

FABRICACIÓN DE HORMIGONES LIVIANOS CON MATERIALES VOLCANOCLÁSTICOS (LAPILLI) Y SU INFLUENCIA EN LA REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS

Andrés Paul Martínez Ruiz ⁽¹⁾, Pablo Enrique Caiza Sánchez ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".
Programa de Titulación- Ingeniería Civil
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos

⁽²⁾ Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos

RESUMEN

Este artículo determina la factibilidad de uso de materiales de procedencia ígnea para la fabricación de hormigones livianos, enfrentando afecciones producidas por la reactividad álcali-sílice (RAS). Para el efecto se analiza una gama de materiales volcanoclásticos presentes en la superficie de la Provincia de Cotopaxi-Ecuador. De las rocas analizadas, los áridos lapilli negros obtuvieron los mejores resultados para su posterior aplicación en hormigones, a pesar de considerarse, por su estructura celular, como un agregado de mala calidad. Por lo cual, se tomaron medidas técnicas dentro de la dosificación, mezclado y compactación, y se alcanzaron resistencias a los 28 días de 280 kg/cm², con un margen de seguridad del 33 % por encima de las resistencias de diseño. Por otro lado se observó que, los hormigones livianos tienen un efecto significativo en el comportamiento sísmico resistente de las estructuras, tanto en la reducción de fuerzas sísmicas como en los desplazamientos relativos de piso.

Palabras clave: Volcanoclásticos, hormigones livianos, reactividad álcali-sílice, fuerzas sísmicas, desplazamientos relativos de piso.

ABSTRACT

This article determines the feasibility of using materials of igneous origin for the manufacture of lightweight concrete, facing conditions caused by alkali-silica reactivity (RAS). For this purpose a range of volcanoclastic materials, at the surface of the Cotopaxi Province in Ecuador, is analyzed. Among the rocks analyzed, black lapilli obtained the best results for later use in concrete, although it is regarded, by its cellular structure, as an aggregate of poor quality. Therefore, Taking technical measures within dosing, mixing and compactation procedures, 280 kg / cm² strength is achieved, with a safety margin of 33% above the design strengths. Furthermore it was observed that the lightweight concrete has a significant effect on the behavior of earthquake resistant structures, both in reducing the seismic forces and story drift.

Keywords: volcanoclastics, lightweight concrete, alkali-silica reactivity, seismic forces, story drift

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo analiza la posibilidad de usar materiales alternativos, considerados de mala calidad en primera instancia, para la elaboración de hormigones estructurales. Esto se debe sobre todo a sus posibles ventajas para el diseño sismo resistente. En la zona de Cotopaxi, la actividad económica de mayor demanda es la agricultura, una de las estructuras más utilizadas son los invernaderos. Por lo cual, se pretende elaborar sus cimentaciones con materiales obtenidos directamente de las faldas del Volcán Cotopaxi ($0^{\circ} 48' 48.71''$ Sur, $78^{\circ} 55' 41.67''$ Oeste), donde se encuentran grandes depósitos de piedra pómez (lapilli).

En términos generales, la piedra pómez es una roca porosa, frágil y de bajo peso específico, procedente de magma volcánico, que está compuesta por cuarzo en forma de vidrio volcánico y silicatos (principalmente feldespato). Adicionalmente, dentro del análisis de la composición mineralógica que presenta este agregado, el (NEVI_12, 2011), menciona que el árido para ser utilizado en hormigón no debe contener ningún material que sea perjudicialmente reactivo con los álcalis del cemento y en cantidad suficiente que cause expansiones excesivas al mortero o al hormigón.

1.1 Materiales Analizados

El área de estudio se concentró en San Agustín de Callo, Cotopaxi, Ecuador, mismo que se encuentra asentado sobre una vasta extensión de áridos ligeros, producto de la cercanía con el volcán Cotopaxi. Existe gran abundancia de piedra pómez (lapilli), identificada por su color en dos tipos, y en general más conocida en el medio como chasqui (Ver Figura 1), La chasqui blanca (CHB) es comúnmente utilizada para la elaboración de bloques de hormigón para mampostería, mientras que la chasqui negra (CHN) es desechada en los procesos de explotación por su notable dureza y, por lo tanto, poca manejabilidad en la producción de bloques alivianados para paredes.



Figura 1 Chasqui Blanco y Negro, extracto de la zona de Lasso Cotopaxi

1.2 Hormigones livianos con piedra pómez de tipo lapilli.

La gran mayoría de los hormigones que se elaboran en Ecuador ocupan para su fabricación agregados de densidad normal, por lo que el hormigón liviano, es un material poco conocido. Sin embargo existen razones que justificarían su empleo estructural, debido fundamentalmente a la abundancia de material de baja densidad (piedra pómez).

El hormigón estructural de peso liviano se define en ACI (213R, 1987), como aquel que posee una densidad en situ (peso unitario) en el orden de 90 a 115lb/pie³ (1440 a 1840 kg/m³) en comparación con el concreto de peso normal que presenta una densidad en el rango de 140 a 150 lb/pie³ (2240 a 2400 kg/m³). Adicionalmente, para aplicaciones estructurales la resistencia del concreto a la compresión deberá ser superior a 17.2 MPa, (Mauricio López, 2006).

En las recomendaciones del ACI (211.2.98, 2000), la pre saturación de áridos ligeros, junto con la granulometría y la relación agua/cemento, son considerados los factores más influyentes en el diseño de los hormigones ligeros estructurales. Además gran parte del desarrollo de los hormigones livianos menciona que los hormigones que alcanzan mayores resistencias, reemplazan todo o una porción de la parte fina con arena de peso normal. En este artículo se busca el aprovechamiento total (reemplazar tanto el agregado fino como el grueso), de los materiales de la zona de estudio, porque se cree que generaría un impacto en los costos de construcción de este tipo de estructuras.

Es importante mencionar que se trata con agregados que aparentemente son de mala calidad, lo que hace pensar que la resistencia a la compresión no alcanzará niveles estructurales. Sin embargo el ACI (213R, 1987), menciona que con algunos agregados livianos no hay ninguna dificultad en la obtención de resistencia a la compresión de hasta 41 MPa.

1.3 Reactividad de los Agregados

La reacción álcali- agregado, está identificada como un fenómeno físico y químico que se produce al reaccionar los hidróxidos alcalinos del hormigón y los compuestos minerales que presenta la roca empleada como agregado, generando productos químicos que pueden llegar a desatar expansiones y micro fisuras del hormigón según (ALAEJOS, 2003).

