{Ec. B.8.6})$$

Donde:

f_{la} = Resistencia de las partículas del agregado liviano, en MPa.

p = Densidad de las partículas del agregado liviano, en kg/m^3 .

a = Coeficiente tomado de la tabla 3.20.

b = Coeficiente tomado de la tabla 3.20.

Coeficientes a y b de la resistencia de los agregados livianos				
Agregado No.	a	b		
		0%	5%	10%
1	1.52	1.14	(1.08 ,	1.03)
2	1.12	1.22	(1.16 ,	1.11)
3	1.00	1.25	(1.15 ,	1.14)
4	0.89	1.28	(1.22 ,	1.17)

Los valores en paréntesis corresponden al 5 y 10 % de contenido de agua en el agregado. El valor de b no es o es influenciado marginalmente por el contenido de agua. El agregado no. 3 es para la densidad aparente de 300 kg/m^3 . El agregado ligero es algún tipo de arcilla sinterizada de alta calidad. Otros agregados deben tener otros valores.

Tabla B.11. Coeficientes a y b de la resistencia de los agregados livianos [2].

Cabe resaltar que para todos los tipos de agregados ligeros hay diferentes relaciones entre la resistencia de las partículas del agregado y su densidad. Puesto que, las partículas interactúan con la matriz circundante, la pasta de cemento o mortero, el método está basado en estimar la resistencia del concreto.

Paso 3: Determinar la resistencia del mortero

Se puede dar la resistencia del mortero con base a la siguiente relación:

$$\log(f_M) = \frac{(\log(f_{con}) - v_{la} \cdot \log(f_{la}))}{(1 - v_{la})} \quad (\text{Ec. B.8.7})$$

Donde:

f_{con} = Resistencia del concreto, en MPa.

f_M = Resistencia del mortero, en MPa.

f_{la} = Resistencia del agregado ligero, en MPa.

v_{la} = Volumen de las partículas de agregado liviano, en m^3 .

v_M = Volumen del mortero, en m^3 .

Paso 4: Determinar la relación agua/cemento

Esta relación se puede calcular en base a los siguientes casos:

a) Cuando $0.20 < a/mc \leq 0.25$:

$$f_M = 160 \cdot 10^{-0.87 \left(\frac{a}{mc} \right)} \quad (\text{Ec. B.8.8})$$

b) Cuando $0.25 < a/mc < 0.30$:

$$a/mc = a \cdot \frac{10^3}{mc} \quad (\text{Ec. B.8.9})$$

c) Cuando $0.30 \leq a/mc \leq 0.80$, sin aire incorporado:

$$f_M = 140 \cdot 10^{-0.87 \left(\frac{a}{mc} \right)} \quad (\text{Ec. B.8.10})$$

d) Cuando $0.30 \leq a/mc \leq 0.80$, con aire incorporado:

$$W_a = \log \left(\frac{176}{f_M} \right) \quad (\text{Ec. B.8.11})$$

$$W_a = (a + V_1) \cdot \frac{10^3}{mc} \quad (\text{Ec. B.8.12})$$

Donde:

a = Contenido de Agua, en m^3/m^3 .

mc = Contenido de material cementante, en Kg/m^3 .

Las formulaciones anteriores son validas para arena normal, no para arena de peso ligero y para contenidos de aire inferiores al 10% del volumen del concreto.

Paso 5: Estimar el volumen de la pasta de cemento

Este volumen, que se deberá adherir a los agregados del concreto, deberá ocupar cerca de un 30% del volumen del concreto. En algunos casos, especialmente para concretos de muy alta resistencia utilizando adiciones de humo de sílice, el volumen del mortero alcanza hasta un 34%. El concreto con aire incluido también influye en el contenido de la pasta de cemento, debido a que las pequeñas burbujas de aire cambian las propiedades reológicas del concreto fresco y mejora la manejabilidad.

Paso 6: Cálculo del contenido de cemento

El contenido de cemento se calcula con la siguiente expresión:

$$mc = \frac{1000 \cdot v_p}{\left(0.31 + \frac{a}{mc} \right)} \quad (\text{Ec. B.8.13})$$

Donde:

v_p = Volumen de la pasta de cemento, en m^3 .

Paso 7: Volumen y peso de la arena natural

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$v_s = 1 - (v_p + v_{al} + v_{air}) \quad (\text{Ec. B.8.14})$$

Donde:

v_{air} = Volumen del aire incluido en el concreto, en m³.

Paso 8: Volumen y peso del agregado liviano

Se recomienda que el volumen de las partículas del agregado liviano compactado sea alrededor de 0.40m³.

Paso 9: Peso unitario aparente seco del concreto

La densidad del concreto puede determinarse al sumar los pesos de cada uno de los componentes del hormigón en 1 m³ de concreto compactado. La otra alternativa consiste en aplicar la siguiente fórmula:

$$\gamma_{con} = v_{al} \cdot \gamma_{al} + v_M \cdot \gamma_M \quad (\text{Ec. B.8.15})$$

Donde:

γ_{con} = Densidad aparente del concreto, en Kg/m³.

γ_{con} = Densidad de las partículas del agregado ligero

γ_{con} = Densidad del mortero.

Paso 10: Ajuste por humedad y absorción de los agregados.

Una vez terminada la dosificación final de la mezcla, se procede a efectuar los ajustes por absorción y humedad de los agregados gruesos y finos. Para lo anterior, se utiliza la misma formulación del paso 10 del método ACI 211.2.

REFERENCIAS

1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.2-98. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. Reported by ACI Committee 211. 2004.
2. CHANDRA, Satish y BERNTSSON, Leif. Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications. Chalmers University of Technology de Suecia. Noyes Publications. Norwich, New York, U.S.A. 2002.
3. GOMEZ, José Gabriel. Materiales para Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., 2001.
4. NORMA SISMO-RESISTENTE COLOMBIANA. NSR-10.
5. SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. Biblioteca de la Construcción. Bhandar Editores. Bogotá, 2001.

ANEXO C:

ENSAYO RÁPIDO DE PENETRACIÓN IÓN CLORURO PARA LAS MUESTRAS DE ALISUR

ANEXO C. ENSAYO RÁPIDO DE PENETRACIÓN IÓN CLORURO PARA LAS MUESTRAS DE ALISUR

Este parte anexa a la investigación principal, surgió como complemento de los ensayos de durabilidad realizados a las muestras de concreto con ALISUR, es decir a las probetas de relaciones a/mc de 0.72 y 0.77. Las principales razones para realizar este ensayo fueron las siguientes:

- Conocer el comportamiento de las probetas hechas con mezclas de AS0.72 y AS0.77, a la penetración del ión cloruro.
- Corroborar los resultados obtenidos por el ensayo de absorción en frío, caliente y porosidad. Lo anterior, debido a que este método no es muy conocido y por lo tanto los valores teóricos de absorción para clasificar la durabilidad del concreto difieren con frecuencia.
- Por el grado de reconocimiento que tiene entre la comunidad académica, el ensayo descrito en la ASTM C1202, para clasificar como durable o no durable al concreto.

En este apartado se procede a explicar el ensayo rápido de penetración al ión cloruro, regulado por la ASTM C1202 y la AASHTO T277.

Este ensayo permite determinar la conductancia eléctrica del concreto para proveer una rápida indicación de su resistencia a la penetración del ión cloruro. Este ensayo según Juan Manuel Lizarazo consiste en *“valorar la habilidad del concreto para resistir la penetración de los cloruros mediante una indicación eléctrica. El ensayo consiste en preparar una probeta de concreto, con un espesor de 50 mm y un diámetro de 100 mm la que se somete a un voltaje de 60 V de corriente directa durante seis horas. La probeta de concreto se coloca entre dos reservorios, el primero contiene una solución de cloruro de sodio NaCl al tres por ciento (3%) y el segundo contiene una solución de hidróxido de sodio de 0.3M. La carga total que es transmitida por este sistema es determinada para valorar la permeabilidad del concreto”*.

Este ensayo se realizó en los laboratorios de Cementos Argos S.A. en la planta cementera de Fontibón. El procedimiento llevado a cabo para desarrollar el ensayo fue el siguiente:

- Se impermeabilizaron las probetas lateralmente, tal y como se ve en la Figura B.1.
- Se sometieron las probetas de concreto a la olla de despresurización que se muestra en las figuras B.2. y B.3., por un espacio de 3 horas.
- Posteriormente, cada una de las probetas de conectaron a las celdas que se muestran en la figura B.4. y se llenaron con los contenidos apropiados de cloruro de sodio (NaCl) y de hidroxido de sodio (NaOH).
- Finalmente, a las celdas se les paso una corriente de 60 V por un espacio de 6 horas.

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA



Figura C.1. Probetas impermeabilizadas lateralmente.



Figura C.2. Olla de despresurización.



Figura C.3. Probetas dentro de la olla de despresurización.



Figura C.4. Montaje del ensayo de penetración al ión cloruro.

Los resultados de someter las probetas a este ensayo, correspondieron a los mostrados en la Tabla C.1.

PROBETA AS0.72-1				PROBETA AS0.77-1			
Tiempo (H)	Corriente (mA)	Temperatura (°C)	Carga (Coulombs)	Tiempo (H)	Corriente (mA)	Temperatura (°C)	Carga (Coulombs)
0.00	189.4	82.5	64.09	0.00	255.3	0	86.39
0.28	196.7	69.3	260.84	0.28	258.7	0	351.06
0.57	207.5	65.9	466.52	0.57	270.9	0	619.17
0.85	217.7	63.4	683.74	0.85	288.5	0	904.81
1.04	205	45.8	903.97	1.04	261.7	22.9	1195.26
1.32	221.6	51.2	1123.18	1.32	280.7	56.1	1474.14
1.60	230.9	54.2	1353.97	1.60	291.5	36.1	1766.41
1.89	238.7	55.6	1593.36	1.89	304.6	37.5	2071.21
2.17	243.6	58.1	1838.53	2.17	306.1	42.4	2381.32
2.45	248.5	62.5	2088.50	2.45	312.9	37.1	2696.84
2.74	250.4	70.3	2340.75	2.74	307.1	40	3011.59
3.02	249	76.6	2594.34	3.02	308.5	35.1	3328.77
3.30	250.9	61.5	2849.06	3.30	315.9	36.6	3648.63
3.59	245.1	61.5	3100.52	3.59	318.3	33.2	3965.17
3.87	247.5	55.1	3350.80	3.87	319.3	49.8	4288.81
4.16	248	51.7	3602.40	4.16	316.4	31.7	4609.85
4.44	237.7	76.6	3848.22	4.44	314.4	60	4928.05
4.72	239.2	70.3	4093.35	4.72	307.6	47.8	5244.46
5.01	237.7	50.7	4335.04	5.01	303.2	31.2	5557.07
5.29	234.8	51.2	4575.24	5.29	307.1	24.9	5870.80
5.57	233.4	52.2	4812.15	5.58	308.5	50.7	6183.85
5.86	228.5	52.2	5046.09	5.86	311.5	41	6499.28

Tabla C.1. Datos del ensayo de penetración del ión cloruro a las muestras de ALISUR.

