

# Construcción Sustentable: rol y posibilidades de desarrollo del hormigón como material sustentable

## Sustainable Construction: role and possibilities to development of concrete like a sustainable material

Patricia Martínez\*

\* Escuela de Ingeniería de la Construcción, Facultad de Arquitectura, Universidad de Valparaíso, CHILE  
patricia.martinez@uv.cl

Fecha de recepción: 27/ 09/ 2005  
Fecha de aceptación: 10/ 11/ 2005  
PAG. 187 - 198

### Resumen

Chile es un país en vías de desarrollo que ha logrado un exitoso desempeño económico en la última década. Este desarrollo, tal como ha sucedido en otros países, ha venido acompañado de fuertes impactos al medioambiente. En ambos sentidos la industria de la construcción juega un importante rol. En este contexto, el artículo presenta los resultados de una investigación en la que se usó ceniza volante para la producción de áridos livianos para hormigones estructurales. Los resultados de este estudio permitieron, comprobar la viabilidad técnica de fabricar el producto en cuestión. El Grado de Sustentabilidad del material desarrollado fue evaluado con una metodología que permite generar un sello de certificación de desempeño ambiental de los materiales de construcción, aspecto que también se detalla en el artículo. A modo de conclusión, el presente trabajo presenta dos líneas para avanzar hacia la sustentabilidad, estableciendo lineamientos para apuntar hacia una construcción sustentable por medio de la aplicación de tecnologías limpias. En este sentido se logró desarrollar un árido artificial con buenas propiedades físicas y mecánicas para su uso en hormigones livianos estructurales, y por otro, se desarrolló una herramienta para la certificación del desempeño ambiental, evaluando los impactos asociados durante el ciclo de vida de los materiales.

Palabras Clave: Construcción sustentable, uso de subproductos, agregados livianos, cenizas volantes, valoración de la sustentabilidad

### Abstract

Chile is undergoing a transition process towards economic development through the last decade. Just as it has happened previously in other countries, this development can have a serious impact on the environment. In both senses the Construction Industry plays a very important role. In this context, the paper presents the results of a research where was used fly ash for lightweight aggregates production to structural concretes. The result of these research allowed to probe the technical viability to fabricate these products. The degree of Sustainability of the material development was evaluated with a methodology what allowed to generate a stamp of certification or "green seal" to certify construction materials, aspect also detail it in this paper. Like a conclusion, this paper presents two ways to advance toward the sustainability, establishing lineaments to point at a sustainable construction by means of the application of clean technologies. In this sense it obtain develop an artificial aggregates with adequate physical and mechanics properties to use in structural lightweight concretes, on the other hand, was development a tool to the certify the environmental performance, evaluating the associates impacts during the life cycle of the construction materials.

Keywords: Sustainable construction, by-products, lightweight aggregates, fly ash, sustainability assessment

## 1. Introducción

Con el paso del tiempo el hombre ha ido transformando su entorno en un medioambiente cada vez menos natural, con el propósito tanto de satisfacer sus necesidades básicas como para elevar su estándar de vida. Este proceso ha generado una paulatina y sensible transformación del entorno natural, provocando en muchos casos el deterioro de ellos.

La industria de la construcción ha sido una de las causantes de dicho deterioro. Un ejemplo de lo anterior

es que las tres industrias con mayores consumos energéticos a nivel mundial corresponden a este sector de la producción, éstas son: la industria del acero, del aluminio y el cemento, este último material responsable, además, del 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Cahn, 1997). A su vez, las actividades asociadas a la fabricación de hormigón, material más usado en el mundo por la industria de la construcción, genera en su proceso de elaboración fuertes impactos medioambientales, entre

estos: erosión y pérdida de suelos naturales por la extracción de áridos naturales, y como se dijo anteriormente, elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> y consumo energético asociados a la fabricación de cemento, sin considerar los elevados volúmenes de material de demolición generados por construcciones que han concluido su vida útil (Mehta, 1998). La industria de la construcción es, por tanto, una gran consumidora de recursos naturales y una importante fuente de residuos y contaminación para el aire, el suelo y el agua.

Por otro lado, la Ley de Bases del Medio Ambiente (1992) señala que el desarrollo sustentable es un proceso de mejoramiento sostenido y equitativo de la calidad de vida, fundado en medidas apropiadas de conservación y protección del medioambiente, de manera de no comprometer las expectativas de las generaciones futuras. En la Cumbre de la Tierra, realizada en Río de Janeiro en el año 1992, se definió el desarrollo sustentable como una actividad económica que está en armonía con el ecosistema de la tierra (CIB, 2000).

Estas definiciones son generales y pretenden abarcar todos los ámbitos de la economía. Sin embargo, se han llevado a cabo iniciativas con el objeto de definir el desarrollo sustentable bajo la óptica del sector de la construcción. Dentro de ellas se tiene la Agenda 21 (CIB, 2000), que engloba el concepto y objetivos que se han planteado en el mundo desde la óptica de la industria de la construcción. Se establece, por ejemplo, que “los gobiernos deben estimular a la industria de la construcción a promover métodos y tecnologías de construcción disponibles localmente, apropiados, asequibles, seguros, eficientes y ambientalmente inocuos en todos los países, en especial en los en vía de desarrollo, fomentando métodos de ahorro de energía y estableciendo acciones en lo referente a la planificación, el diseño, la construcción, la mantención y rehabilitación; la obtención, uso y promoción de los materiales de construcción sustentables y la producción de estos”. En este contexto, se habla de Construcción Sustentable involucrando los siguientes elementos claves: reducción del uso de fuentes energéticas y del agotamiento de los recursos minerales; conservación de las áreas naturales y de la biodiversidad; mantención de la calidad del ambiente construido y manejo de un ambiente interior saludable.