En esta reacción, cabe mencionar, que todas las rocas silíceas han sido clasificadas en algún caso como árido reactivos, pero la experiencia de unos países a otros y el comportamiento de los áridos en obra no son directamente extrapolables (BCA, 1992). Debido a esto, es importante el uso de diferentes ensayos que permitan comprobar de forma específica el comportamiento del agregado a utilizar en este estudio. Uno de los parámetros de mayor influencia en el RAS está la estructura del mineral, ya que la reacción será más rápida en tanto que más desordenada sea la estructura del mineral.

Dentro de la estructura mineral, el vidrio volcánico de la piedra pómez es su componente potencialmente reactivo.

De la descripción en (JOYCE., 1996), acerca del vidrio volcánico, cabe indicar que, "Dependiendo del tipo de magma, el vidrio ira de ultrabásico a ácido. Los vidrios ácidos e intermedios son los reactivos. Los básicos (normalmente basálticos) son inocuos".

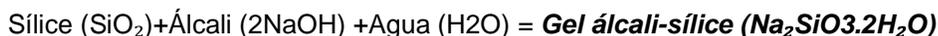
1.4 Reactividad Álcali- Sílice (RAS)

La particularidad de la reacción es la formación de un gel, que al estar en contacto con el agua, tiene la propiedad de absorberla y aumentar su volumen. Este gel se ubica en los poros y micro-poros del hormigón, los que al llenarse inducen tensiones y agrietamientos, que pueden llegar a producir fallas por fatiga y eventualmente la desintegración del hormigón, afectando su durabilidad.

1.4.1 Proceso de la RAS

La reacción álcali-sílice se produce entre los iones hidroxilos (OH-) de los hidróxidos de sodio y potasio presentes en el cemento y los componentes silíceos reactivos de los agregados. La presencia de iones (OH-) quiebra la estructura de la sílice de los agregados y luego, la diferencia de carga permite la adsorción de los iones alcalinos, dando lugar a la formación de un gel sílico-alcalino (composición aproximada de los silicatos de sodio y potasio), expansivo al absorber agua en presencia de calcio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución, (Silvia Palazzi, 2008). Las reacciones químicas son:

Proceso 1



Proceso 2

El gel producto de la reacción + agua = **Expansión del hormigón**

2. RESULTADOS

Se utilizaron 3 muestras para el estudio, dos son procedentes de San Agustín, y la muestra restante, es derivada de Latacunga, misma que será utilizada como un elemento comparativo. El origen y designación para cada muestra se describen en la Tabla 1:

Tabla 1 Identificación y Descripción de los Agregados

Ubicación	Nombre	Agregado	Designación
San Agustín de Coltas; 0° 48' 48.71" Sur, 78° 55' 41.67" Oeste	Cantera "EGAS"	Chasqui Blanco	 CHB
		Chasqui Negro	 CHN
C. Honduras-Latacunga; 0° 54' 35,20" Sur, 78°38' 39,60" Oeste	Cantera "Pitigua"	Pumita	 PL

Las propiedades de los agregados son fundamentales para determinar los requisitos que deben cumplir los áridos para ser utilizados en la preparación de hormigón de cemento hidráulico. El análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de tolerancia, resistencia mecánica, descripción mineralógica del árido y comportamiento expansivo se muestran a continuación.

2.1 FASE 1: Ensayos de caracterización de los áridos:

Estos estudios tienen como objetivo determinar los parámetros de tolerancia de cada árido en estudio (CHB, CHN, PL), así como la identificación de sus componentes químicos a través de un ensayo de Difracción de Rayos X, con el fin de realizar un análisis comparativo de sus propiedades físico- mineralógicas que permita establecer el árido óptimo para la elaboración de hormigones.

2.1.1 Caracterización Física de los Áridos

En las Tablas 2, 3, 4 se muestran las propiedades físicas de los áridos CHN, CHB, y PI.

Tabla 2 ÁRIDO CHN. Tabla Resumen de Propiedades Físicas

VALORES CARACTERISTICOS- CHN			
Propiedades	Valor	Unidades	Imagen Chasqui Negra
Peso Especifico	1,098	g/cm ³	
Peso Especifico S.S.S.	1,119	g/cm ³	
Absorción de Agua	19	%	
Densidad Suelta	0,645	g/cm ³	
Densidad Compactada	0,7	g/cm ³	
Carga Abrasiva	12 esferas	-	
Abrasión en Porcentaje	41,25	%	

GRANULOMETRÍA					
Tamices	Tamices (mm)	Peso (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
2"	50,0	0	0,000	0,000	100,0
1 1/2"	38	0	0,000	0,000	100,0
1"	25	504,8	4,669	4,669	95,3
3/4"	19	2774,1	25,658	30,327	69,7
1/2"	12,7	3285,9	30,392	60,718	39,3
3/8"	9,5	2254,1	20,848	81,567	18,4
Nº 4	4,75	1119,6	10,355	91,922	8,1
Nº 8	2,36	208,6	1,929	93,851	6,1
Fondo		664,8	6,149	100,000	0,0
TOTAL		10811,9	100		

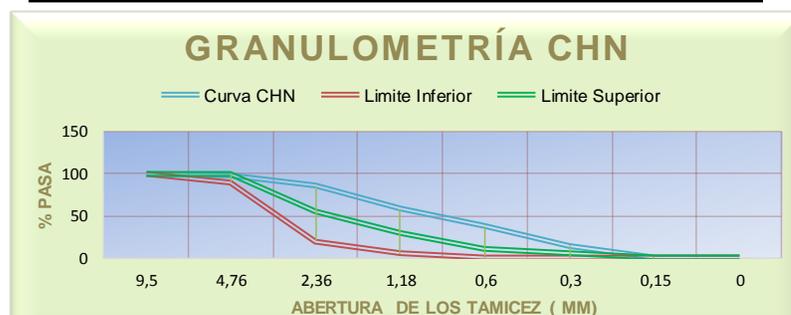


Tabla 3 ÁRIDO CHB. Tabla Resumen de Propiedades Físicas

VALORES CARACTERÍSTICOS- CHB			
Propiedades	Valor	Unidades	Imagen Chasqui Blanca
Peso Específico	0,604	g/cm ³	
Peso Específico S.S.S.	0,616	g/cm ³	
Absorción de Agua	41	%	
Densidad Suelta	0,474	g/cm ³	
Densidad Compactada	0,495	g/cm ³	
Carga Abrasiva	12 esferas	-	
Abrasión en Porcentaje	43,09	%	