De la anterior gráfica se procede a trazar un gráfico en el cual se aprecien la carga que pasa por las probetas del concreto, contra el tiempo:

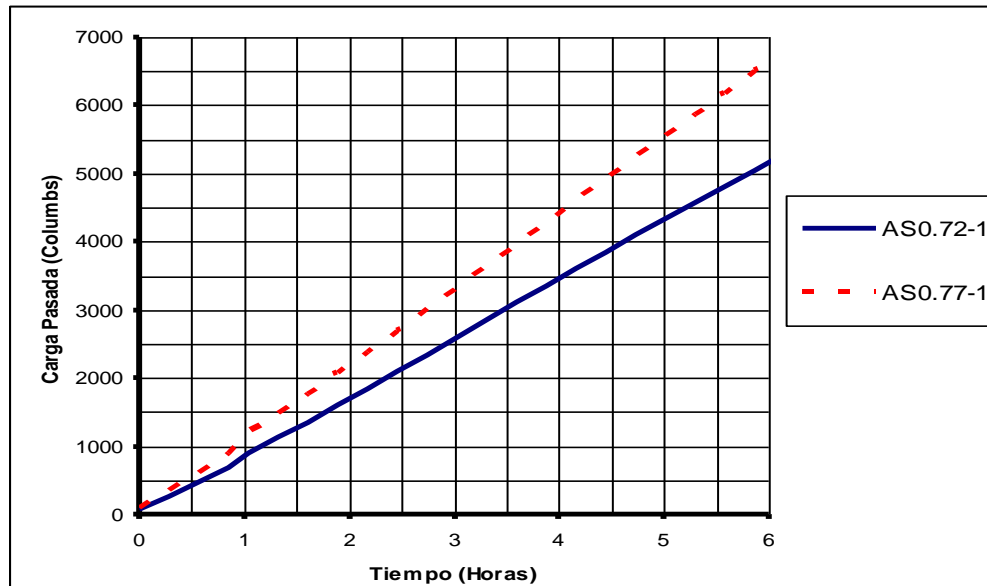


Figura C.5. Corriente vs. Tiempo para el ensayo de penetración de cloruros.

Los resultados obtenidos por el ensayo de penetración rápida del ión cloruro, muestran que tanto la probeta de relación a/mc de 0.72 como la de 0.77, presentan una posible baja durabilidad, ya que los valores de carga registrados a las 6 horas, se encuentran por encima del límite superior (4000 Coulombs) que se menciona en la normativa ASTM C1202 y que se reproducen en la Tabla 3.10, del presente informe.

Estos datos corroboran los resultados obtenidos por el método de Absorción en frío, caliente y porosidad, que indican que las mezclas de concreto con ALISUR, con relaciones a/mc de 0.72 y 0.77. Lo anterior nuevamente, se puede explicar en los valores tan altos de relación a/mc tomados, que garantizan una buena resistencia pero no una adecuada durabilidad.

REFERENCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM 642-06. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2009.
- LIZARAZO, Juan. Ensayos Típicos en la determinación de la durabilidad del concreto. Grupo de Investigación en Análisis y Diseño. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- VALDERRAMA, Patricia. Evaluación del desempeño durable de concretos adicionados con cenizas volantes. Tesis de Maestría en Estructuras. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. 2009.

ANEXO D:

ENSAYOS CON CONCRETOS LIVIANOS DE ALTA RESISTENCIA

ANEXO D. ENSAYOS CON CONCRETOS LIVIANOS DE ALTA RESISTENCIA CON ALISUR

Comúnmente se conoce a los Hormigones Livianos de Alta Resistencia (HLAR) como aquellos concretos que tienen una densidad seca alrededor de 1900 kg/m^3 y una resistencia a la compresión superior a los 42 MPa.

En un principio se pensaba que el concreto liviano estructural al estar compuesto por agregados livianos, de naturaleza porosa y por consiguiente, poco resistentes ante esfuerzos elevados, no podía alcanzar resistencias que lo catalogarán como de Alto desempeño; pero estas creencias se han ido cambiando ante la evidencia práctica que muestra lo contrario. En efecto, en la actualidad se han logrado desarrollar hormigones livianos de alta resistencia, con resistencias a la compresión por encima de 50 Mpa y con la ventaja que representa la ligereza de estos tipos de hormigón.

Sin embargo, así como en el caso de los concretos de alto desempeño de peso normal, el obtener hormigones livianos de elevada resistencia no es fácil, pero con los conocimientos apropiados de la Tecnología del Concreto es posible. En general, Chandra & Berntsson (2002) afirman que los hormigones livianos de alta resistencia, se pueden obtener de dos formas:

1. Utilizando materiales puzolanicos como humo de sílice junto con el cemento, y usando aditivos químicos reductores de agua de alto poder.
2. Por el empleo de agregados livianos de alta capacidad mecánica.

Las propiedades estructurales de los hormigones livianos de alta resistencia, pueden diferir de forma significativa dependiendo del tipo de agregado liviano utilizado y de sus características. Es por ésto, que en esta sección se procede a explicar los resultados obtenidos de fabricar Concreto Liviano de Alta Resistencia con el agregado liviano ALISUR.

Esta investigación paralela a la principal, se realizó debido a las siguientes razones:

- En la investigación principal, se estudiaron concretos con relaciones a/mc relativamente altas, de 0.72 y de 0.77, por lo que se quería estudiar y conocer el comportamiento del concreto liviano compuesto por ALISUR, para una relación a/mc mucho más baja.
- Con el objeto de estudiar los efectos de la adición de humo de sílice al concreto liviano con ALISUR.
- Para mejorar las condiciones de durabilidad del concreto liviano fabricado con ALISUR, ya que de la investigación principal se encontró que era necesario mejorar estas propiedades.

De acuerdo con lo anterior, se siguió el procedimiento explicado en la metodología de la investigación y basándose en la dosificación proporcionada por el método ACI 211.2-98, se optó por trabajar con una relación a/mc de 0.44, en la cual se incluyó al humo de sílice como material cementante, llegando al proporcionamiento de mezcla de la Tabla D.1, el cual ya se encuentra corregido por absorción y humedad de los agregados.

Ingrediente	Peso
	kg/m ³
Cemento	421
Humo de sílice	42
Agua	202
Contenido de aire	0
Agregado grueso liviano	837
Agregado fino	480
Superplastificante	3
TOTAL	1982

Tabla D.1. Dosificación del Concreto Liviano de Alta Resistencia con ALISUR.

D.1. Caracterización de los materiales

Los materiales utilizados en el diseño de mezcla, correspondieron a los mismos que se emplearon en las mezclas de concreto con ALISUR. Es decir, las propiedades del cemento, agregado fino y agregado liviano se encuentran explicadas y resumidas en el capítulo 5 del presente texto. Véase 5.3.1.

Referente a las propiedades del superplastificante utilizado, estas se encuentran resumidas en los anexos. En cambio el humo de sílice correspondió al que vende la empresa Toxement. Véase Anexo E.

D.2. Ensayos sobre especímenes de concreto

Con la mencionada dosificación se obtuvo una relación a/mc de 0.44, con la que se realizaron 11 cilindros de 0.10x0.20m a los cuales se sometieron a los siguientes ensayos:

- Resistencia a la compresión. Se fallaron los especímenes a edades de ensayo de 7 y 28 días.
- Masa unitaria. A una probeta de concreto se le realizó este ensayo a una edad de 28 días.
- Durabilidad: Absorción en frío, caliente y porosidad. Se le realizó a dos probetas de 10 x 7cm aproximadamente.
- Modulo de Elasticidad. Se les realizó a dos probetas a la edad de 28 y 56 días.
- Ensayo de asentamiento.

A continuación se procede a mencionar y explicar los resultados de esta mezcla de concreto:

D.2.1. Resistencia Compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se muestran en la Tabla D.2. De la misma forma la curva de resistencia en el tiempo se aprecia en la Figura D.1.

Mezcla	Edad días	Datos			Resistencia Promedio MPa
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
AS0.44 (44)	7	41.26	31.28		36.3
	28	46.69	45.14	40.21	44.0
	56	61.38	61.17		61.3

Tabla D.2. Datos y resultados de resistencia a la compresión para Concreto Liviano de Alta Resistencia.

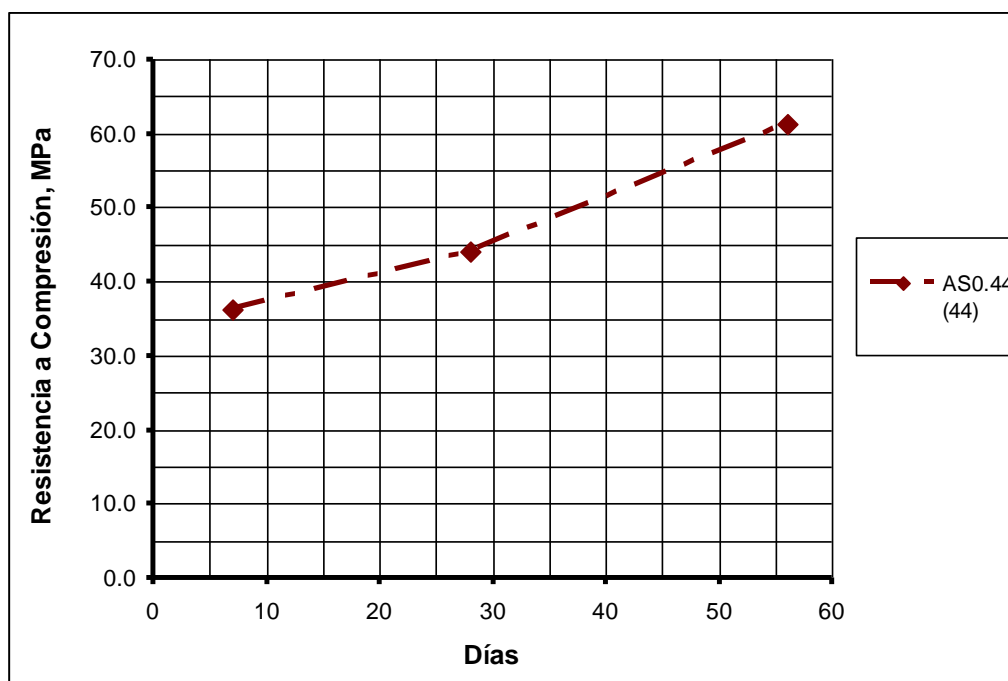


Figura D.1. Resistencia a la compresión del Concreto Liviano de Alta Resistencia en el tiempo.