Resulta difícil dar una definición de construcción sustentable que resulte lo suficientemente completa como para abarcar todos los aspectos que ésta debiese considerar. La autora plantea que una aproximación a ello podría ser la esquematizada en Figura 1 (Martínez, 2003a). En ella se indican tres pilares fundamentales sobre los cuales se apoya el Desarrollo Sustentable de la Industria de la

Construcción. En primer lugar se tiene el reciclaje y conservación de los materiales; en segundo término, el mejoramiento de la durabilidad de las estructuras; y en tercer y último lugar, el uso y aprovechamiento de los sub-productos de otras industrias, que en otra situación serían simplemente residuos o desechos. Estos tres pilares están soportados por un enfoque holístico que permite determinar el carácter de interdependencia que tiene cada uno de los pilares enunciados. En otras palabras, es posible que se tomen decisiones, por ejemplo, con relación a la durabilidad de las estructuras; si se analiza esta decisión desde el enfoque clásico de tipo reduccionista sólo se verán los beneficios del mejoramiento de la construcción desde el punto de vista de aumento de la vida útil de la obra. Sin embargo, dentro de la óptica del enfoque holístico, se podría decir que las mejoras en la durabilidad, permiten, además, conservar los materiales, en este caso materia prima para nuevas construcciones, y generan ahorros de energía, la que se encuentra asociada a los procesos de construcción, sólo por nombrar algunos de los efectos positivos adicionales asociados al aumento de la durabilidad de las edificaciones. Lo anterior es un ejemplo de cómo se debe pensar el ciclo de vida de una estructura, integrando el conocimiento de todos los procesos involucrados.

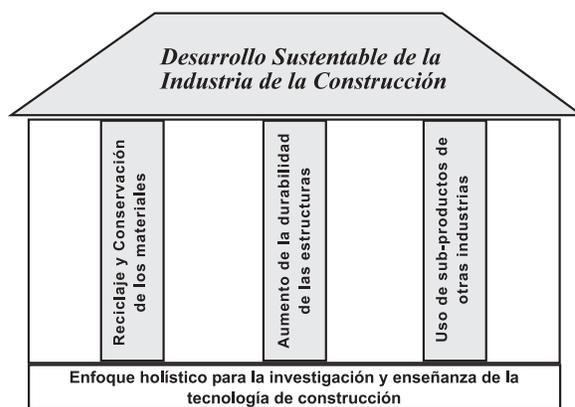


Figura 1. Enfoque para el establecimiento de un desarrollo sustentable de la industria de la construcción

Vale destacar que la Figura 1 hace hincapié en la necesidad de entregar dicho enfoque holístico en el sector académico, traducido éste en las áreas de investigación y enseñanza de las tecnologías de la construcción. No se debe olvidar que los jóvenes que en la actualidad se están formando, constituyen el semillero que en el futuro dará frutos, y sobre los cuales caerá la responsabilidad del manejo sustentable de las actividades económicas involucradas en el quehacer de la humanidad.

## 2. Posibilidades de desarrollo del hormigón como material sustentable

Los cursos a seguir con el objeto de lograr un desarrollo sustentable, y en este caso se hace específico el concepto para el sector de la construcción, deben estar basados en los aspectos destacados en Figura 1.

Como se mencionó en párrafos precedentes, la industria del hormigón tiene gran importancia dentro del sector de la construcción, dado el volumen de uso a nivel mundial, razón por la cual es fundamental encauzarla dentro del marco de la óptica de la construcción sustentable. Se adoptará, en consecuencia, este material como base para bosquejar iniciativas emprendidas en pos de este objetivo.

Se tiene que el hormigón aparece como una solución óptima para utilizar residuos de otras industrias, debido a su capacidad de solidificar e inmovilizar los mencionados residuos (Macías et al., 1999), y por los altos volúmenes de producción que involucra, lo que deriva en una gran capacidad de absorción de estos residuos y/o sub-productos industriales.

Existen industrias que tienen serios problemas para reutilizar sus residuos, por ejemplo, los hornos metalúrgicos producen grandes cantidades de escoria, y las plantas termoeléctricas que utilizan carbón producen enormes volúmenes de cenizas de carbón. El uso de estos subproductos en las industrias del cemento y el hormigón puede ayudar a alcanzar en gran medida el objetivo de la construcción sustentable. Dichos sub-productos, al ser empleados como materia prima para la fabricación de cemento, permiten disminuir en una proporción importante el consumo energético involucrado en el proceso. Por otro lado, el uso de los subproductos en cuestión (conocidos como puzolanas artificiales), al ser incorporados al hormigón como adiciones minerales, genera importantes beneficios para el producto final, siendo uno de los más destacables, el aumento de la durabilidad de las estructuras.

Otro estímulo para la incorporación de las adiciones minerales, o puzolanas artificiales, es el beneficio ecológico que ello produce. Este se traduce en el consumo de un residuo industrial, destinado a ser dispuesto en un vertedero, evitando, o al menos mitigando en gran medida la contaminación ambiental que provoca la disposición de estos residuos en piscinas o estanques in situ. Adicionalmente, las industrias generadoras del residuo se ven beneficiadas al ahorrar importantes sumas de dinero destinadas a las actividades de desembarazarse de estos "desechos".

Se ha planteado que las razones por las cuales la incorporación de subproductos en la industria del

hormigón ha sido baja, radican en: políticas corporativas, falta de incentivos económicos, especificaciones inadecuadas y la calidad variable de estos materiales (Malhotra, 1999). Todos los aspectos mencionados permiten entrever un enfoque reduccionista en la toma de decisiones.

A modo de alcance y ejemplo, vale destacar que estudios internacionales han afirmado que si se logrará incentivar el uso a gran escala de los sub-productos antes mencionados, se podría disminuir en una proporción importante el problema del desarrollo sustentable de la industria del cemento y el hormigón (Frigione y Frigione, 1996). Por ejemplo, se podría satisfacer la creciente demanda de cemento, en un horizonte de aproximadamente 10 años, sin aumentar la producción del crudo de cemento (Mehta, 1998).

Por otro lado, es importante hacer notar que, además de los incentivos externos al sector de la construcción, que ya se han mencionado en líneas anteriores, debe existir una interdependencia entre los proyectistas, diseñadores y constructores, con el objeto de que todos trabajen con un objetivo común el que es funcionar bajo los criterios de una construcción sustentable y, más ampliamente, del desarrollo sustentable. En este sentido, y con el propósito de evaluar el grado de sustentabilidad de los proyectos de construcción, se hace necesario que estos sean certificados bajo modelos de evaluación que incorporen cada uno de los criterios asociados a la construcción sustentable.

El presente artículo aborda dos de las iniciativas antes mencionadas, en primer término, el desarrollo de áridos livianos de cenizas volantes, y en segundo lugar, el desarrollo de un modelo de evaluación del desempeño ambiental de los materiales que permite determinar su grado de sustentabilidad.