Tabla 4 ÁRIDO PL. Tabla Resumen de Propiedades Físicas

VALORES CARACTERÍSTICOS- PL			
Propiedades	Valor	Unidades	Imagen Pumita
Peso Específico	0,348	g/cm ³	
Peso Específico S.S.S.	0,355	g/cm ³	
Absorción de Agua	53	%	
Densidad Suelta	0,487	g/cm ³	
Densidad Compactada	0,541	g/cm ³	
Carga Abrasiva	12 esferas	-	
Abrasión en Porcentaje	54,17	%	

2.1.2 Caracterización Mineralógica de los Áridos (Difracción de Rayos X)

La determinación de los compuestos con cristalización definida presente en las muestras se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE, y el programa Diffrac plus para cualificación y cuantificación. A continuación en las Tablas 5 y 6, se detallan los resultados obtenidos en el análisis:

Tabla 5 ARIDO CHN. Propiedades Mineralógicas. Ensayo de Difracción de Rayos X.

MUESTRA CHN		
Mineral	Formula	Contenido (%)
Grupo plagioclasa (albita, andesita, anortita)	(Na, Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	86
Coesita	SiO ₂	2
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	5
Halloysita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄ H ₂ O	2
Maghemita	Fe ₂ O ₃	5

Tabla 6 ARIDO CHB. Propiedades Mineralógicas Fuente: Ensayo de Difracción de Rayo X.

MUESTRA CHB		
Mineral	Formula	Contenido (%)
Grupo plagioclasa (albita, andesita, anortita)	$(Na, Ca)Al(Si, Al)Si_2O_8$	52
Coesita	SiO_2	3
Caolinita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	39
Halloysita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4 \cdot H_2O$	2
Maghemita	Fe_2O_3	4

En el caso del árido PL, los resultados de la muestra no presentan una cristalinidad definida, y se la precisa como una muestra amorfa.

2.1.3 Discusión de Resultados de Caracterización de los Áridos.

La Fase 1 de este proyecto nos permite establecer las primeras resoluciones en torno a la factibilidad de uso de los materiales en estudio, como agregados para hormigones. A continuación se presentan algunas conclusiones preliminares que son decisivas para la continuidad del proyecto.

El árido CHN presenta las mejores condiciones tanto físicas como mineralógicas, por lo que se evaluará su comportamiento expansivo, y posteriormente mecánico dentro de una mezcla de hormigón. El árido CHN paso la prueba de desgaste a la abrasión con un 41.25%, y a pesar de tener una absorción también elevada de 19%, tiene mejores condiciones que los otros áridos analizados. Lo más importante a destacar es su granulometría que exhibe una distribución de tamaños bastante ajustado a los límites de gradación que expone la norma, así como una forma y textura recomendable para un mejor comportamiento de adherencia en la mezcla. Los resultados mineralógicos muestran que su contenido de sílice es de 2%, que al igual que CHB, es considerado un árido no reactivo con los álcalis del cemento. Además su alto contenido de feldespato se considera beneficioso, pues este mineral posee una gran tendencia a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente, dando lugar a una nueva formación de compuestos estables, poco solubles en el agua y que poseen características cementantes, es decir, capaces de desarrollar resistencia por endurecimiento hidráulico.

2.2 FASE 2: Identificación y Cuantificación de componentes reactivos.

Esta fase del estudio permitirá constatar la presencia de componentes reactivos en el árido identificado como óptimo para la elaboración de hormigones a través de un estudio de lámina petrográfica.

2.2.1 Sistematización del Estudio Petrográfico

Por el origen de la muestra es de suma importancia la detección de vidrio volcánico, identificado como componente reactivo en la bibliografía. A partir de lo expuesto, se tratará de fijar criterios lo más objetivos posibles, que permitan diferenciar componentes reactivos e inocuos del árido. Según la NTE INEN (870, 2012), el estudio petrográfico se realiza con el propósito de determinar las cantidades relativas de los componentes de la muestra, reconociendo propiedades que puedan esperarse tengan influencia en el comportamiento del material según el uso deseado. En el presente estudio, es necesario determinar si hay presentes sustancias potencial y perjudicialmente reactivas, y de existir, en qué cantidades. A continuación la Tabla 7 presenta los resultados de la Petrografía efectuada al árido CHN.

Tabla 7 ARIDO CHN. Porcentaje aproximado de minerales en la muestra.
Fuente: Estudio Petrográfico

MUESTRA CHN	
Detritos/Clastos	75%
Feldspatos	10 - 15%
Piroxenos	1 - 3%
Anfiboles	1 - 3%
Vidrio volcánico	5 - 10%
Clastos de otras rocas	40 - 45%
Matriz	25%
Feldspatos	5 - 10%
Piroxenos	1 - 5%
Anfiboles	1 - 2%
Vidrio volcánico	5 - 8%
Clastos de otras rocas	1 - 3%

Se confirma los resultados del análisis de Difracción de rayos X, que muestra bajos índices de vidrio volcánico, que es el mineral de mayor interés para los objetivos de la investigación. La Tabla 7 muestra en la sumatoria de clastos y detritos finos (matriz), que alcanza un máximo de 18%, aún menor al 45% de sílice, por lo que se establece como un árido básico según la clasificación de las rocas ígneas por su contenido de sílice (Escobar, 2003), es decir que no es reactivo con los álcalis del cemento. Pero la Norma Ecuatoriana menciona que, los resultados del examen petrográfico deben ser consultados en conexión con otros ensayos químicos para establecer conclusiones y recomendaciones que conciernen al uso de combinaciones árido-cemento en hormigón. Este criterio fue considerado en la siguiente fase del proyecto.