De los anteriores resultados, se observa como a los 28 días, el concreto alcanza una resistencia a la compresión de 44 MPa y a los 56 días de 61.3 MPa.

Se aprecia cómo se incrementó la resistencia de los 7 a los 28 días en un 18%, valor inferior al registrado por las mezclas de ALISUR para relaciones a/mc de 0.72 y 0.77, que estuvieron en el orden de 30%. En cambio de los 28 a los 56 días, se presenta un aumento de resistencia correspondiente a un 28%. Es decir que desde los 7 hasta los 56 días, se incrementó la resistencia a la compresión del concreto en un 41%.

Los resultados evidencian que el concreto obtenido se puede catalogar de alta resistencia, puesto que a los 28 días tiene una resistencia superior a los 42 MPa. Así

mismo, se presenta una importante ganancia de resistencia en el tiempo, la cual se argumentaría por la reacción tardía del humo de sílice en la matriz de la pasta cementante. Igualmente, conviene estudiar el modo de falla de estos tipos de concreto, los cuales se muestran en seguida:



Figura D.2. Modo de falla a los 28 y 56 días del Concreto Liviano de Alta Resistencia.

De la anterior figura se ve que la falla en los especímenes de concreto a los 28 días, se presentó en un 70% por corte en el agregado y el restante porcentaje en falla por pasta de cemento, aproximadamente. En cambio, las probetas ensayadas a los 56 días, presentaron aproximadamente un 90% de falla del agregado y el restante 10% por pasta de cemento.

En general, el concreto obtenido alcanza resistencias altas, debido a que tiene un agregado liviano de moderada capacidad estructural y una pasta de cemento de buena calidad. De la misma forma, los modos de falla muestran que estos tipos de concreto fallan por el agregado antes que por la pasta cementante.

D.2.2. Durabilidad: Absorción en frío, caliente y porosidad

Los resultados de los ensayos de absorción en frío, caliente y porosidad se muestran en la Tabla D.3. Así mismo, la comparación gráfica de estos datos se enseña en la figura D.2.

No.	f'c Promedio	EDAD Días	ENSAYO DE ABSORCION EN FRIO Y CALIENTE, %					Diferencia de absorción (1) y (2)	Densidad a los 28 días kg/m ³	
			Absorción después de inmersión (1)		Absorción después de inmersión y ebullición (2)		Porosidad			
			Valores	Promedio	Valores	Promedio	Vol. Vacios			Promedio
ASAD (44)	44.0	28	5.3%	5.4%	5.3%	5.4%	10.4%	10.6%	0.0%	1980
			5.5%		5.5%		10.7%			

Tabla D.3. Datos y resultados de absorción en frío, caliente y porosidad para Concreto Liviano de Alta Resistencia.

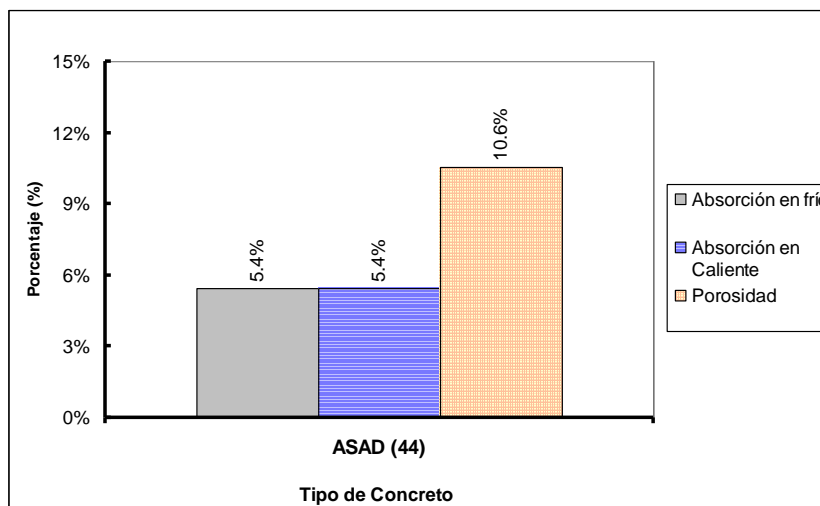


Figura D.3. Comparación de absorción en frío, caliente y porosidad para Concreto Liviano de Alta Resistencia.

Los resultados de absorción evidencian que la relación a/mc de 0.44, disminuyó la absorción del hormigón, tanto en frío como en caliente a un valor aproximado de 5.4%, en comparación de los valores de 8.5% y de 7.5% alcanzados con las mezclas de AS0.77 y AS0.72, respectivamente. A pesar de esta notoria mejoría en la absorción del concreto, los límites teóricos dados por la Tabla 3.9, indican que tiene una posible baja durabilidad.

Este concepto, es contrariado con el otro resultado experimental del ensayo, es decir la porosidad, que indica que este hormigón obtuvo alrededor de 10.6 % de porosidad, lo cual según la misma tabla 3.9, es un indicador de moderada durabilidad entre el intervalo de 10-15%, pero que por su cercanía al límite inferior de esta, reflejaría una aceptable durabilidad.

En efecto, los límites teóricos del reglamento NSR-10, indican que para ambientes agresivos de exposición de los elementos, es necesario el empleo de un concreto con una buena durabilidad, por lo que limitan la relación a/mc a un valor máximo comprendido en un intervalo de 0.40 y 0.50, rango en el cual se encuentra la relación a/mc de la presente investigación.

Así mismo, se corrobora que un concreto resistente no es necesariamente durable, como es el caso de las mezclas AS0.72 y AS0.77 y que las condiciones de durabilidad de un concreto mejoran a medida que se disminuya la relación a/mc del hormigón.

D.2.3. Masa unitaria

Los resultados del ensayo de masa unitaria a la probeta de concreto a los 28 días, de conformidad con la NTC 4022, se muestra en la Tabla D.4.

CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

No.	f'c	M. Unitaria NTC 4045	MASA UNITARIA PROMEDIO			Promedio M. Unitaria 28 días (kg/m ³)	Promedio Seco a horno (kg/m ³)	% diferencia Equilibrio y NTC 4045 (kg/m ³)
	Promedio		Probeta	Probeta	Probeta			
Muestra	Mpa	kg/m ³	1	2	3			
ASAD (44)	44.0	2023	1980			1980	1944	2.1%

Tabla D.4. Datos y resultados de Masa Unitaria para Concreto Liviano de Alta Resistencia.

De la Tabla D.4 se extrae que la probeta de concreto liviano ensayada, tiene a los 28 días una masa unitaria de 1980 kg/m³, valor que es aceptado como razonable para concretos livianos de alta resistencia.

Así mismo, se observa que el valor de 1980 kg/m³ es inferior al registrado a la linealización autorizada por la NTC4045, que ubica a la masa unitaria del concreto liviano con resistencia a la compresión de 44 MPa, en 2023 kg/m³. Igualmente, el resultado esta acorde con el teórico dado por la NTC 4045, que indica que la masa unitaria seca no debe diferir con la de equilibrio en mas de 50 kg/m³, como efectivamente pasa en este caso, ya que la seca dio un valor aproximado de 1944 kg/m³.

Los anteriores resultados se ven de forma más clara en la siguiente figura:

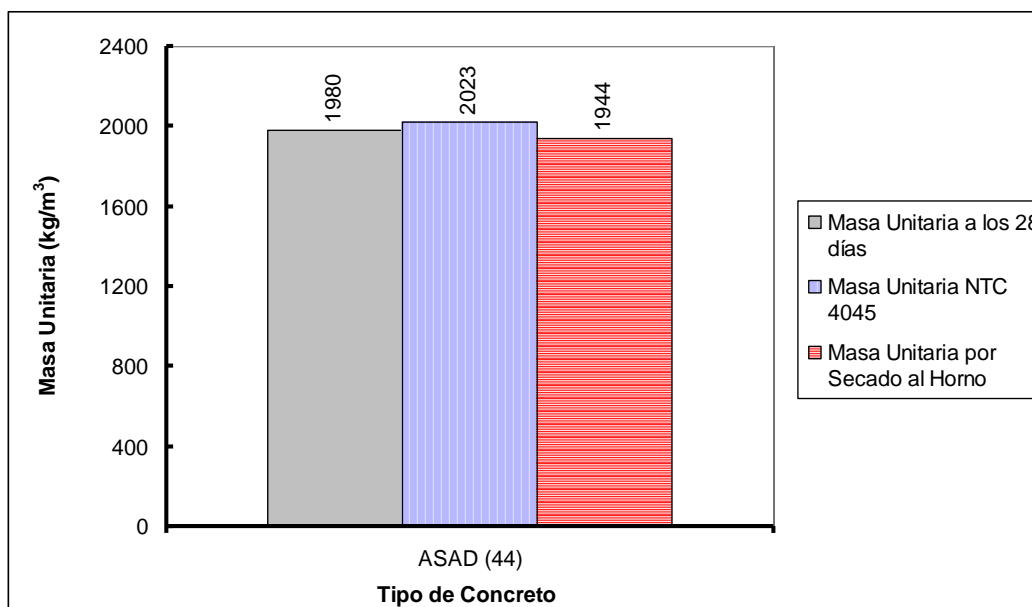


Figura D.4. Comparación de masa unitaria experimental, NTC 4045 y Secada al horno a 110°C.

Se podría pensar que efectivamente la masa unitaria a los 28 días, 1980 kg/m³, corresponde a la masa unitaria de equilibrio para este tipo de hormigón.

D.2.4. Módulo de Elasticidad

Los datos experimentales del ensayo de modulo de elasticidad aplicados a las probetas de concreto a edades de 28 y 56 días, se aprecian en la Tabla D.5. Así mismo, la grafica de Esfuerzo- Deformación de estos concretos se aprecian en la Figura D.4. Cabe resaltar que en este apartado se procedió a comparar el valor experimental del modulo de elasticidad, con los teóricos de la NSR-10 y de la ACI 318, tal y como se realizó en el numeral 5.3.2.5.