## 3. Desarrollo de áridos livianos de cenizas volantes producidos en frío

Con el objetivo de evaluar y optimizar mezclas para la fabricación de Áridos Livianos de Cenizas Volantes (ALCV) para su uso en la elaboración de hormigones livianos estructurales, se desarrolló una investigación tendiente a la búsqueda de tecnologías limpias basándose en el uso de sistemas de aglomeración en frío (Martínez, 2003b). Las principales variables del estudio fueron los tipos y contenidos de conglomerantes y las condiciones de enlace en frío, evaluando su efecto sobre las



propiedades físicas y mecánicas de los ALCV.

La caracterización física de los agregados comprendió la determinación del peso específico y absorción. Las propiedades mecánicas fueron evaluadas a través del Valor de Trituración a una carga determinada.

### 3.1 Materiales

Las cenizas volantes (CV) usadas en la investigación provienen del proceso de calcinación de carbón bituminoso o antracítico, la composición química de éstas se muestra en la Tabla 1. De acuerdo a los resultados mostrados en esta Tabla, las cenizas volantes corresponden a la Clase F según requisitos ASTM (ASTM C618-93).

Tabla 1. Composición química de las cenizas volantes

Análisis químico	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
Cenizas Volantes (%)	56,21	24,40	5,76	1,70	0,90	0,07	0,89	0,01	5,85

El diseño de las mezclas para la fabricación de áridos consideró dosis de 3, 5 y 7% en peso de los siguientes conglomerantes: Cal (L), cemento Portland (P) y cemento Portland Puzolánico (PP) con 19% de puzolana natural. La Tabla 2 presenta las propiedades físicas de las cenizas y de los aglomerantes.

Tabla 2. Propiedades físicas de las cenizas volantes y los aglomerantes

Material	Peso específico	Superficie específica (cm <sup>2</sup> /g)	Finura (retenido sobre tamiz N°325, %)
Ceniza Volante	2,155	4.380	23,00
Cemento Portland	3,176	2.860	
Cemento Portland Puzolánico	2,969	4.500	
Cal	2,440		12,00

### 3.2 Sistema de curado y endurecimiento

Para el endurecimiento de los ALCV se usó una técnica de enlace en frío que evita el alto consumo de energía (Videla y Martínez, 2001; Baykal y Doven, 1999; Hwang et al., 1992). Se consideraron tres diferentes métodos de curado a fin de evaluar el efecto del sistema de endurecimiento, o enlace en frío, sobre el desarrollo de resistencia mecánica de los áridos:

- Exposición a la intemperie (temperatura ambiente) y roceado a intervalos regulares con agua, (OD).

- Cámara húmeda a temperatura de  $23 \pm 2$  °C y humedad relativa  $\geq 90\%$ , (MR).
- Bolsas selladas mantenidas a una temperatura de  $23 \pm 4$  °C, (SB).

### 3.3 Optimización de mezclas

Se realizaron dos ensayos para analizar la viabilidad de producir áridos de cenizas volantes, estos son: Tiempo de Fraguado (ST) e Índice Modificado de Actividad Puzolánica (MPAI) (Videla y Martínez, 2002). El objetivo del ensayo de tiempo de fraguado fue determinar, según la dosis y tipo de aglomerante, la mezcla con el menor tiempo de fraguado. Este ensayo fue realizado de acuerdo a la norma ASTM C191-99. Por otro lado, el Índice de Actividad Puzolánica (PAI), especificado en ASTM C311-92, permite determinar la capacidad de las cenizas volantes de fijar hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), reaccionando y produciendo el endurecimiento y desarrollo de resistencia mecánica cuando son mezcladas con cal. Debido a que nuevos aglomerantes son considerados para la fabricación de áridos, se propuso un ensayo denominado Índice Modificado de Actividad Puzolánica (MPAI) con el objeto de representar el comportamiento de las mezclas a usar. El procedimiento normalizado fue modificado en los siguientes aspectos: materiales constituyentes y proporciones de estos, y forma y dimensión de las probetas. No se usó arena en las mezclas por no considerarse este material en la futura fabricación de áridos, los ensayos a compresión se realizaron sobre probetas cilíndricas de 50 x 100 mm. Tanto el almacenamiento de las probetas como el procedimiento de ensayo obedecieron a las especificaciones entregadas en la norma. Las mezclas de ceniza-conglomerante consideraron las siguientes proporciones de estos últimos: 3, 5 y 7% en peso de conglomerante. El requerimiento de agua de cada mezcla se determinó según procedimiento ASTM C187-98.

La Figura 2 muestra el efecto del tipo y dosis de conglomerante sobre la actividad puzolánica de las cenizas volantes. Se observa que, independiente del tipo de conglomerante, a mayor proporción de éste mayor es la resistencia a compresión de las mezclas de cenizas. Además, al considerar la cal como agente enlazante, se tiene que a mayor contenido de cal menor es el tiempo de fraguado. En cambio, al considerar el efecto de los cementos, los resultados indicarían que existe una dosis óptima para la cual se minimiza el tiempo de fraguado.

Con el fin de seleccionar la mejor mezcla para la fabricación de agregados se adoptó como variable de

decisión el tiempo de fraguado, por presentar mayor sensibilidad que los resultados determinados por el ensayo MPAI. Se observa que para el rango comprendido entre 3% y 7% en peso de conglomerante, existe una diferencia del valor MPAI de aproximadamente 3 MPa para cualquier tipo de conglomerante. Por otro lado, las diferencias arrojadas por el ensayo de tiempo de fraguado fluctúan entre un mínimo de 1 hora y un máximo de 6 horas para un determinado conglomerante. La mayor diferencia en los tiempos de fraguado medidos correspondió a las mezclas con cal, en cambio, las menores se presentaron al usar cemento portland puzolánico como agente conglomerante. Cabe destacar la gran diferencia entre los tiempos de fraguado medidos para la cal y los cementos; las mezclas con cal presentan tiempos de fraguado de aproximadamente 20 hrs superior a los medidos para los cementos.