Tabla 8 ARIDO CHN. Microfotografía en luz polarizada y natural.
Fuente: Estudio Petrográfico

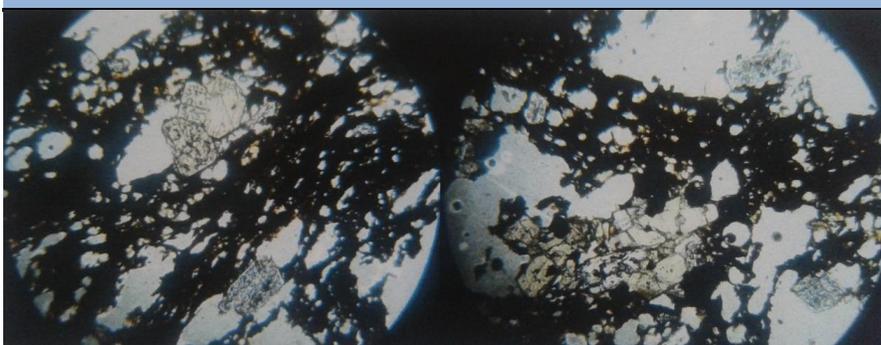
MICROFOTOGRAFÍA EN LUZ POLARIZADA

NOMBRE DE LA ROCA: Volcanoclástico, con detritos de composición basáltica



En un clasto milimétrico en la parte inferior se observa los fenocristales grandes, son de plagioclasas y asociados al vidrio volcánico, en la parte central se observa en la matriz ferro-magnesianos (anfíboles) y pocos piroxenos. Diámetro de cada campo 2,2 mm.

MICROFOTOGRAFÍA EN LUZ NATURAL



En minerales pequeños clastos orientados de formas redondeadas y sub-redondeadas, su orientación es por fluidez, y los incoloros de feldespato, y la masa oscura vidrio volcánico y óxido de hierro.

En la Tabla 8 se observa una textura clástica, con detritos de rocas volcánicas basálticas con piroxenos y anfíboles (minerales del grupo de los silicatos); los clastos son sub-redondeados a angulosos; la matriz está conformada por detritos orientados de rocas volcánicas y masa vítrea o amorfa, es decir que no alcanza una forma cristalina por la rapidez con la que el magma se funde.

2.3 FASE 3: Ensayos de Comportamiento (normalizados):

Una vez conocidos los resultados del estudio petrográfico y definidos los componentes reactivos, se ensayarán las siguientes técnicas para establecer el comportamiento expansivo del árido:

- Ensayo químico (ASTM C289).
- Ensayo acelerado de probetas de mortero (ASTM 1567).

2.3.1 Ensayo Químico ASTM C289

El resultado de este ensayo se expresa como el cociente o la relación molar que existe entre valores de concentración de sílice solubilizada o disuelta del árido silicatado frente a la concentración de sodio que se consume en el proceso (expresada en todos los casos en términos de concentración de Na_2O).

En la Figura 3 que acompaña a la norma ASTM que fija los límites entre reactivo e inocuo, se ha representado el resultado del árido CHN y se muestra la zona en la que se estableció. En la gráfica se marca la relación entre la reducción de la concentración alcalina (Rc) o concentración de hidróxido de sodio y el volumen de sílice disuelto (Sc) en la solución original.

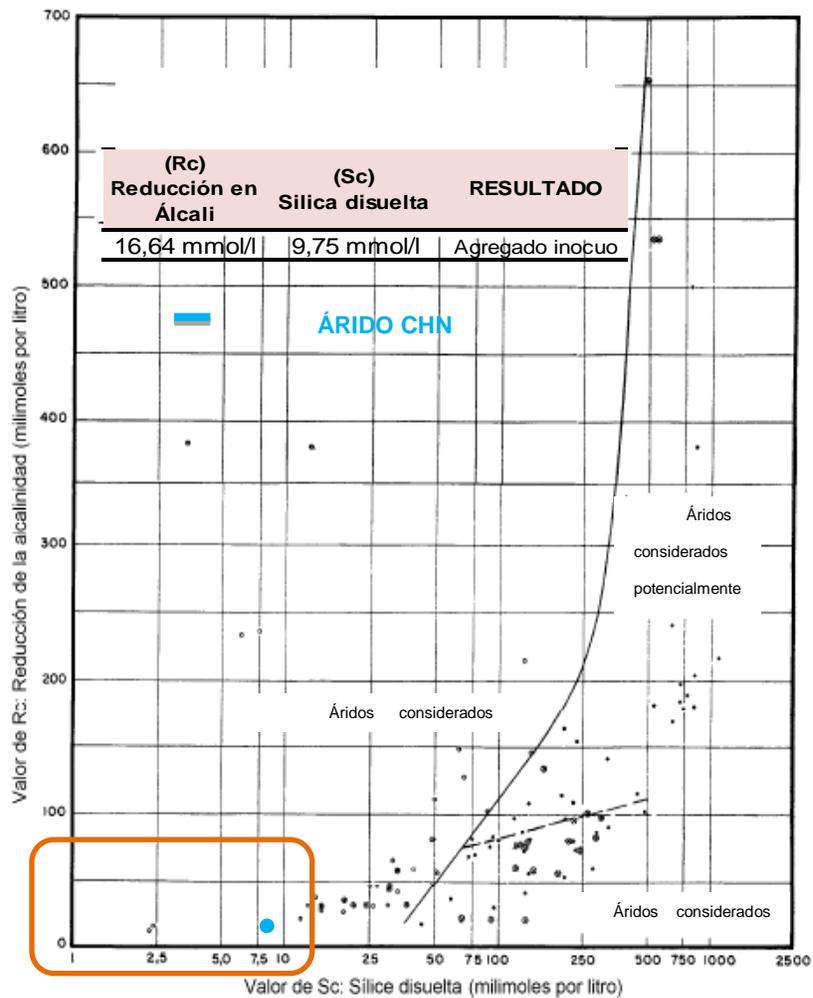


Figura 2 Resultado del Método Químico aplicado al Árido CHN. Detalle de la ubicación del árido.
Fuente: Método Químico ASTM C289

El ensayo clasifica al árido CHN, por la zona establecida en la Figura 2 como un agregado inocuo, ya que la sílice disuelta por el árido no es suficiente para clasificarlo como reactivo. La NTE INEN (868, 2011), recomienda que las interpretaciones basadas en este método se correlacionen con la NTE INEN (870, 2012), correspondiente a la petrografía de los áridos.