No.	f'c Promedio	Densidad	MODULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO						
			Deformación	Esfuerzo	M. Elasticidad	Modulo	Variación	Modulo	Variación
Muestra	Mpa	kg/m ³	a 0.45f'c	a 0.45f'c	Experimental	ACI 318	Exp vs ACI	NSR-10	Exp vs NSR
AS0.44-1, 28 días	44.01	1980	0.000884	20.40	23072	25139	8%	26504	13%
AS0.44-2, 28 días	44.01	1980	0.000941	20.14	21410	25139	15%	26504	19%
AS0.44-1, 56 días	61.28	1980	0.001129	25.46	22557	29662	24%	31272	28%
AS0.44-2, 56 días	61.28	1980	0.001176	28.01	23821	29662	20%	31272	24%

Tabla D.5. Datos y resultados de módulo de elasticidad a los 28 días para Concreto Liviano de Alta Resistencia.

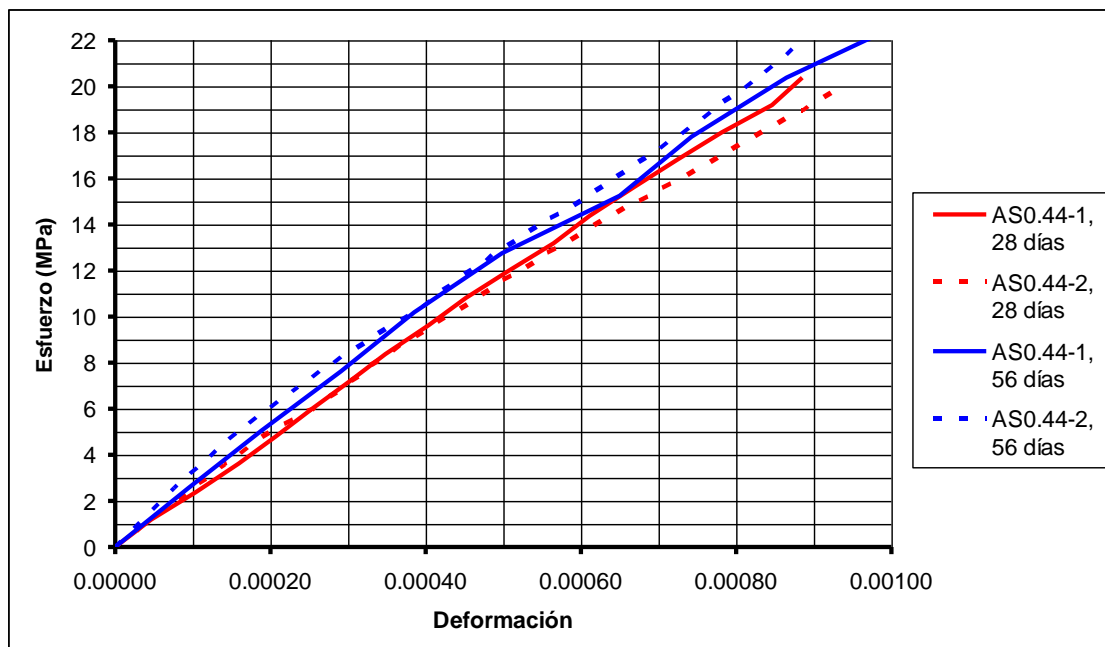


Figura D.5. Familia de curvas a 28 días de modulo de elasticidad para Concreto Liviano de Alta Resistencia.

En este caso, los módulos de elasticidad a los 28 días (21410 MPa y 23072 MPa) y los de 56 días (22557 MPa y 23821 MPa), muestran valores similares. En general, este tipo de concreto se sigue comportando como en el caso de las mezclas de AS0.72 y AS0.77, es decir presentan valores menores a los predichos por las ecuaciones teóricas de la ACI 318 y NSR-10. Así mismo, los resultados obtenidos concuerdan con las investigaciones de Mauricio López que indican que para los concretos livianos, sin importar la resistencia a la compresión y la relación a/mc, el modulo de elasticidad estará por debajo de 29000 MPa.

D.2.5. Ensayo de asentamiento por cono de Abrams

Este ensayo se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana, NTC 396: “Método de Ensayo para Determinar el Asentamiento del Concreto”.

Se obtuvo para la mezcla de Concreto Liviano de Alta Resistencia un asentamiento en cono de Abrams de 21 cm, valor muy adecuado para cumplir los requisitos de manejabilidad necesarios en un hormigón estructural. Lo anterior, se logró gracias al empleo de un aditivo superplastificante, debido a la naturaleza seca de la mezcla, por la proporción de agregado liviano en la dosificación que repercute en un empleo indispensable de aditivos para mejorar la trabajabilidad.



Figura D.6. Ensayo de asentamiento para Concreto Liviano de Alta Resistencia.

Cabe resaltar que la proporción utilizada de superplastificante, fue la recomendada por el fabricante del aditivo para cumplir requisitos de manejabilidad. Véase Anexo E.

D.3. CONCLUSIONES

La dosificación de materiales empleada en la mezcla permitió obtener concreto de alta resistencia, ya que se encontró una resistencia a la compresión a los 28 días mayor a 42 MPa.

El concreto obtenido tuvo una masa unitaria seca menor a 2000 kg/m^3 , que es el valor comúnmente utilizado para este tipo de hormigón. Lo anterior indica que efectivamente el hormigón es liviano.

La permeabilidad del concreto fue baja, debido a que se empleó humo de sílice y una relación a/mc baja, por lo cual se corrobora que la durabilidad depende de la calidad del material cementante de la mezcla.

Este concreto presenta una relación resistencia-peso muy favorable. Esta relación es mejor que la de los concretos de peso normal, por lo cual se ve que su uso en obras civiles deberá de ser adecuado.

REFERENCIAS

1. ATCIN, P.-C. High Performance Concrete. Modern Concrete. E & FN Spon. Université of Sherbrooke, Québec, Canada. 1998.
2. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.2-98. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. Reported by ACI Committee 211. 2004.
3. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM 642-06. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. 2006.
4. CHANDRA, Satish y BERNTSSON, Leif. Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications. Chalmers University of Technology de Suecia. Noyes Publications. Norwich, New York, U.S.A. 2002.
5. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 673. Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros Normales de Concreto. 1995
6. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 4022. Masa Unitaria de Concreto Liviano Estructural. 1994. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANA, NTC 4025. Método de Ensayo para Determinar el Modulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson en Concreto a Compresión. 2006.
7. LOPEZ, Mauricio*; KAHN, Lawrence F**. Hormigón Liviano de alto desempeño -una comparación entre pérdidas de pretensado reales y estimadas por los códigos de diseño.*Pontificia Universidad Católica de Chile, CHILE; **Georgia Institute of Technology, EEUU. Agosto, 2006.

ANEXO E:

HOJAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS

HOJA TÉCNICA
Versión: 07/2007
Sikament-N 100

Sikament®-N 100

Superplastificante reductor de agua de alto poder

DESCRIPCIÓN Sikament-N 100 es un aditivo líquido, color café, compuesto por resinas sintéticas. Superplastificante, reductor de agua de alto poder y economizador de cemento. No contiene cloruros.

USOS Sikament-N 100 tiene tres usos básicos.
Como superplastificante:
Adicionándolo a una mezcla de consistencia normal se consigue fluidificar el concreto o mortero facilitando su colocación y su bombeabilidad en elementos esbeltos densamente armados y en la construcción de estructuras civiles prefabricadas.
Permite recuperar el asentamiento del concreto premezclado sin alterar sus tiempos de fraguado ante demoras en la colocación del mismo.
Como reductor de agua de alto poder:
Adicionándolo disuelto en la última porción del agua de amasado permite reducir, de acuerdo con la dosis usada, hasta un 30% del agua de la mezcla, consiguiéndose la misma manejabilidad inicial y obteniéndose un incremento considerable de las resistencias a todas las edades. Sikament-N 100 es ideal para la elaboración de prefabricados y concretos de altas resistencias finales. Mediante su uso la Impermeabilidad y durabilidad del concreto o mortero se ven incrementadas notablemente.
Como economizador de cemento:
Se puede aprovechar la reducción del agua lograda, para disminuir el contenido de cemento y hacer más económico el diseño de las mezclas especialmente aquellas de consistencia fluida como bombeables, tremle y contech. El Sikament-N 100 puede ser usado como superplastificante en concretos elaborados con adiciones de microsílica.

VENTAJAS El Sikament-N 100 proporciona los siguientes beneficios tanto en el concreto fresco como en el concreto endurecido.
Como superplastificante:

- Mejora considerablemente la trabajabilidad de la mezcla.
- Facilita el bombeo y colocación del concreto a mayores alturas y a distancias más largas.
- Disminuye el riesgo de homigueros en el concreto de estructuras densamente armadas y esbeltas.
- Mejora considerablemente el acabado del concreto y reproduce la textura de la formaleta.
- Se puede emplear para recuperar el asentamiento perdido en el concreto premezclado ya que no retarda el fraguado del mismo en climas medios y fríos.
- Evita la segregación y disminuye la exudación del concreto fluido.
- Disminuye los tiempos de vibrado del concreto.
- Puede redosificarse el material hasta completar una dosis del 2% del peso del cemento sin alterar la calidad.