Por lo tanto, de la Figura 2 se puede concluir que las dosis óptimas de conglomerante, de acuerdo al tipo considerado y tomando como referencia el menor tiempo de fraguado, son:

- CV + Cal → 7% en peso de cal (L7)
- CV + cemento Portland → 5% en peso de cemento Portland (P5)
- CV + cemento Portland Puzolánico → 5% en peso de cemento Portland Puzolánico (PP5)

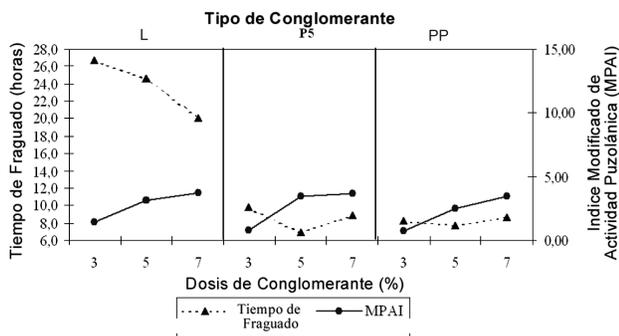


Figura 2. Tiempo de Fraguado (ST) e Índice Modificado de Actividad Puzolánica (MPAI) para las mezclas de cenizas volantes

Vale señalar que la mezcla correspondiente a L7 presenta de manera simultánea las condiciones deseadas, es decir, a menor tiempo de fraguado mayor resistencia a compresión. Sin embargo, las mezclas fabricadas con cal presentan tiempos de fraguado excesivamente largos. Por otro lado, las mezclas indicadas como P5 y PP5 no muestran un contenido óptimo de conglomerante que cumpla simultáneamente ambas condiciones. Finalmente, los resultados sugieren que el mejor conglomerante a usar en

las mezclas con cenizas volantes, desde un punto de vista técnico y económico, es el cemento Portland Puzolánico. Ello porque sumado al hecho de que presenta propiedades similares a las mezclas con cemento Portland, posee otras ventajas adicionales como son: costo inferior a los otros conglomerantes e impactos medioambientales menores en su proceso de fabricación.

### 3.4 Áridos livianos de cenizas volantes (ALCV)

Para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los áridos, se realizaron los siguientes ensayos sobre los áridos de cenizas volantes fabricados:

- Valor de Trituración del Arido (ACV) según BS 812-75
- Peso específico, absorción y tamaño de partícula según ASTM V.402-98

En la Tabla 3 se indican las características físicas de los ALCV. Se observa que el peso específico se encuentra en el rango comprendido entre 1,222 y 1,274, existiendo una diferencia despreciable de un 4% entre el valor máximo y mínimo. Los valores obtenidos corresponden aproximadamente al 50% del peso específico de los áridos normales.

En cuanto al valor de absorción medido, se tiene que este oscila entre 29,6% y 32,5%, presentando una diferencia del orden del 10% entre ellos. Estos valores son muy similares al de otros agregados livianos (piedra pómez y arcilla expandida), pero muy superiores al de los agregados normales.

En Tabla 3 se indican, además, los resultados del ensayo de Valor de Trituración para una carga de 25 KN (ACV<sub>25</sub>) desarrollado a 7 y 28 días. El árido con mayor resistencia a la trituración tanto a 7 días como a 28 días de edad es el tipo PP5. De la tabla se desprende que a temprana edad (7 días), el valor de trituración para L7 y P5 es el mismo, siendo PP5 el agregado más resistente con un valor 24% superior a las otras dos muestras. A los 28 días de endurecimiento estas diferencias aumentan, determinándose una superioridad del 50% en la capacidad para resistir trituración entre el agregado más fuerte (PP5) y el más débil (L7), valor bastante considerable desde el punto de vista mecánico.

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas promedio de los ALCV (TM=20 mm)

Tipo de Árido	Peso Específico	Absorción (%)	ACV <sub>25</sub> (%)		
			7 días	28 días	I <sub>R</sub> (%)
L7	1,222	32,5	36	30	16,6
P5	1,253	29,6	36	27	25,0
PP5	1,274	32,2	29	20	31,0

Tabla 4. Dosificaciones de mezclas de hormigón liviano con ALCV

Componentes	Tipo de Hormigón							
	H1-300-66-cv	H3-300-68-cv	H6-300-69-cv	H6-350-67-cv	H7-450-41	H7-530-45	H7-560-41	H8-600-35
Cemento, kg/m <sup>3</sup>	298	290	291	345	435	509	546	599
ALCV, kg/m <sup>3</sup>	1142	1129	1167	1140	798	792	720	580
Árido fino, kg/m <sup>3</sup>	0	0	0	0	386	383	348	604
Cenizas volantes, kg/m <sup>3</sup>	202	154	130	60	0	0	0	0
	Propiedades Hormigón Fresco							
Razón W/C	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51	0,40	0,45	0,35
Densidad, kg/m <sup>3</sup>	1.800	1.780	1.790	1.745	1.956	1.956	1.932	

Por otro lado, el Índice de Resistencia (I<sub>R</sub>), que indica la velocidad de aumento de resistencia para cada tipo de árido, muestra que el agregado que aumenta con mayor rapidez su resistencia a la trituración es, también, el denominado PP5, presentando un incremento del 31% entre los 7 y 28 días de edad.

### 3.5 Hormigones livianos con ALCV

Para determinar la viabilidad para la fabricación de hormigones livianos estructurales se elaboraron mezclas con los ALCV que presentaron el mejor desempeño en cuanto a propiedades mecánicas, vale decir, según resultados antes presentados, los obtenidos a partir de las mezclas con un contenido de 5% de cemento portland puzolánico.

La dosificación de los hormigones se presenta en la Tabla 4. Los hormigones que incluyen al final de su nomenclatura las letras "cv" consideraron la incorporación de cenizas volantes como fino con el objeto de completar la distribución de tamaños de los áridos, que para estos casos se compuso en un 100% por ALCV. Por su parte, los hormigones que excluyen estas letras de su nomenclatura consideran el uso de árido fino natural, es decir, arena.

El cemento usado para la fabricación de hormigones es del tipo portland puzolánico con un 20 % de puzolanas naturales. Las mezclas estudiadas tienen un contenido de cemento entre 298 y 599 kg/m<sup>3</sup>, y un volumen de ALCV en el rango de 35 a 69 % en función a la mezcla total de hormigón. La razón agua/cemento (W/C) fluctúa entre un valor máximo de 0,51 para mezclas con el 100% de los áridos compuesto por ALCV, y 0,35 para las mezclas cuya fracción fina corresponde a arena.

#### 3.5.1 Densidades

La Figura 3 presenta los resultados medidos para densidad seca al horno y seca al aire del hormigón. A su vez, en la figura se ha incorporado el requisito establecido por el ACI 213-87 que permite clasificar el material como liviano.