Por lo que al analizar los resultados, se establece una relación semejante en ambos ensayos, que clasifica al árido CHN como no reactivo. Sin embargo el método químico tienen limitaciones que pueden deberse a un tiempo corto de ensayo, por lo que la norma ecuatoriana recomienda que el carácter inocuo del árido deberá ser comprobado por ensayos complementarios, en este caso el ensayo acelerado de barras de mortero, NTE INEN (867, 2009).

2.3.2 Ensayo Acelerado de Barras de Mortero.

De la misma forma que el método anterior, estas probetas se someten al ataque de una disolución de NaOH $10^3 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$, a 80°C , midiendo la elongación de cada probeta en diferentes edades. Se ha realizado el ensayo acelerado de probetas de mortero al árido CHN y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 9 Deformaciones de las Barras en Porcentaje del Árido CHN.
Fuente: Ensayo Acelerado de Barras de Mortero.

Edad días	Deformaciones de las Barras (%)				
	barra 1	barra 2	barra 3	Promedio	Norma
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100
8	0,009	0,012	0,012	0,011	0,100
11	0,015	0,013	0,015	0,014	0,100
14	0,016	0,016	0,017	0,016	0,100
16	0,018	0,019	0,019	0,019	0,100

De los resultados obtenidos, la Tabla 9 muestra las deformaciones medidas a diferentes edades, en tres barras de mortero elaboradas con el árido CHN, donde la deformación promedio a los 14 días desde la medición cero, fue un valor de 0.019% ($<0.10\%$), que según la norma determina al árido como "INOCUO".

Para tener una idea de la evolución de crecimiento, la Figura 3 presenta una gráfica de tiempo (días) vs porcentaje de expansión de cada barra en análisis, gráfica que es conocida como Curva de Crecimiento.

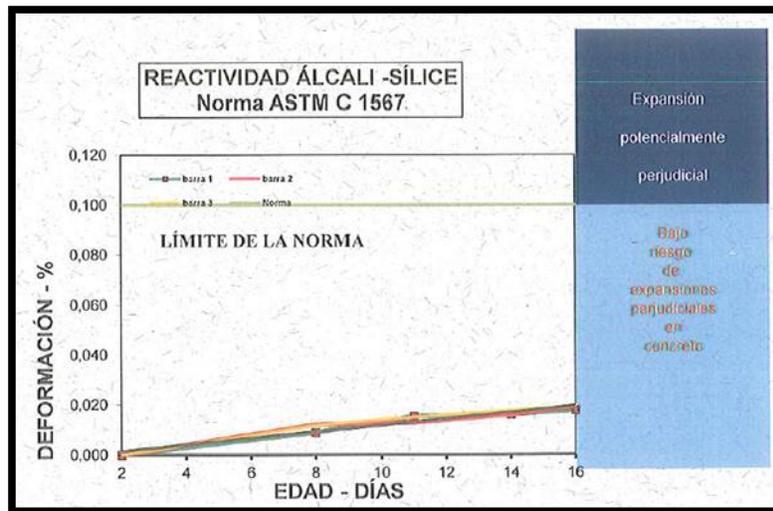


Figura 3 Curva de Crecimiento del Árido CHN. Fuente: Ensayo Acelerado de Barras de Mortero

2.4 FASE 4: Ensayos de Resistencia Mecánica

Esta fase contempla la clasificación del árido según su resistencia a la compresión uniaxial mediante el ensayo de Carga Puntual en Rocas descrita en el ASTM D5731, Resistencia a la Compresión de Cilindros de Hormigón, Ensayo de Módulo de Elasticidad del Material, Densidad del Concreto, mismos que se presentan en un resumen a continuación en la Tabla 14. Pero previo a lo expuesto, se considera de gran importancia la descripción de las propiedades del árido fino, así como de los criterios adoptados para la dosificación, mezclado y compactación de los hormigones fabricados en laboratorio.

2.4.1 Proporciones de las Mezclas de Prueba

Tabla 10 ARIDO FINO. Tabla Resumen de Propiedades Físicas y Mineralógicas.

VALORES CARACTERISTICOS- FINO			PROPIEDADES MINERALÓGICAS	
Propiedades	Valor	Unidades	Mineral	Contenido (%)
Peso Específico	1,045	g/cm ³	Grupo plagioclasa (albita,	76
Peso Específico S.S.S.	1,062	g/cm ³	andesita, anortita)	
Absorción de Agua	10,2	%	Coesita	8
Densidad Suelta	3,54	g/cm ³	Caolinita	8
Densidad Compactada	3,962	g/cm ³	Halloysita	2
			Maghemita	6

En la Tabla 10 se expone las propiedades físicas y mineralógicas del árido fino procedente de San Agustín de Callo, considerado para la elaboración de hormigones. Se observa un contenido mineralógico similar al de CHN y CHB, en diferentes proporciones, por ser procedentes de la misma mina, además su peso específico se considera un 44% más liviano que el árido fino normal entre 2.30-2.50 g/cm³.

Tabla 11 Proporciones de la Mezcla

Dosificación para $f'c=210$ Kg/cm ²	PROPORCIONES EN VOLUMEN			
	Cemento	Fino	Grueso	A/C
	1	0,75	1,37	0,49
PESO EN Kg PARA 1m ³				
	Cemento	Fino	Grueso	Agua
	363,87	271,75	497	180

La Tabla 11 muestra las proporciones de la mezcla en volumen y en Kg para 1 m³ para hormigón de 210kg/cm².

Tabla 12 Pesos Húmedos con Corrección por Humedad

$f'c=210$ Kg/cm ²	PESOS HUMEDOS EN Kg		
	HL-A	HL-B	HL-C
CEMENTO	18	18	18
FINO	14,65	13,93	15,52
GRUESO	27,54	28,3	29,53
AGUA	10,79	10,74	7,93

Por otra parte, la Tabla 12 presenta la misma mezcla para áridos livianos, pero que difieren en la corrección por humedad, el mezclado y tiempos de concentración mostrados posteriormente. Además las nomenclaturas utilizadas se describen de la siguiente manera: Hormigón liviano; Mezcla A (HL-A), Mezcla B (HL-B) y Mezcla C (HL-C).