Sika®

	<p>Como reductor de agua de alto poder:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la resistencia inicial del concreto hasta un 80% aprox. • Incrementa la resistencia final del concreto en un 40% aprox. a los 28 días de edad. • Reduce considerablemente la permeabilidad del concreto, aumentando su durabilidad. • Densifica el concreto y mejora su adherencia al acero de refuerzo. • Reduce en alto grado la exudación y la retracción plástica. • Gran economía en los diseños por la reducción de cemento alcanzable.
<p>MODO DE EMPLEO</p>	<p>Como Superplastificante: Adicionar Sikament-N 100 a la mezcla ya preparada, inmediatamente antes de la colocación o bombeo del concreto. Mezclar el concreto con Sikament-N 100 durante 4 minutos. Si la mezcla ha perdido manejabilidad redosifique Sikament-N 100 a la mitad de la dosis inicialmente usada y remezcle. La elaboración de concreto bombeable demanda una granulometría continua y un adecuado contenido de finos en la mezcla. La mezcla debe tener entre 7 y 10 cm de asentamiento antes de aplicar Sikament-N 100 para lograr el mejor efecto fluidificante y minimizar la dosis.</p> <p>Como Reductor de agua de alto poder: Adicionar la dosis escogida de Sikament-N 100 en la última porción del agua de amasado de la mezcla. Reducir agua y trabajar justo con la manejabilidad requerida. Al reducir agua la mezcla pierde manejabilidad muy rápido. Colóquela y vibrela inmediatamente. Puede usarse combinándolo con la dosis adecuada de un plastificante retardante del tipo Plactocrete o Plastiment con el fin de atenuar este fenómeno.</p> <p>Dosificación: Como superplastificante: 0,5 al 1,0% del peso del cemento. Como reductor de agua de alto poder: 1,0 al 3,0% del peso del cemento. La dosis óptima debe determinarse mediante ensayos preliminares.</p>
<p>DATOS TECNICOS</p>	<p>Sikament-N 100 cumple normas ASTM C-494, ASTM C-1017 y NTC 1299 como aditivo tipo F. Densidad: 1,2 kg/l aprox.</p>
<p>PRECAUCIONES</p>	<p>La elaboración de concreto o mortero fluido exige una buena distribución granulométrica. Se debe garantizar un suficiente contenido de finos para evitar la segregación del material fluido. En caso de deficiencia de finos, dosificar Sika-Aer D para incorporar del 3% al 4% de aire en la mezcla. El uso de concreto fluido demanda un especial cuidado en el sellado de las formaleas para evitar la pérdida de pasta. La dosis óptima se debe determinar mediante ensayos con los materiales y en las condiciones de la obra. Al adicionar Sikament-N 100 para superfluidificar una mezcla con asentamiento menor de 5 cm, el efecto superplastificante se reduce notablemente y se incrementan los requerimientos del aditivo. Cuando se emplea para recuperar la bombeabilidad de una mezcla perdida por demoras en la colocación y se desea plasticidad por más de 1 hora adicional, agregue un plastificante retardante y luego Sikament-N 100 o Sikament-R 100. Los mejores resultados se obtienen cuando los componentes que intervienen en la preparación del concreto cumplen con las normas vigentes.</p>



CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

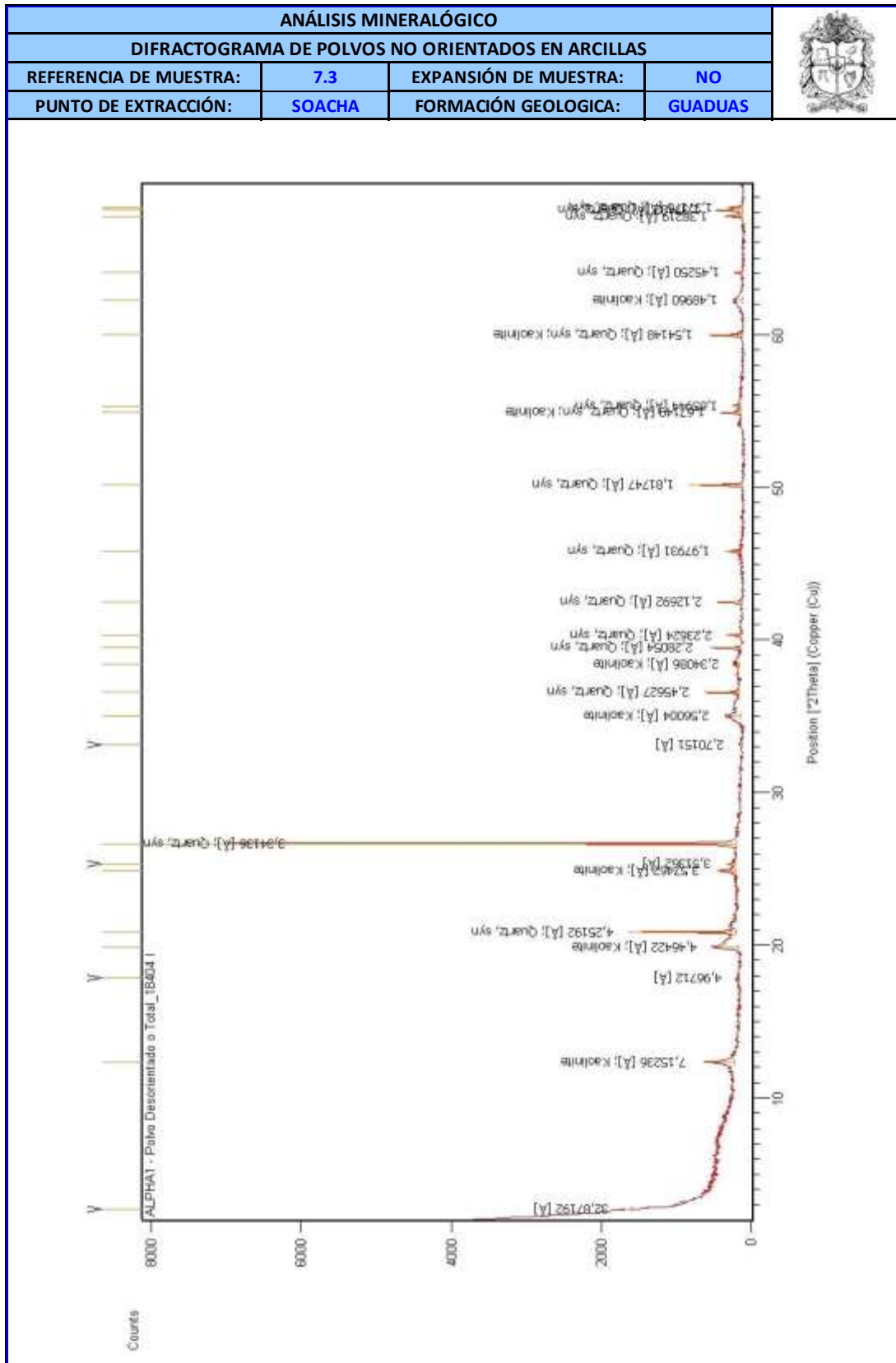
	Dosificar por separado cuando se usen otros aditivos en la misma mezcla; si se emplea un plastificante retardante adicionalmente previamente al Sikament-N 100. El curado del concreto con agua y/o Antisol antes y después del fraguado es indispensable.
MEDIDAS DE SEGURIDAD	Manténgase fuera del alcance de los niños. Usar guantes de caucho y gafas de protección en su manipulación. Consultar Hoja de Seguridad del producto.
PRESENTACION	Tambor: 230 kg o a granel
ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE	Un (1) año en sitio fresco y bajo techo, en su envase original, bien cerrado. Para su transporte deben tomarse las precauciones normales de productos químicos.
CODIGOS R/S	R: 22/25 S: 26

NOTA: La información, en particular, las recomendaciones sobre aplicación, presentada por el producto Sika, son proporcionadas tal como se las recibe en el momento y según las prácticas de Sika respecto a sus productos, siempre cuando éstos sean adecuadamente almacenados y manipulados, así como aplicados en condiciones normales. De la misma manera, las diferencias en las condiciones, normativas y condiciones de la obra son de la exclusiva responsabilidad que de esta información, cualquier recomendación escrita o cualquier otro consejo que pueda haberse recibido, respecto a la comercialización, calidad o seguridad del producto o una finalidad en particular, así como responsabilidad alguna que surge de cualquier relación legal. Se debe respetar los derechos de propiedad intelectual. Toda la información surge con carácter de acuerdo con nuestros actuales estándares de calidad y desempeño. Los usuarios deben referirse siempre al sitio web de la Sika Colombia, según corresponda, hechas a solicitud del cliente.