Se desprende que la totalidad de las muestras de hormigones que consideran un 100 % de ALCV (fracción fina + gruesa) poseen una densidad seca al aire inferior a 1.850 kg/m<sup>3</sup>, aspecto que les permite ser clasificados como hormigón liviano.

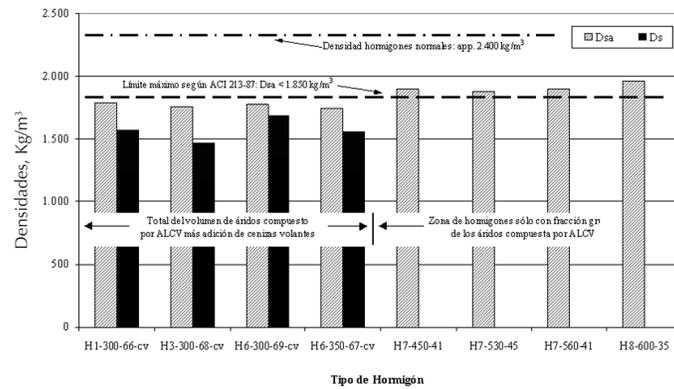


Figura 3. Densidades del hormigón endurecido

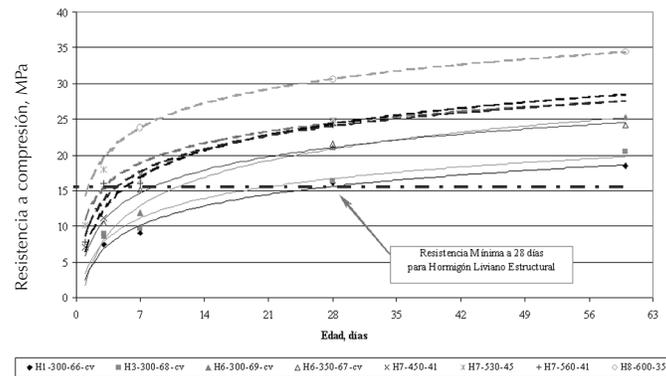


Figura 4. Evolución de la resistencia a compresión de los hormigones con ALCV

Por su parte, si bien los hormigones cuya fracción fina corresponde a arena natural, superan la densidad máxima estipulada por el ACI 213-87, la diferencia se encuentra entre el 1% y 6%, por lo que se puede afirmar que con algunas modificaciones en la dosificación de las mezclas fácilmente se podría llegar al valor de referencia. La modificación que resulta más evidente sería disminuir el contenido de cemento, siempre y cuando esto no afecte de manera drástica la resistencia mecánica de los hormigones.

La Figura 3 incorpora el valor de las densidades en estado seco al horno para los hormigones con 100 % de ALCV, determinándose que por efectos de contenido de humedad el hormigón puede aumentar su peso entre un 5% a 19%. Este aspecto resulta muy considerable puesto que el peso es una propiedad importante del material. Además, es importante señalar que a medida aumenta el contenido de humedad del hormigón, aumenta también su conductividad térmica, una de las propiedades más valiosas del hormigón liviano.

### 3.5.2 Resistencia a compresión

La Figura 4 muestra la evolución de la resistencia a compresión de los hormigones con ALCV. De ella se desprende que todas las mezclas estudiadas poseen una

resistencia a compresión superior a 15 MPa, valor establecido como mínimo por RILEM para hormigones livianos estructurales (RILEM, 1978).

La evolución de resistencia presenta un desarrollo normal, alcanzándose a los 28 días aproximadamente el 90% de la resistencia medida a 60 días. Se aprecia que las mayores resistencia a compresión corresponden, como es lógico, a los hormigones con mayor contenido de cemento, no detectándose una resistencia límite o “ceiling strength” que implique que la resistencia intrínseca del árido constituye una limitante para aumentar la capacidad resistente a medida se aumenta el contenido de cemento. Lo anterior es válido para el rango de contenidos de cemento estudiado. Tal vez al aumentar aun más este valor, si se detecte dicha resistencia límite, sin embargo, desde el punto de vista técnico y práctico no se recomienda usar hormigones con contenidos de cemento superiores a 600 kg/m<sup>3</sup>.

Vale señalar que la fractura observada en las probetas ensayadas coincide con lo indicado en la literatura para hormigones livianos (Martínez, 2003b), es decir, el plano de fractura cruza los áridos livianos, no produciéndose en la zona de transición, como sucede en los hormigones normales.

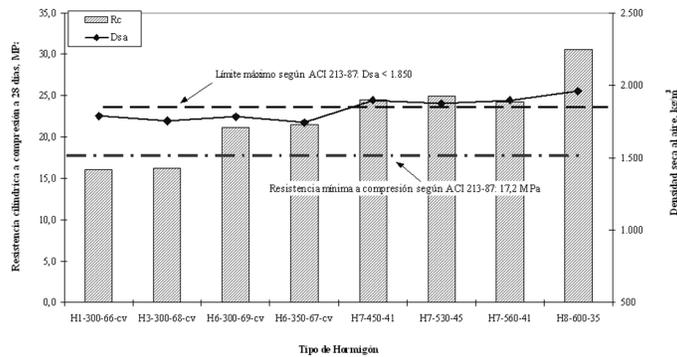


Figura 5. Comparación entre densidades y resistencia a compresión del hormigón livianos con ALCV y los requisitos estipulados por ACI 213-87

En la Figura 5 se muestra la resistencia a compresión a 28 días de los hormigones livianos, y su correspondiente densidad seca al aire, incorporando los requisitos establecidos por el ACI 213-87 para este tipo de material. De ella se desprende que todos los hormigones fabricados con un 100% de ALCV cumplen con el requisito de densidad máxima, sin embargo dos de estas muestras no alcanzan la resistencia mínima estipulada por ACI (1987), pero si lo hacen con respecto a RILEM (1978). En tanto, las muestras cuya fracción fina corresponde a árido normal, y que presentan densidades levemente superior a la requerida, como se señaló anteriormente, arrojaron resistencias muy superiores al mínimo requerido, por lo que nuevamente se concluye que dichas mezclas deben ser optimizadas en función a su contenido de cemento, valor que debe ser disminuido.