2.4.2 Consideraciones de Mezclado y Compactación.

La presente investigación adoptó como base para el amasado todas las recomendaciones recopiladas en la bibliografía con la finalidad de establecer un proceso de mezclado óptimo para hormigones elaborados con áridos ligeros. A continuación se presenta el procedimiento de mezclado y compactación considerado para el presente proyecto:

- Al estimar que el almacenamiento de los agregados ligeros no es el óptimo al estar expuesto a la intemperie, por ende a las variaciones de humedad debidas a fenómenos exteriores, como la lluvia, se realizó un ensayo de humedad natural, tanto a los áridos gruesos como finos, antes de la fabricación de las mezclas.
- El mezclado se realizó mediante concretera, misma que se humedeció antes de colocar los componentes del concreto.
- Para efectuar la mezcla se colocó primero el árido grueso liviano y seguidamente con la concretera en marcha se añadió 2/3 de agua de amasado, para la presaturación del agregado y se lo mezcló por 45 segundos.
- Posterior a esto, se añadió el cemento, el árido fino liviano y el agua restante y se lo dejó mezclar por 6 minutos, ya que se consideró que una larga duración del mezclado, influye beneficiosamente en la docilidad del hormigón fresco con este tipo de agregado.
- Debido a la baja densidad que presenta el agregado la compactación del hormigón varía, ya que el comportamiento del árido en el hormigón difiere del árido de densidad normal. Puesto que los áridos livianos tienden a amortiguar fuertemente las vibraciones, mientras

que los áridos de peso normal se compactan al poco tiempo. Pasa lo mismo el momento de expulsar el aire contenido después de la compactación, ya que la movilidad de los áridos de peso normal en el hormigón resulta más favorable que para agregados de baja densidad, por lo cual, el número de inmersiones de la varilla y el número de golpes con el mazo se estima al doble. A continuación se presenta la Tabla 13, que resume los parámetros adoptados para cada mezcla.

Tabla 13 Consideraciones de Mezclado y Compactación

CONSIDERACIONES DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN				
Mezcla	Presaturación de los árido Tiempo (seg)	Tiempo total de amasado (min)	Número de Penetraciones de Varilla	Número de Golpes de maso
HL-A	30	6	35	28
HL-B	45	7	30	25
HL-C	60	8	35	30

2.4.3 Resumen y Discusión de Resultados de Resistencia Mecánica.

Además de las mezclas para hormigón liviano presentadas, con el propósito de establecer diferencias entre el hormigón liviano y el hormigón convencional, se elaboró una mezcla que conserve la dosificación anterior, pero con el reemplazo de agregados livianos por agregados de densidad normal, manteniendo la relación de volumen que ocupa el árido fino y grueso. Los resultados de los diferentes ensayos se muestran a continuación en la Tabla 14:

Tabla 14 Resumen de los Resultados de Asentamiento, Resistencia a la Compresión, Módulo de Elasticidad y Densidad del Concreto

RESUMEN DE FASE 4 DEL PROYECTO				
MEZCLA	HL-A	HL-B	HL-C	H.Normal
Asentamiento (cm)	10	9	10	15
Resistencia a la Compresión 28 día (Kg/cm²)	279,33	214,48	280,59	119,89
Densidad Kg/m³	1839,7	1837,7	1838,8	2215,8
Módulo de Elasticidad Kg/cm²	178353,828			123313,685
El valor de la Resistencia a la Compresión Uniaxial alcanzada por el árido CHN en MPa fue de 98.50 y se estableció en la clasificación como una roca Dura.				

2.4.3.1 Resistencia a la Compresión y Densidad aparente

La Figura 4 muestra la evolución de las resistencias a la compresión de las mezclas en estudio, donde se observa que la mezcla HL-A y HL-C alcanzan una resistencia a los 28 días similar en promedio de 279.96 kg/cm². Para el caso del hormigón convencional su resistencia los 28 días fue pobre y no alcanzó el 60% de la resistencia de diseño. Cabe recalcar que en la mezcla HL-B, con la finalidad de disminuir la densidad, se consideró la reducción de una parte del

agregado grueso, por lo cual de la granulometría se utilizó el pasante del 1 1/2' y el retenido en el No. 4 (4.75mm).

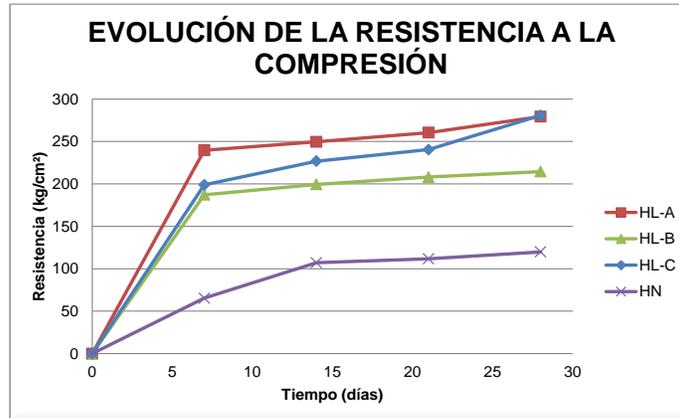


Figura 4 Evolución de Resistencia a Compresión

Puesto que los hormigones livianos generalmente contienen aproximadamente un 70 % en volumen de áridos, su densidad depende en primer lugar de la de los granos de los áridos de la mezcla. Las mezclas para hormigones livianos presentaron densidades entre 1837 kg/m³ a 1839 kg/m³, dentro del rango estipulado por el ACI, y resultaron ser 16.97% más livianos que la misma mezcla elaborada con áridos de peso normal, misma que alcanza una densidad de 2215 kg/m³, cabe recalcar que éste es una densidad baja, considerando que son agregados normales. Esto se debe a que la dosificación no es específica para las propiedades que presentan los agregados de densidad normal. La Figura 5, muestra las densidades alcanzadas por las mezclas elaboradas en laboratorio.