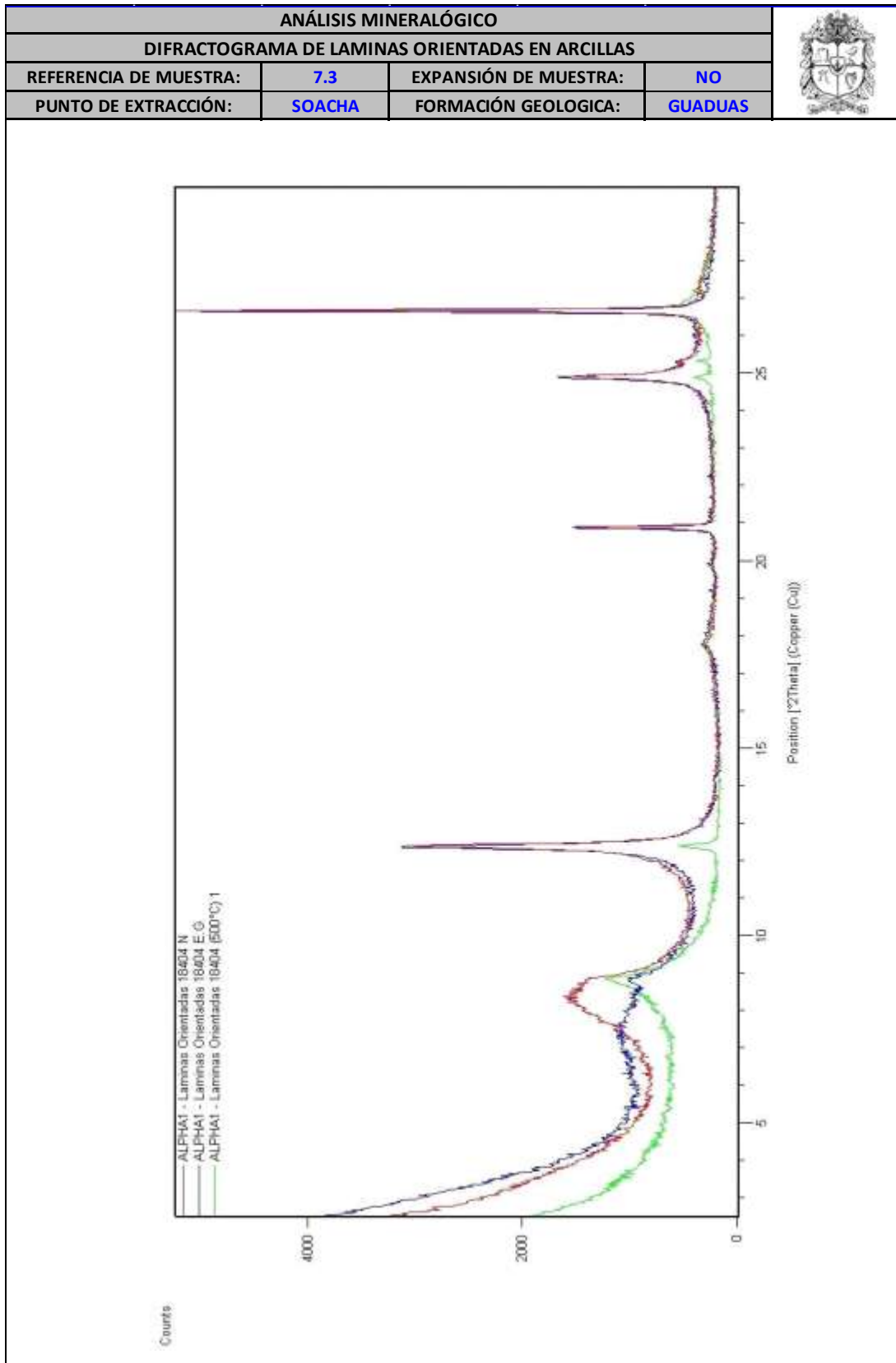


ANEXO F:
**DIFRACTOGRAMAS DE LOS ANÁLISIS MINERALÓGICOS
DE LAS ARCILLAS**

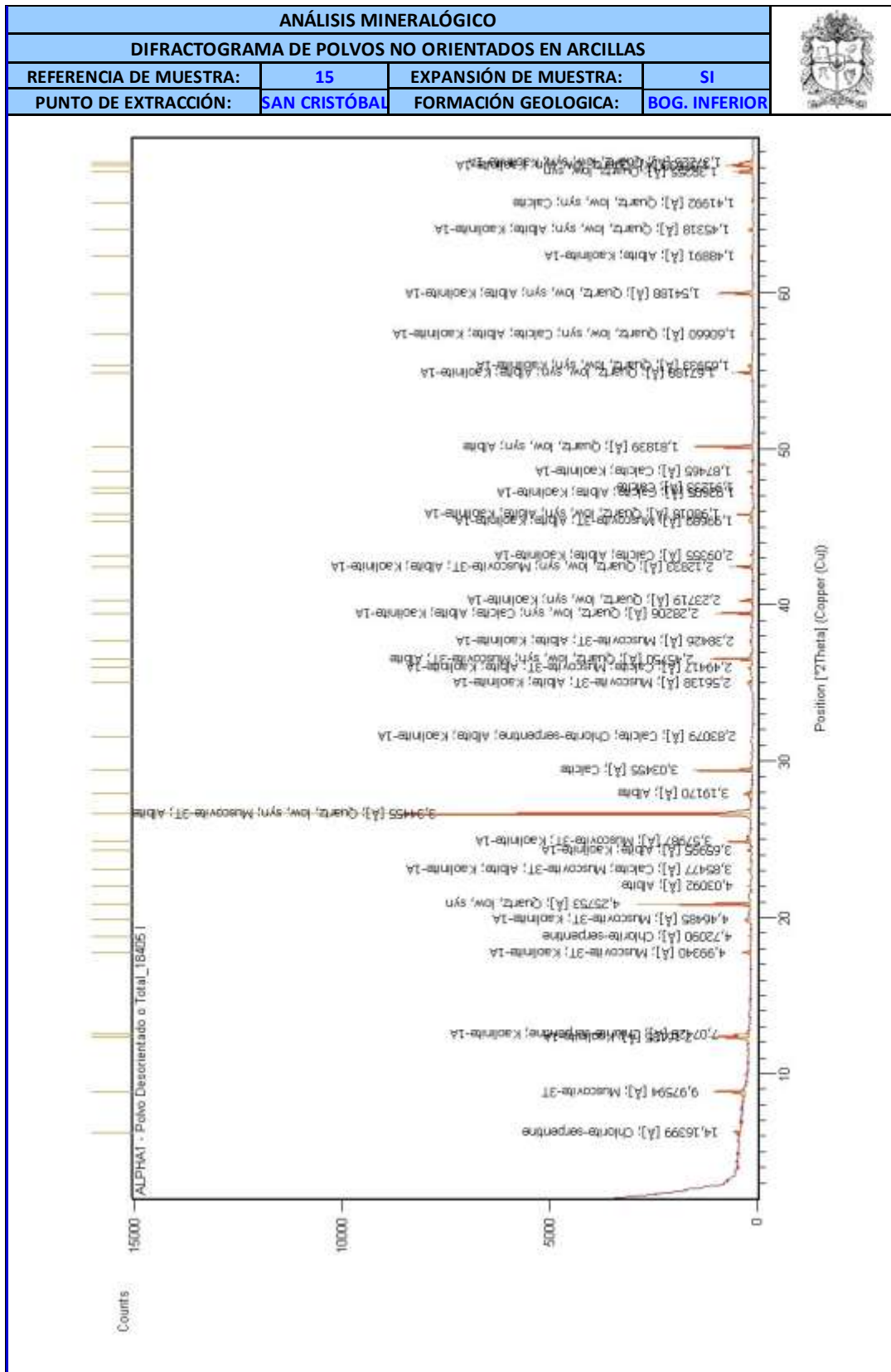
CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTÁ



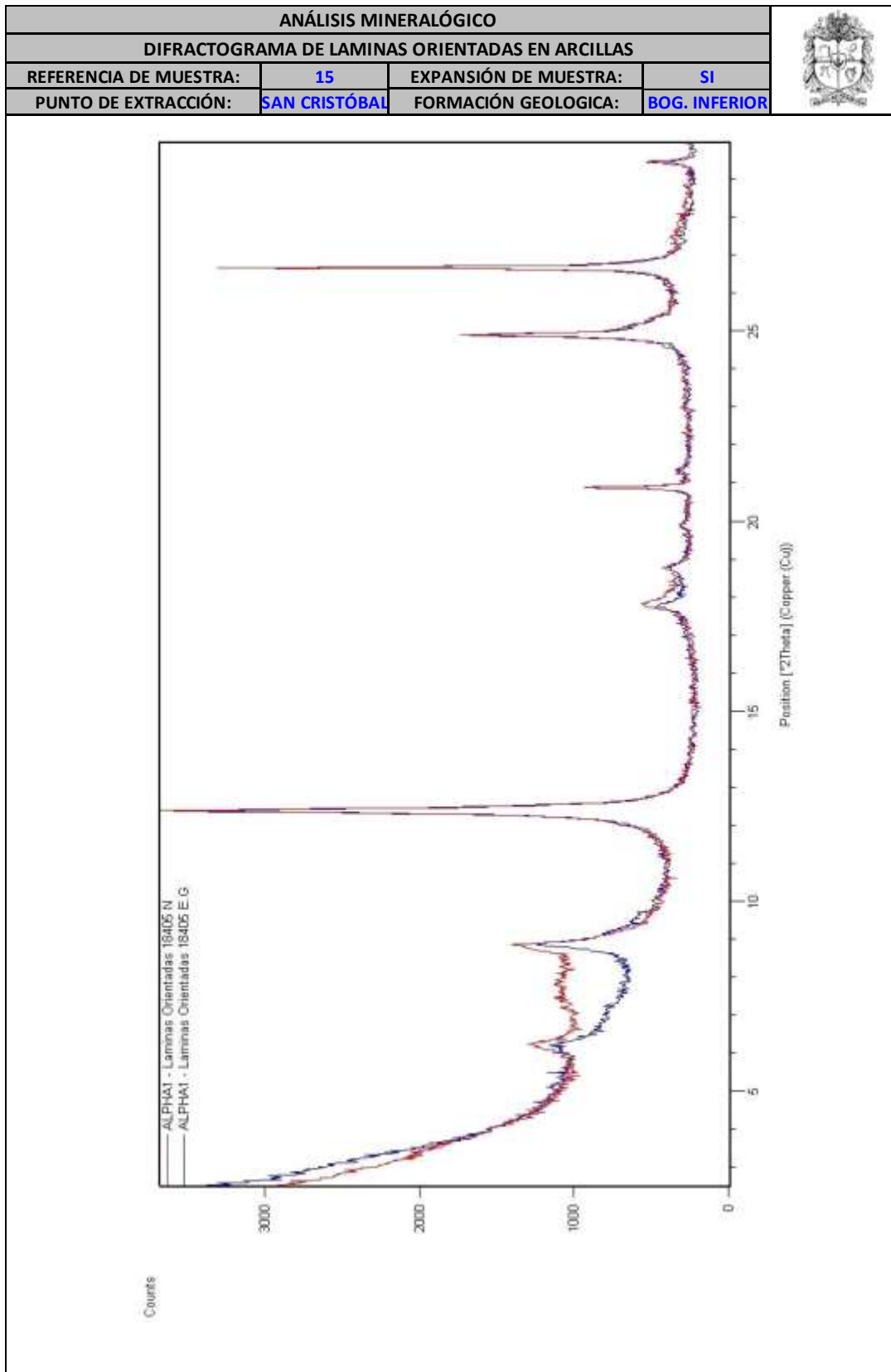
CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA



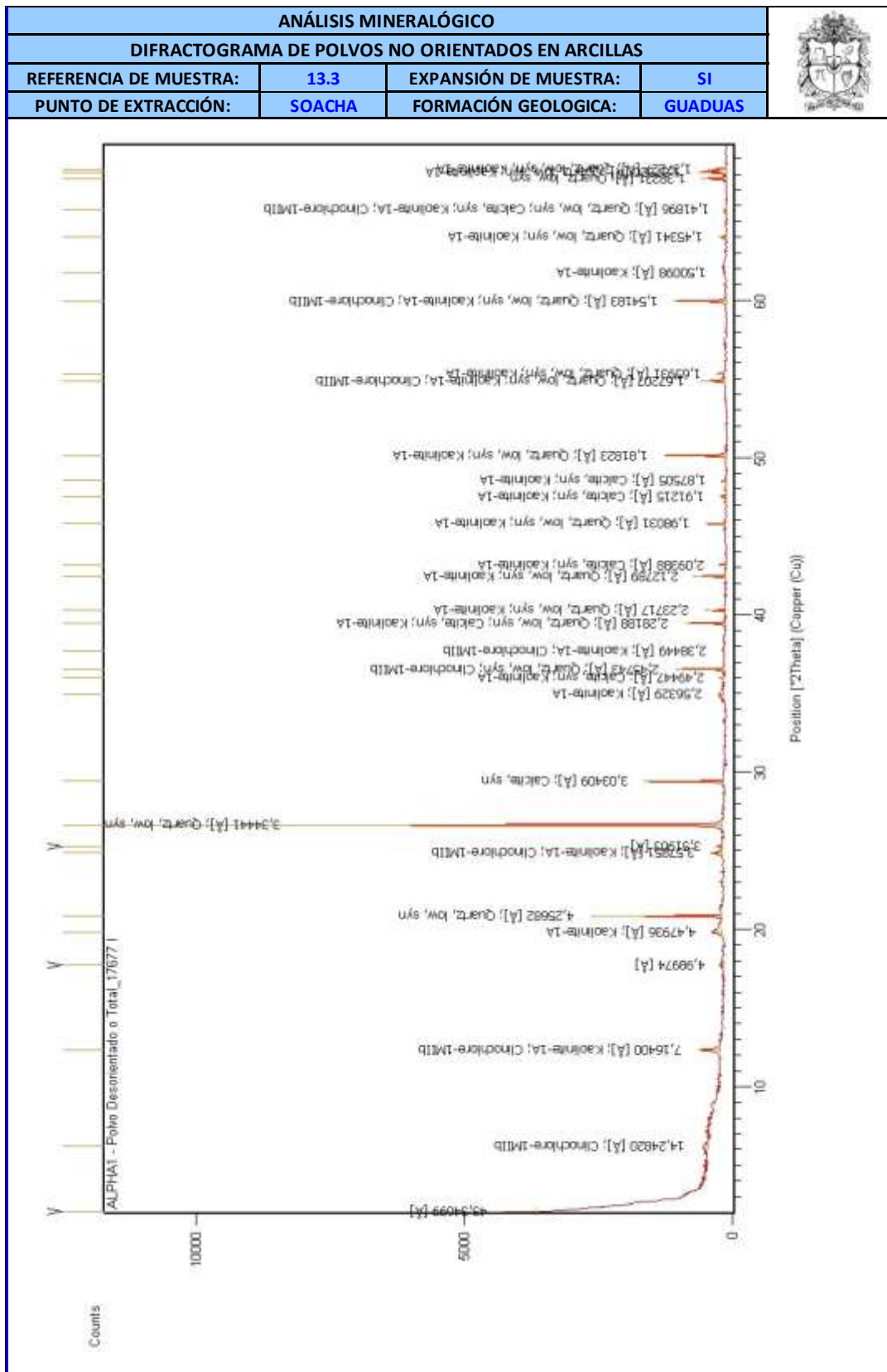
CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTÁ



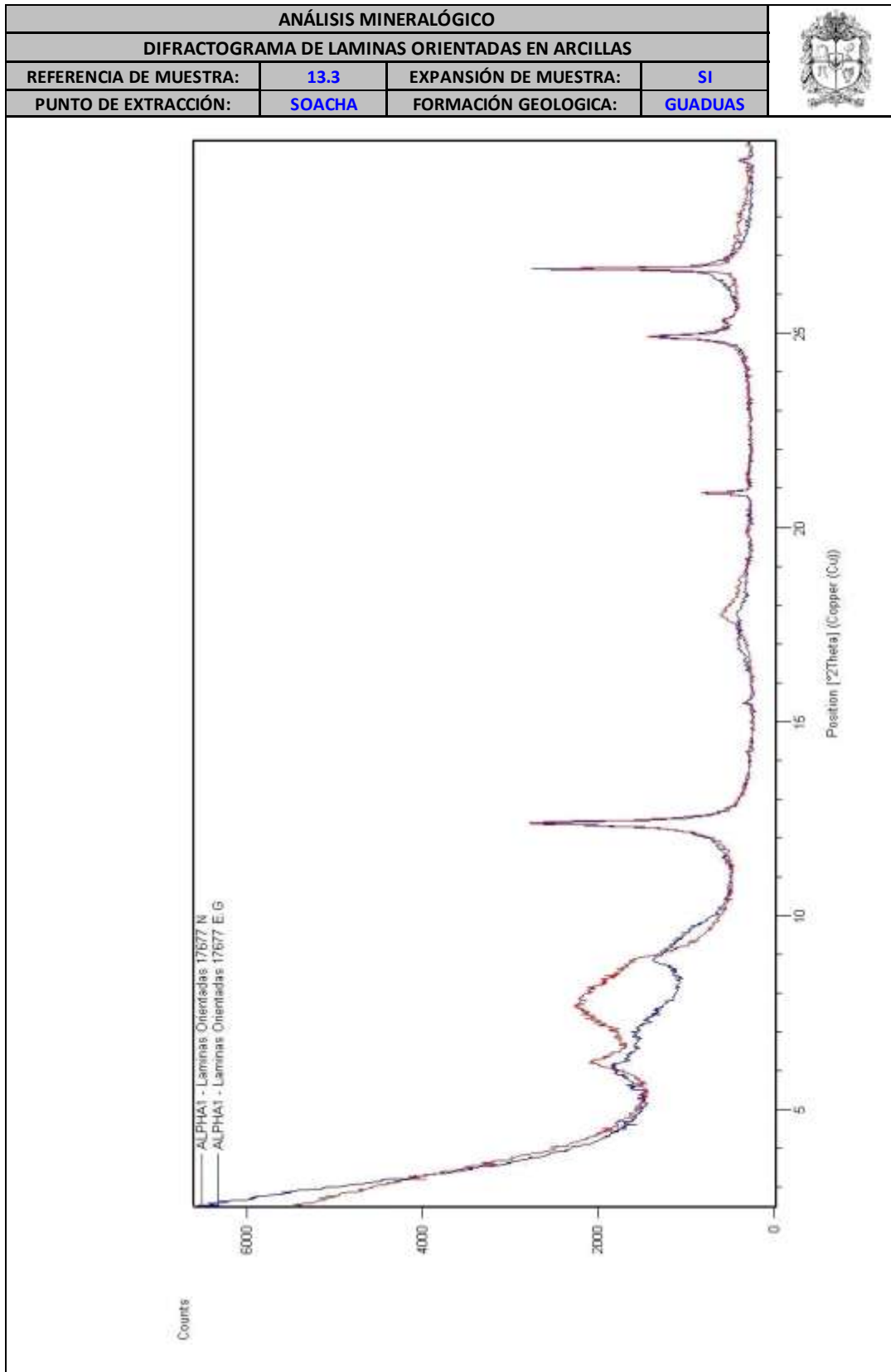
CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA



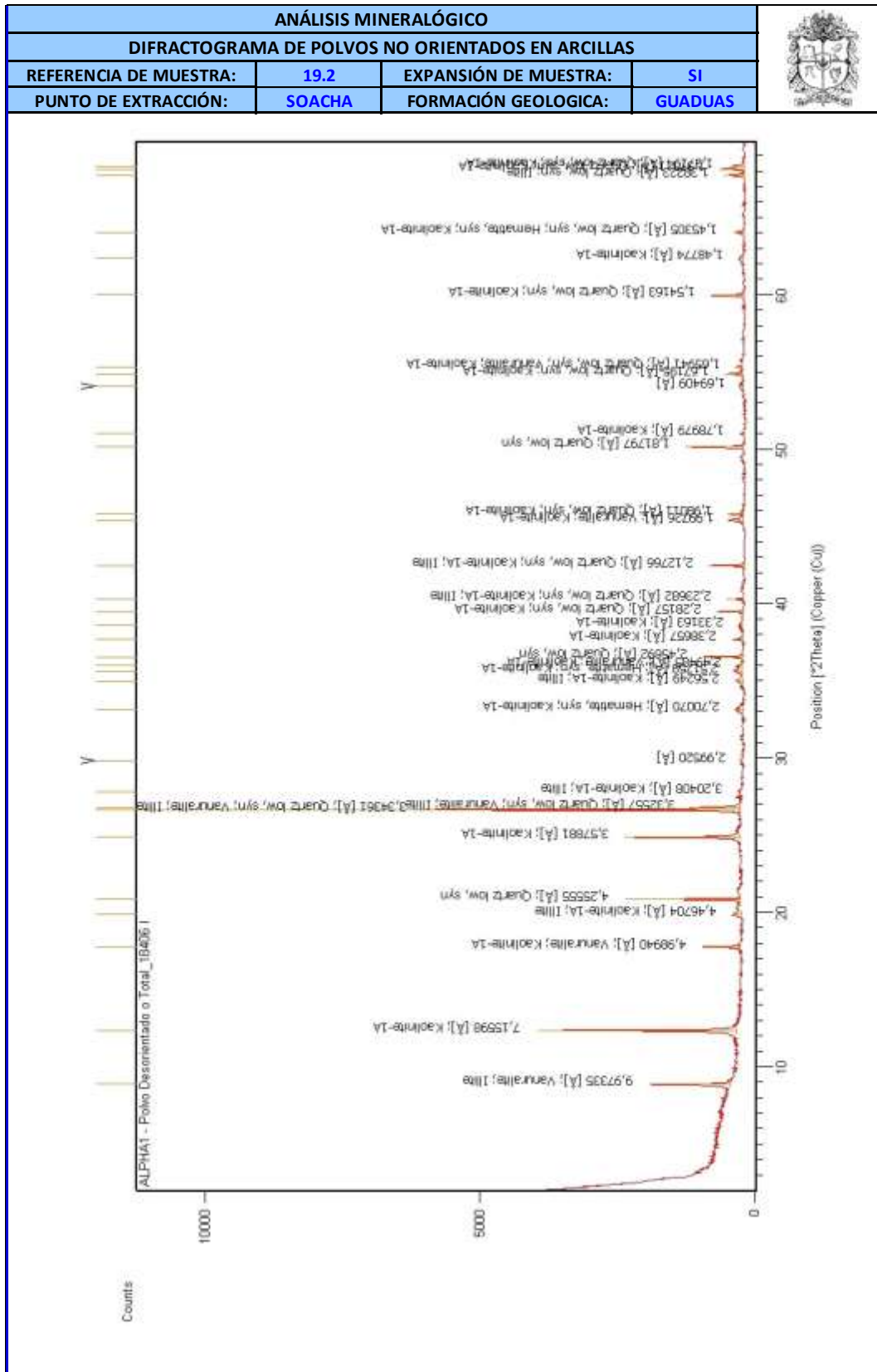
CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTÁ



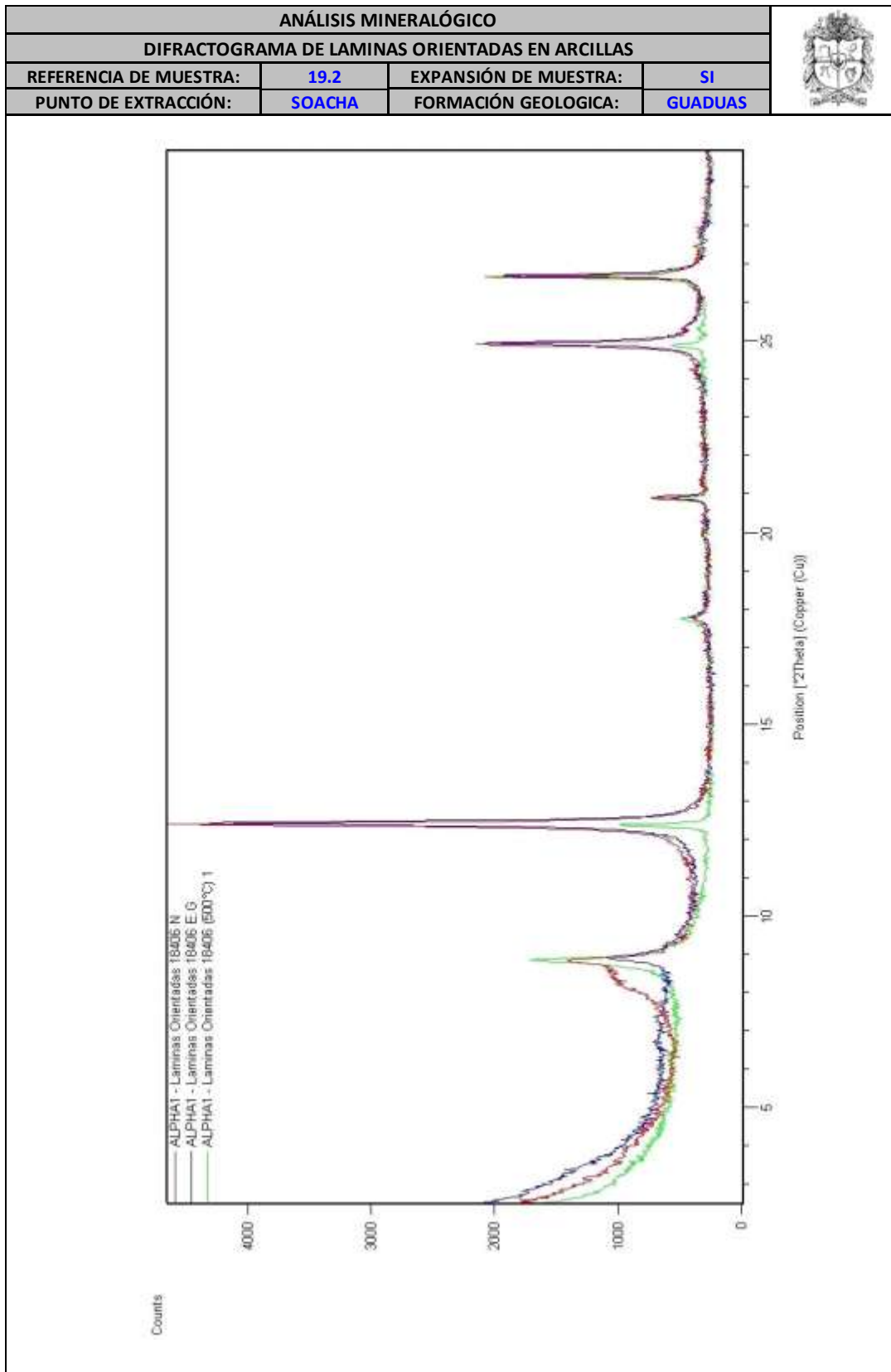
CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA



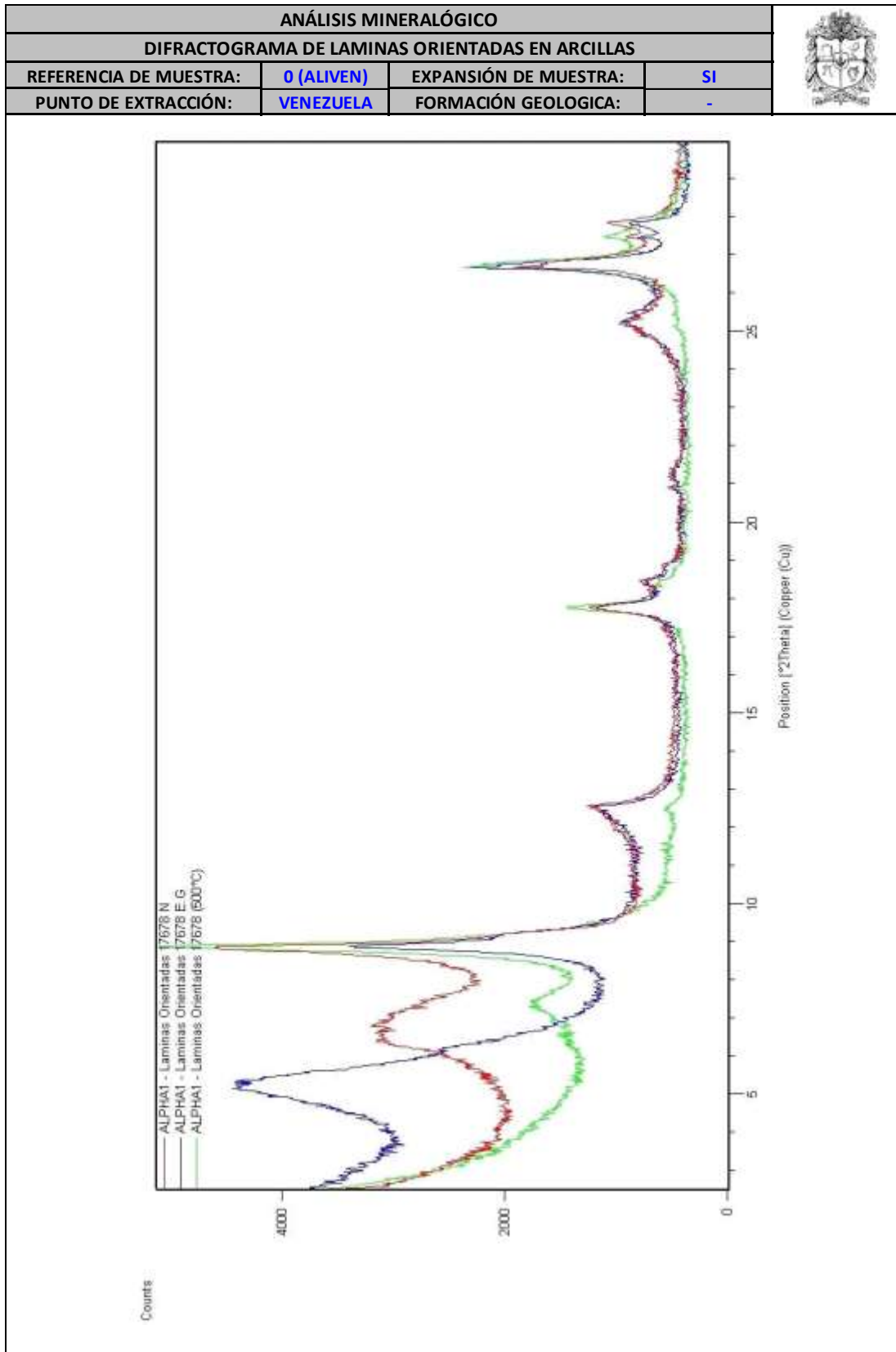
CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA



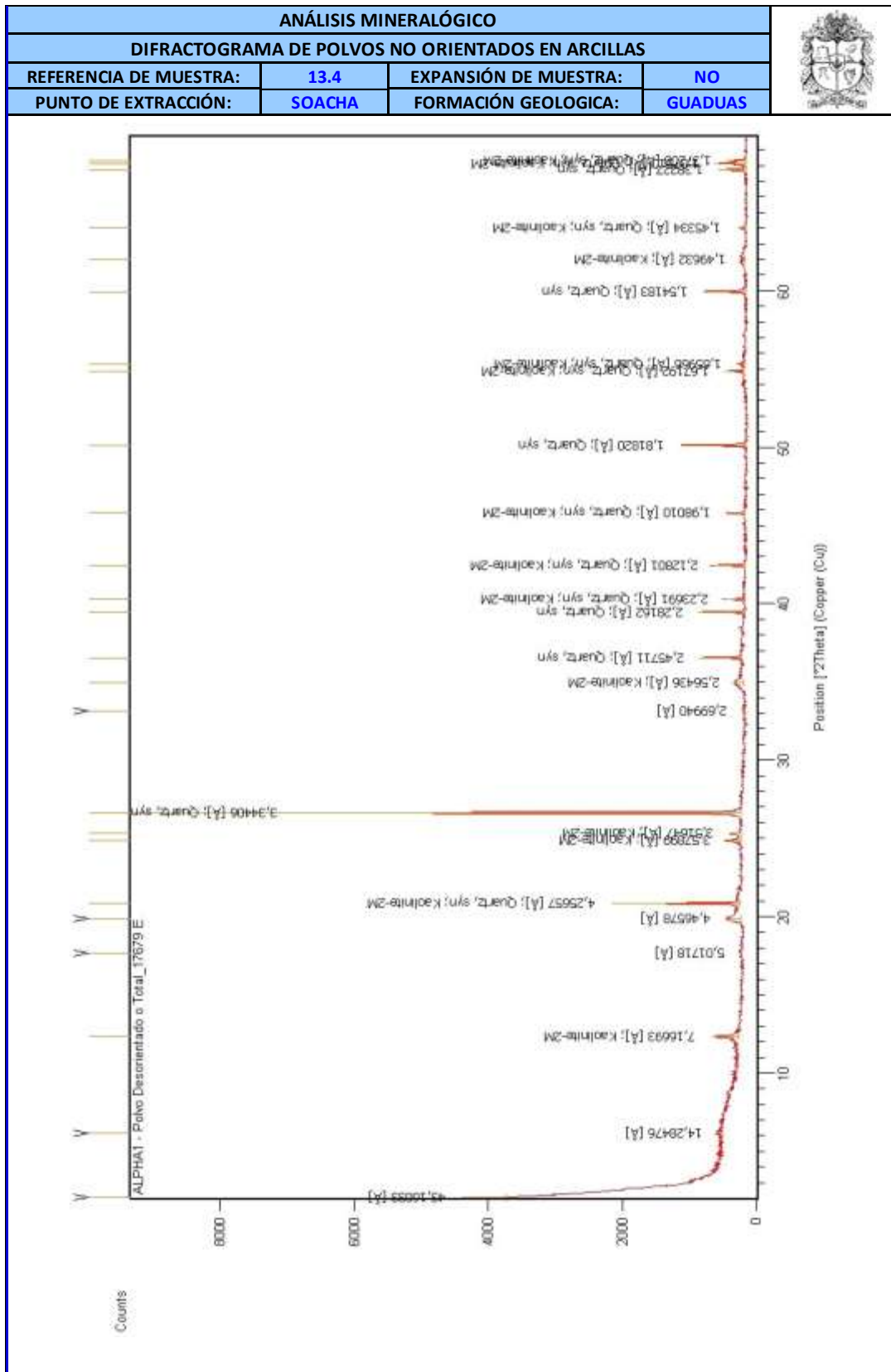
CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA



CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA



CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA



CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL CON ARCILLA EXPANDIDA TERMICAMENTE EXTRAIDA DE CANTERAS LOCALIZADAS EN EL SUR DE LA SABANA DE BOGOTA