### 3.6 Conclusiones parciales

En resumen, a partir de los resultados obtenidos de los ensayos realizados al hormigón fabricado con ALCV en estado endurecido, se puede concluir que el material desarrollado permite cumplir con el objetivo planteado para la investigación, el cual fue desarrollar hormigones livianos estructurales por medio del empleo de agregados livianos de cenizas volantes fabricados por sistemas de endurecimiento en frío.

## 4. Diseño de un modelo para la determinación del grado de sustentabilidad de los materiales de construcción

Con el propósito de cuantificar las mejoras ambientales que se podrían generar sobre el impacto de la producción de hormigones con el material antes obtenido, es decir, árido liviano de cenizas volantes (ALCV), se evalúa la innovación tecnológica desarrollada por medio de un modelo que permite determinar su

Grado de Sustentabilidad (GS), comparando su resultado con el obtenido para un hormigón tradicional.

### 4.1 Modelo para la determinación del grado de sustentabilidad de los materiales

La generación de un Sello de Certificación de la Sustentabilidad de los materiales de construcción, que representa su grado de sustentabilidad, consiste en la proposición de una metodología de evaluación de la sustentabilidad del ciclo de vida de los materiales. Lo anterior se realiza mediante un proceso de valoración de las cargas ambientales asociadas a los materiales, identificando y cuantificando el uso de materia prima, energía y los vertidos al ambiente (residuos y emisiones), de esta manera se identifican las entradas y salidas del sistema para evaluar los impactos asociados.

Basándose en la normativa NCh-ISO 14040 Of. 1999 (INN, 1999), se propone una metodología de Evaluación la Sustentabilidad del Ciclo de Vida (ESCV) de los Materiales de Construcción, consistente en cinco fases (Figura 6), cuya finalidad es interpretar el inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas, las que se convierten en efectos (Tirado, 2005; Ibaceta, 2004). Para lo anterior se proponen tres pasos: primero, Clasificación ambiental; segundo, Modelo de daños; y tercero, Ponderación.

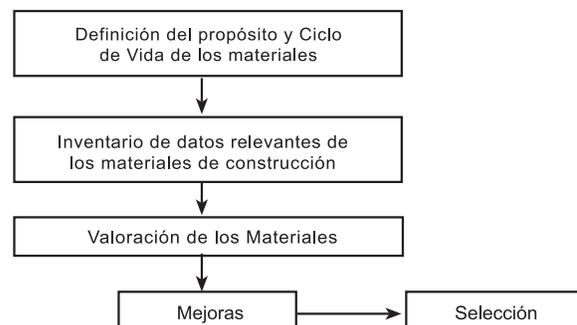


Figura 6. Esquema de la Metodología de Evaluación de la sustentabilidad de los materiales de construcción

En este caso el procedimiento de evaluación propuesto utiliza el método de puntuación en matrices de calificación.

La calificación de las matrices se determina valorando las cargas ambientales del material, mediante una escala de calificación que se establece por medio de cuatro modelos:

- Modelo de Energía ( $C_{EN}$ )
- Modelo de Emisiones ( $C_{EM}$ )
- Modelo de Recursos ( $C_{REC}$ )
- Modelo de Residuos ( $C_{RES}$ )

Dentro de estos modelos se evalúan tres tipos de aspectos: calificación de atributo (Ca), calificación de impacto (Ci) y calificación de consumo (Cc), donde existen cuatro escenarios probables a valorar: Leve (L), Moderado (M), Grave (G) y Muy Grave (MG).

#### 4.1.1 Modelo por carga de energía ( $C_{EN}$ )

Para la calificación de la carga por energía se evalúan tres aspectos:

- Calificación de atributo ( $Ca_{EN}$ ), consiste en evaluar el tipo de energético necesario durante un año para obtener el material de construcción, se consideran dos características, renovable y no renovable, dependiendo del porcentaje de participación que tiene cada uno de los energéticos en la producción del material.
- Calificación de impacto ( $Ci_{EN}$ ), consiste en valorar la proyección del (los) energético(s), representada por  $\delta$  (años), compuesta por las cantidades de reservas probadas de energía primaria y producción de la misma a nivel mundial, según el porcentaje de participación de cada energético en la producción del material. Lo anterior permite valorar la capacidad de abastecimiento futuro de los energéticos No renovables.
- Calificación de consumo ( $Cc_{EN}$ ), consiste en evaluar la energía total consumida en un año ( $\beta$ ) para la producción del material de construcción.

Los resultados son llevados a la Ecuación 1 para obtener el valor de la Calificación de Carga de Energía ( $C_{EN}$ ):

$$C_{EN} = Ca_{EN} \times Ci_{EN} \times Cc_{EN} \quad (1)$$

Donde:

- $Ca_{EN}$ : Calificación de atributo energético
- $Ci_{EN}$ : Calificación de impacto energético
- $Cc_{EN}$ : Calificación de consumo energético.

#### 4.1.2 Modelo de emisiones ( $C_{EM}$ )

Al igual que para la calificación de la carga por energía, se evalúan tres aspectos:

- Calificación de atributo por carga de emisiones ( $Ca_{EM}$ ), consiste en evaluar el área de afección de las emisiones que se emiten en la obtención del material de construcción, presentado dos clases de efectos, globales y locales. Como criterio de decisión se adoptó como efecto más desfavorable el de tipo global, por ser éste de mayor impacto.
- Calificación de impacto por emisiones ( $Ci_{EM}$ ), esta calificación consiste en valorar la cantidad de emisiones y la cantidad de efectos que se pueden suscitar en el ciclo del material de construcción.
- Calificación de concentración de emisiones ( $Cc_{EM}$ ), consiste en evaluar las distintas situaciones que se pueden dar entre las variables: cantidad de generación de emisiones ( $\omega$ ) por parte del material de construcción y cantidad de emisiones permitidas ( $\epsilon$ ) por la normativa nacional vigente a la fecha, cuya unidad funcional es microgramos por metro cúbico normal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ).

Los resultados son llevados a una fórmula que obedece a la misma estructura de la Ecuación 1.

#### 4.1.3 Modelo de recursos ( $C_{REC}$ ) y residuos ( $C_{RES}$ )

De manera análoga a como se determina  $C_{EN}$  y  $C_{EM}$ , se procede para  $C_{REC}$  y  $C_{RES}$ , con la salvedad que para este último modelo sólo se considera calificación por atributo e impacto.