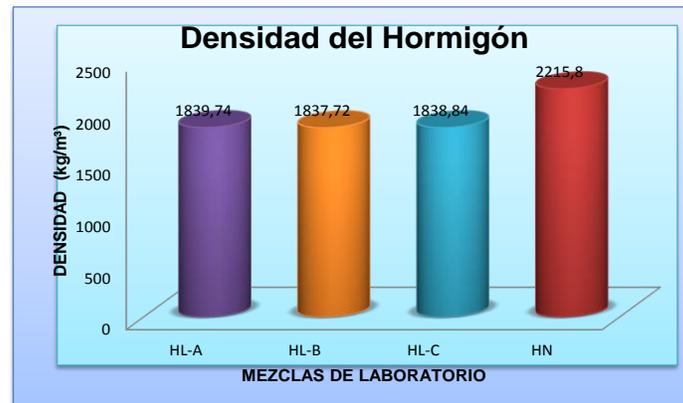


Figura 5 Densidad del hormigón

2.4.3.2 Zona de Interface y Módulo de Elasticidad.

La dosificación empleada para la elaboración del hormigón convencional (HN) contemplo una relación a/c de 0.49, que es relativamente elevada para las propiedades que presenta el agregado de densidad normal, razón que provoca la debilidad de la zona de interface ZIF (zona de contacto mortero-agregado), debido a la película de agua adsorbida que rodea a los agregados. Sucede lo contrario con los hormigones livianos, ya que al poseer los áridos de baja densidad niveles de absorción elevados, estos disminuyen la relación a/c en la ZIF, para luego transformarse en una reserva de agua que prolonga la hidratación de las partículas de cemento. Aumenta de esta manera la resistencia mecánica de la ZIF, que no aporta en el caso de los agregados gruesos pero si en la fase soportante de pasta de cemento con los áridos finos.

Por otro lado el módulo de elasticidad presentado por el hormigón convencional (HN), de 123313 kg/cm², resulto un 30.86 % más bajo que el modulo del hormigón liviano. Esto a pesar de que se estima que el módulo de elasticidad del agregado normal es más elevado en comparación con el agregado ligero. Se considera que el problema radica en la trasferencia de tensiones bajo carga del agregado hacia la fase de la pasta de cemento endurecida, que para el caso de HN es muy débil por su alta relación a/c, lo que genera mayores deformaciones en el hormigón y por tanto menor módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad que registró el hormigón ligero fue de 178353 Kg/cm², que resultó ser un 37.52% más bajo que el límite máximo aproximado expuesto para hormigones elaborados con agregados ligeros por (Mehta, 1986).

2.5 Influencia de Hormigones Livianos en la Reducción de Fuerzas Sísmicas.

El hormigón liviano elaborado en la presente investigación posee una densidad entre 1835 y 1840 Kg/m³, lo cual resulta aproximadamente un 25% más ligero que los hormigones convencionales con densidades entre 2200 y 2400 kg/m³.

Desde el punto de vista de resistencia sísmica, las propiedades dinámicas de los materiales estructurales como la masa, la rigidez, la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento tienen un efecto significativo en las fuerzas sísmicas de la estructura. En base a lo expuesto anteriormente se desarrollará un ejercicio comparativo donde se presenta el análisis sísmico de una estructura de dos pisos por el método de superposición modal mencionado en (Aguiar, 2012).

Ejemplo:

Realizar un análisis modal plano de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11), para el pórtico en sentido X, que tiene dos vanos, de la estructura de dos pisos, cuya distribución en planta es la indicada en la Figura 6. La altura de cada entrepiso es de 3.0m; todas las columnas son de 20/30 cm.; las vigas de 25/25 cm (Ver Figura 7). Las cargas verticales que gravitan son de 500 Kg/cm² para carga muerta y 200 Kg/cm² para la carga viva (construcción destinada a vivienda), considere un 25% de reducción de la carga muerta para la estructura elaborada con hormigones livianos.

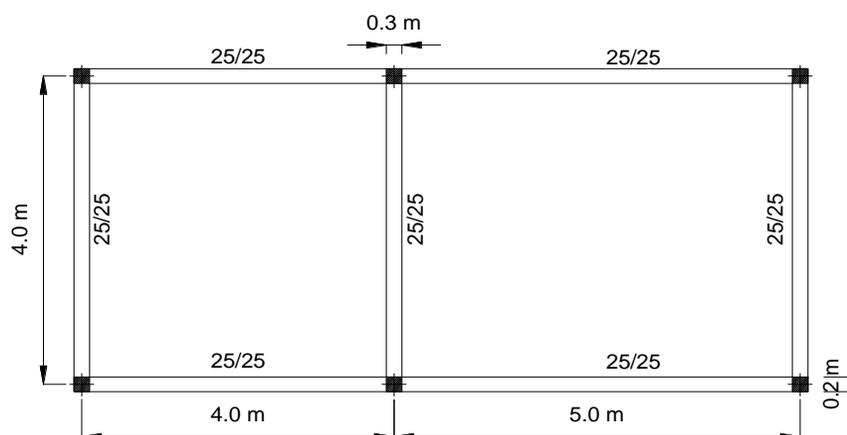


Figura 6 Distribución en planta de estructura de dos pisos. (Aguiar, 2012).

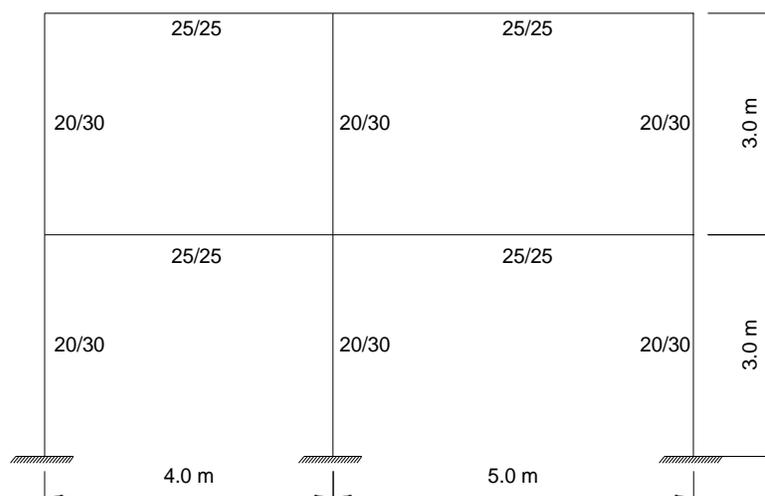


Figura 7 Esquema del pórtico en sentido X. (Aguiar, 2012).

La estructura se halla ubicada en la ciudad de Portoviejo sobre un perfil de suelo C, de acuerdo al NEC-11. El factor de reducción de las fuerzas sísmicas es $R=4$. Para encontrar las matrices de rigidez lateral se trabajó con un módulo de elasticidad igual a $E=2100000 \text{ T/m}^2$, $E=1783538 \text{ T/m}^2$, para hormigón convencional y liviano, respectivamente, y se consideró inercias agrietadas ($I_v=0.5 \cdot I_g$; $I_c=0.8 \cdot I_g$). Se realizó el control de cortante basal mínimo, deriva de piso y efecto P- Δ . A continuación se muestra la matriz de rigidez lateral para cada estructura y la matriz de masas:

$$K_{con} = \begin{pmatrix} 1472,8 & -583,8 \\ -583,8 & 378 \end{pmatrix} \quad K_{liv} = \begin{pmatrix} 1250,9 & -495,9 \\ 495,9 & 321 \end{pmatrix}$$

$$M_{con} = \begin{pmatrix} 1,0102 & 0 \\ 0 & 1,0102 \end{pmatrix} \quad M_{liv} = \begin{pmatrix} 0,78 & 0 \\ 0 & 0,78 \end{pmatrix}$$

Mediante el uso de los programas de CEINCI-LAB (programas elaborados en MATLAB en la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE") se calculó las propiedades dinámicas de la estructura. A continuación se muestra la Tabla 15, que es un resumen de los resultados de ambas edificaciones.

Tabla 15 Tabla Resumen- Propiedades Dinámicas

ESTRUCTURA CON HORMIGÓN CONVENCIONAL, E= 2100000 T/m ²								
PISO	Modos de Vibración		Fuerza Horizontal (T)	Cortante (T)	Peso desde el Piso al Tope (T)	Derivas de Piso inelástica	Derivas de Piso elástica	θ_i
1	-0,3955	-0,913	1,8472	4,8553	19,8	0,0114	0,0038	0,0154965
2	-0,913	0,3955	3,0081	3,0081	9,9	0,0142	0,0047	0,0154682

ESTRUCTURA CON HORMIGÓN LIVIANO, E= 1783538.28 T/m ²								
PISO	Modos de Vibración		Fuerza Horizontal (T)	Cortante (T)	Peso desde el Piso al Tope (T)	Derivas de Piso inelástica	Derivas de Piso elástica	θ_i
1	-0,4501	-1,039	1,4263	3,7489	15,3	0,0103	0,0034	0,0138761
2	-1,039	0,4501	2,3226	2,3226	7,65	0,0129	0,0043	0,0141630

2.5.1 Discusión de Resultados

Para el pórtico analizado con hormigón liviano se observa una reducción en la matriz de rigidez y de masas de la estructura, además se observa que el pórtico analizado con hormigón liviano reduce un 22.78% las fuerzas horizontales aplicadas a cada piso en comparación con el hormigón convencional, y que las deformaciones relativas de piso, en el mismo caso, se redujeron en 9.65%.

3. CONCLUSIONES

- Para obtener un concreto óptimo se buscó una estructura de agregados con la forma y secuencia de tamaños adecuados, para lograr la más alta compacidad, motivo principal de la elección del árido CHN para la elaboración de hormigones. Además, la textura del árido resultó ser conveniente para favorecer la adherencia. El desgaste del agregado no superó el 50% establecido por la NTE INEN (860, 2011) y se clasificó como un árido medio a duro.

- Las experiencias en la aplicación de hormigones con empleo de áridos ligeros, han confirmado las posibilidades de cumplir con las exigencias especificadas en normas internacionales y se han logrado rangos de densidades entre 1835 y 1840 Kg/m³, resistencias a la compresión que superan los 240kg/cm², así como módulos de elasticidad superiores a 1700000 T/m².
- Las principales consideraciones que se tiene el momento de diseñar una estructura son que las derivas de piso se encuentren lo más alejadas posible del 2% recomendado por la norma, para esto los diseñadores consideran un aumento en la dimensión de los elementos estructurales. La utilización del hormigón liviano puede plantearse como una alternativa viable para la reducción de las deformaciones relativas de piso en un 9.65%.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] 211.2.98, A. (2000). *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural*. EE.UU.: ACI Parte 1.
- [2] 213R, (1987). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute.
- [3] 860, N. I. (2011). *DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37.5mm MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES*. Quito- Ecuador: Norma Técnica Ecuatoriana.
- [4] 867, N. I. (2009). *ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. DETERMINACIÓN DE LA REACTIVIDAD ALCALINA POTENCIAL DE COMBINACIONES ÁRIDO- CEMENTO (MÉTODO DE LA BARRA DE MORTERO)*. Quito-Ecuador: Norma Técnica Ecuatoriana.
- [5] 868, N. I. (2011). *ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIAL REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE DE LOS ÁRIDOS. MÉTODO QUÍMICO*. Quito- Ecuador: Norma Técnica Ecuatoriana.
- [6] 870, N. I. (2012). *ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. EXAMEN PETROGRÁFICO*. Quito-Ecuador: Norma Técnica Ecuatoriana.
- [7] Aguiar, F. (2012). *DINÁMICA DE ESTRUCTURAS CON CEINCI-LAB*. Quito-Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas-Escuela Politécnica del Ejército.
- [8] ALAEJOS, P. (2003). *DEGRADACIÓN DE UN HORMIGÓN POR UNA REACCIÓN ÁRIDO-CEMENTO*. Madrid-España: CEDEX. Ministerio de Fomento.
- [9] BCA. (1992). *The diagnosis of alkali-silica reaction. Report of a working party*. UK.: British Cement Association.
- [10] Escobar, G. (2003). *MANUAL DE GEOLOGÍA PARA INGENIEROS- ROCAS ÍGNEAS*. Manizales- Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [11] JOYCE. (1996). *Petrographic aspects of alkali-silica reaction in Eastern Australian Concretes*. Australia: 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete.
- [12] Mauricio López, L. F. (2006). *Hormigón liviano de alto desempeño -una comparación entre perdida de pretensado reales y estimadas por los códigos de diseño*. EE.UU.: Pontificia Universidad Católica de Chile., Georgia Institute of Technology.
- [13] Mehta, P. (1986). *Effect of fly ash composition on surface resistance of cement*. EE.UU.: ACI Journal, Technical paper No. 83-89.

[14]NEVI_12. (2011). *PELIGRO SÍSMICO Y REQUISITOS DE DISEÑO SISMO RESISTENTE- CAPÍTULO 2*. Quito-Ecuador: COMITÉ EJECUTIVO DE LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN.

[15]Silvia Palazzi, D. (2008). *PAUTAS PARA LA UTILIZACIÓN DE AGREGADOS REACTIVOS A LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN*. Tucumán- Argentina: Universidad Nacional de Tucumán.