#### 4.1.4 Determinación del Grado de Sustentabilidad (GS)

Determinadas las cargas ambientales, por medio de los modelos de daño, los resultados son llevados a la Ecuación 2 para obtener el valor de la calificación de sustentabilidad (CS).

$$CS = C_{EN} \times C_{EM} \times C_{RES} \times C_{REC} \quad (2)$$

Donde:

- $C_{EN}$ : Calificación por carga de energía
- $C_{EM}$ : Calificación por carga de emisiones
- $C_{REC}$ : Calificación por carga de recursos (materias primas)
- $C_{RES}$ : Calificación por carga de residuos

Los rangos de valoración se presentan en la Tabla 5, estos se obtuvieron por medio de un análisis de sensibilización realizado sobre la calificación de cada uno de los modelos. De la Tabla 5 se desprende que un aumento del valor CS, indica un aumento en el impacto causado, es decir, el uso del material en cuestión disminuye la posibilidad de generaciones futuras de satisfacer sus necesidades, por tanto, se estaría en presencia de un material menos sustentable.

Tabla 5. Grado de sustentabilidad (GS) de los materiales de construcción

Rango de Evaluación	Calificación de Sustentabilidad (CS)	Grado de Sustentabilidad (GS)		
		Certificación	Clasificación Material	Certificación del GS
0 < CS < 150	L	Certificación	Sustentable	Sello Verde
150 ≤ CS < 1.000	M		En vías de sustentabilidad	Sello Amarillo
1.000 ≤ CS < 3500	G	No apto para ser certificado	No sustentable	Sin Sello
3.500 ≤ CS < 10.000	MG			

Como criterio de asignación del Sello de Certificación, se ha establecido que al obtener una calificación de Leve (L) o Moderado (M) el material es sustentable. Sin embargo en este último caso la asignación del sello queda sujeta a mejoras que deben ser evaluadas en un tiempo a determinar.

#### 4.2 Determinación del Grado de Sustentabilidad (GS) de los hormigones livianos con ALCV

La Tabla 6 muestra los resultados de la evaluación del Grado de Sustentabilidad (GS) del hormigón liviano con ALCV en comparación a un hormigón normal. Si bien es posible observar que el primero presenta una mejora en su desempeño ambiental, bajando la Calificación de Sustentabilidad (CS) del hormigón normal de muy grave (MG) a grave (G), esta calificación no permite que el material sea certificado con un grado de sustentable.

Sin embargo, se debe destacar que la cuantificación de CS bajó de 3.750 a 1.406. Si se observa el rango de evaluación presentado en la Tabla 5, se desprende que el hormigón liviano con ALCV se encuentra próximo a entrar en la escala de clasificación que le permite ser certificado como en vías de sustentabilidad.

De la Tabla 6 se puede establecer que las áreas en las que se debe trabajar para mejorar el desempeño del hormigón se concentran en las cargas ambientales asociadas al consumo de energía y generación de emisiones, cuyas calificaciones pasaron de muy grave a grave.

Tabla 6. Determinación del Grado de Sustentabilidad del Hormigón

Cargas Ambientales	Calificación de Sustentabilidad (CS)	
	Hormigón Normal	Hormigón Liviano con ALCV
C <sub>EN</sub>	10 → MG	7,5 → G
C <sub>EM</sub>	10 → MG	7,5 → G
C <sub>REC</sub>	7,5 → G	5 → M
C <sub>RES</sub>	7,5 → G	5 → M
<b>CS</b>	3.750 → <b>MG</b>	1.406 → <b>G</b>
<b>GS</b>	No sustentable	No sustentable

En este sentido, es posible seguir trabajando en la generación de innovaciones tecnológicas que permitan incorporar en el proceso de elaboración del hormigón subproductos de otras industrias, y estudiar los que se conocen como cementos terciarios, es más, en algunos casos ya se habla de cementos cuaternarios, es decir, que consideran hasta cuatro adiciones minerales distintas en el proceso de fabricación del cemento. Es importante abordar este último proceso, puesto que es el que más impacta en cuanto a consumo energético y emisiones se refiere.

También es posible explorar el campo de los materiales sustitutos del cemento portland para la elaboración del hormigón, aspecto que redundará en la disminución de la demanda de este tipo de cemento o de la necesidad de fabricación de clínquer, proceso responsable de las cargas ambientales asociadas al cemento en cuanto a consumo energético y emisiones.

## 5. Conclusiones

Es mucho lo que queda por hacer en materia medioambiental en el sector de la construcción, tanto en Chile como a nivel internacional. Es necesario generar el conocimiento científico y tecnológico que permita enfrentar los desafíos futuros, más aun cuando las normativas ambientales son cada día más exigentes, y la escasez, y por tanto, aumento de precio de los energéticos, crece sostenidamente.

En esta línea, el presente artículo presentó dos estudios desarrollados con el propósito de generar alternativas para el logro de la sustentabilidad de la construcción.

Del desarrollo de ALCV se concluyó que el proceso de fabricación de áridos artificiales, bajo condiciones de endurecimiento en frío, es técnicamente factible y permite obtener un producto con claras ventajas

para ser empleado como árido liviano para hormigón. Además, de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a hormigones, se pudo establecer que los ALCV permiten la obtención de hormigones livianos estructurales. Lo anterior tiene beneficios técnicos y económicos. Por un lado la elaboración de áridos livianos de cenizas volantes permite minimizar los problemas de extracción y erosión de suelos, ocasionados por la explotación de áridos naturales, ayudando a su vez al manejo y control de las cenizas volantes, las que constituyen un subproducto industrial. Por otro lado, el desarrollo de una tecnología que considera el mínimo consumo energético, responde a los criterios establecidos para las llamadas tecnologías limpias, las que tienen por objetivo minimizar los impactos ambientales asociados. A su vez, la obtención de hormigones livianos estructurales, permite fomentar su uso, generando beneficios como: ahorro de materiales, minimización del consumo energético (eficiencia energética) y mejoramiento de las condiciones de habitabilidad de las edificaciones.

El desarrollo de un Modelo de Evaluación de la Sustentabilidad de los Materiales de Construcción ha permitido cuantificar el efecto de las mejoras introducidas en el hormigón desde el punto de vista de su desempeño ambiental durante el ciclo de vida del material. El uso de herramientas de este tipo permite certificar el grado de sustentabilidad de los materiales, y por tanto, fomentar el consumo de productos sustentables. Vale destacar que esta metodología de certificación debe seguir perfeccionándose. En este punto, se debe señalar que es necesario fomentar a nivel nacional la generación de bases de datos que cuantifiquen las emisiones totales de los procesos de producción y que relacionen su concentración con los efectos sobre la salud humana y el entorno natural.

Finalmente, es necesario resaltar el urgente respaldo de políticas gubernamentales, o mejor dicho de Estado, que conlleven un compromiso a favor de iniciativas y decisiones tomadas sobre la base de la construcción sustentable, aspecto que asociado al compromiso académico por buscar y entregar soluciones en la materia, permitirán abordar de manera efectiva y global el importantísimo tema de la sustentabilidad.

En este sentido, el desarrollo de tecnologías limpias y herramientas de evaluación de la sustentabilidad y generación de sellos de certificación, constituyen importantes y valiosas herramientas para cumplir con estos propósitos. Sin embargo, es importante asumir estas iniciativas con responsabilidad y con miras a largo plazo.

La problemática del desarrollo sustentable es

compleja, ocurrirá un crecimiento significativo de las Tecnologías para el Desarrollo Sustentable (TDS) cuando el desarrollo económico, el conocimiento científico y los valores humanos se traslapen, para lo cual es evidentemente necesario adoptar enfoques holísticos de desarrollo. Se están llevando a cabo esfuerzos para integrar el desarrollo socio-económico con el conocimiento científico, el que incluye tanto las ciencias físicas como las de la vida. Es el ámbito de la ética y los valores humanos el que necesita más atención, porque la tecnología, si no es controlada por los valores humanos, puede traer consecuencias desastrosas a la humanidad.

Para terminar, y considerando el importante rol que juega la industria de la construcción en el desarrollo de la economía de todos los países, y considerando, además, el fuerte impacto ambiental que esta produce (elevado consumo de materias primas, el consumo energético que involucra la mantención y operación de las edificaciones, y los importantes volúmenes de material de demolición provenientes de construcciones que han concluido su ciclo de vida, sólo por nombrar algunos aspectos), se concluye que resulta de suma importancia introducir en la enseñanza de las carreras relacionadas con este sector de la economía, los conceptos que involucran el desarrollo sustentable, sus implicancias tanto a escala nacional como mundial, y las tecnologías disponibles para enfrentar de mejor manera este desafío, incentivando en el proceso la investigación y la innovación en cada una de las tareas emprendidas.

## 6. Agradecimientos

Se agradece el financiamiento recibido por la Dirección de Investigación y Postgrado de la Universidad de Valparaíso a través del Proyecto DIPUV-REG 02/2003, "Aproximación a un Modelo para la Evaluación de la Sustentabilidad de la Construcción en Chile".

## 7. Referencias

- American Concrete Institute (1987), Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. Reported by ACI Committe 213, ACI 213R-87, Detroit, USA.
- American Society For Testing And Materials (1998), Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02 Concrete and Aggregates. Philadelphia, ASTM V.4.02-98
- Baykal G. y Doven A.G. (1999), Lightweight concrete production using unsintered fly ash pellet aggregate.

- Proceedings: 13th International Symposium on Used and Management of Coal Combustión Products. ACAA International, January 11-15, Orlando, Florida, USA, paper 3, 1-14.
- Cahn D. (1997), Atmospheric CO<sub>2</sub> and the U.S. Cements Industry. *World Cements*, Vol.28, N°8, p.p. 64-68
- CIB (2000), AGENDA 21. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB Publication 237, Green Building Challenge Chile.
- Frigione G. y Frigione M. (1996), Role of Blended Cement in Optimisation of Energy in Cement Manufacture. *Progress in Cement and Concrete. Energy Conservation and Environmental Control in Cement Industry*, Vol. 2, Part 1, India, p.p. 182-223
- Hwang C., Lin R., Hsu K. y Chan J. (1992), "Granulation of fly ash lightweight aggregate and accelerated curing technology". *Proceeding Fourth International Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*". SP 132-24, V.1, Istanbul, Turkey, 419-438.
- Ibaceta C. (2004), *Proposición de una Metodología de Evaluación de la Sustentabilidad de los Materiales de Construcción y Generación de un Sello Verde*. Tesis de Grado y Título, Escuela de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, CHILE
- INN (1999) NCh-ISO 14040 Of. 1999, *Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco*. Instituto Nacional de Normalización, Chile. Ley 19.300, Ley de Bases del Medio Ambiente (1992), Chile
- Macías A., Goñi S., Guerrero A. y Fernández E. (1999), *Inmovilización/solidificación de residuos tóxicos y peligrosos en matrices de cemento*. *Materiales de Construcción*, IETCC, Vol. 49, N°254, p.p. 5-16
- Martínez P. (2003a), *Rol de la Industria de la Construcción en el Desarrollo Sustentable*. *Revista Ambiente y Desarrollo*, Vol. XIX, N°1, Enero-Marzo, p.p. 19-25
- Martínez P. (2003b), *Desarrollo de Aridos Livianos de Cenizas Volantes para Hormigones Livianos Estructurales*. Tesis de doctorado, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, CHILE
- Malhotra V.M. (1999), *Making Concrete "Greener" with Fly Ash*. *Concrete International*, Vol.21, N°5, ACI, p.p.61-66
- Mehta P.K. (1998), *Role of Pozzolanic and Cementitious Material in Sustainable Development of the Concrete Industry*. *Proceeding Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, SP-178, Bangkok, Thailand, May 31-June 5, p.p.1-20.
- Rilem (1978), *Functional Classification of Lightweight Concrete*, Recommendation LC2, 2<sup>nd</sup> edition.
- Tirado G. (2005), *Validación de la Metodología de Evaluación de la Sustentabilidad de los Materiales de Construcción: Aplicación Al Hormigón y sus Componentes*. Tesis de Grado y Título, Escuela de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, CHILE
- Videla C. y Martínez P. (2002), *Caracterización físico-mecánica y microscópica de agregados livianos de cenizas volantes producidos en frío*. *Materiales de Construcción*, Vol. 52, N°268, Octubre/ Noviembre/ Diciembre, p.p.5-18
- Videla C. y Martínez P. (2001), *Aridos livianos de cenizas volantes para la construcción con hormigón sustentable*, *Revista Ingeniería de Construcción*, Volumen 16, N°2, Junio-Diciembre, p.p. 99-104