

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY
FACULTAD DE ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

MONTEVIDEO 2015

**MAESTRIA EN CONSTRUCCIÓN
DE OBRAS DE ARQUITECTURA**

EVALUACION DE LAS EMISIONES DE CARBONO DEL
CEMENTO PORTLAND COMPUESTO CON CENIZA DE
CASCARA DE ARROZ DURANTE EL PROCESO DE
FABRICACION

Patricia Hidalgo Iglesias

Tesis presentada como parte de los requisitos
para la obtención del título de “Magister en
Construcción de Obras de Arquitectura”

MONTEVIDEO
2015

Esta tesis ha sido juzgada adecuada para la obtención del título de Magister en Construcción de Obras de Arquitectura y aprobada en su forma final por el Orientador y por el Tribunal del Curso de Posgrado.

Orientadora: Prof., Dra. Arq. Gemma Rodríguez

Tribunal:

Dr. Luis Fernández Luco (Universidad de Alicante, España)
Ms. Sc., Arq. Stela Sabalsagaray (U.F.R.G.S., Brasil)
Ms. Sc., Arq. Carola Romay (U.N. de Mar del Plata, Argentina)

MONTEVIDEO, 2015

Dedico este trabajo a la memoria de mi amiga y compañera de cursos Arqta. Sara Milicua (ausente), quien fue un ejemplo de compañerismo y profesionalidad para todo el grupo de maestría.

AGRADECIMIENTOS

A mi orientadora, la profesora Gemma Rodríguez por sus certeras sugerencias, rápidas devoluciones y enriquecedor aporte para poder avanzar en este trabajo.

A los integrantes de la mesa examinadora: Dr. Luis Fernández Luco, Ms. Sc., Arq. Stela Sabalsagaray y Ms. Sc., Arq. Carola Romay

A los amigos y familiares que de diferentes formas me ayudaron a mantener el ánimo en alto y la mirada hacia adelante.

“Cuando creíamos que teníamos todas las respuestas,
de pronto, cambiaron todas las preguntas”

(Mario Benedetti)

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABLAS.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	iii
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 FUNDAMENTACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
1.3 METODOLOGÍA.....	3
1.4 CONTENIDO DE LOS CAPITULOS.....	3
1.5 ALCANCE DEL TRABAJO Y LIMITACIONES.....	4
2 CEMENTO PORTLAND.....	5
2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	5
2.1.1 Industria del cemento.....	6
2.1.2 Métodos de producción y emisiones de carbono.....	8
2.1.3 Composición y clasificación.....	10
2.1.4 Adiciones.....	10
2.1.5 Cementos puzolánicos y compuestos.....	11
2.2 PRODUCCION DE CEMENTO EN URUGUAY.....	13
2.2.1 Norma UNIT 20: 2003.....	18
2.2.2 Clasificación.....	19
3 CENIZA DE CASCARA DE ARROZ (CCA).....	22
3.1 CONSIDERACIONES SOBRE LA CASCARA DE ARROZ.....	22
3.2 CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN DE LA CCA.....	25
3.3 DISPOSICIÓN FINAL.....	27
	VII

3.4	EFFECTO DE LA CCA EN SU EMPLEO COMO ADICION MINERAL EN CEMENTOS (EFFECTO PUZOLÁNICO Y FILLER)	30
4	VIABILIDAD ECONOMICO-AMBIENTAL DE LA ELABORACION DEL CEMENTO PORTLAND COMPUESTO	32
4.1	SELECCION DE MUESTRAS A ESTUDIAR	32
4.1.1	Materiales empleados para la elaboración de las muestras	32
4.1.2	Composición química	32
4.1.3	Propiedades mecánicas	33
4.2	VENTAJAS ECONOMICO-AMBIENTALES	36
4.2.1	Mecanismo de Desarrollo Limpio	36
4.2.2	Bonos de carbono	37
5	EVALUACION DE EMISIONES DE CARBONO.....	39
5.1	HISTORICO	39
5.2	CALCULO DE LAS EMISIONES DEL CPC	40
5.2.1	Emisiones por calcinación del calcáreo	41
5.2.2	Emisiones por quema de combustible	41
5.2.3	Emisiones por transporte de ceniza de cáscara de arroz	43
5.2.4	Reducción de Emisiones por utilización de ceniza residual	45
6	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS A FUTURO.....	52
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Costa Oeste de la Isla de Portland cerca de Weston, Dorset, Gran Bretaña.....	5
Figura 2 Evolución de la producción de cemento en el mundo por región 2001-2012 en millones de toneladas, base 2001=100.....	6
Figura 3 Emisiones netas específicas promedio de CO ₂ por tonelada de producto cementante.....	9
Figura 4 Consumo de energía térmica por tonelada de clínker	9
Figura 5 Extracción de piedra caliza y carga en camiones.....	13
Figura 6 Fluxograma de producción de cemento Pórtland con adiciones por molienda conjunta en planta Minas	14
Figura 7 Producción de cemento Pórtland por planta, 2001-2012.....	15
Figura 8 Consumo interno y exportación de cemento Pórtland, 2001-2012	18
Figura 9 Producción y superficie mundiales de arroz en cáscara.....	22
Figura 10 Galofer. Planta productora de energía a partir de la cáscara de arroz	24
Figura 11 Galofer, esquema de generación de energía.	25
Figura 12 Curva de condiciones óptimas de incineración para obtener una CCA reactiva y celular.....	26
Figura 13 Galofer S.A. Diagrama de proceso de cogeneración de energía eléctrica con Cáscara de Arroz.....	28
Figura 14 Complejo Industrial Arrozur-Galofer. Foto satelital del predio.....	29
Figura 15 Depósito con quema de cáscara.....	29
Figura 16 Transporte y disposición final de la CCA.....	30
Figura 17 Criterios de desarrollo sostenible del MDL.....	37
Figura 18 Emisiones CO ₂ , Industrias de la energía y Sectores de consumo, 2012 (%).....	39
Figura 19 Emisiones CO ₂ , Industrias de la energía y Sectores de consumo, 1990-2012, (kton.)	40
Figura 20 Mapa geológico del Uruguay.....	44

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 Producción y consumo de cemento por regiones (millones de toneladas)	7
TABLA 2 Clasificación de adiciones minerales para el hormigón	11
TABLA 3 Producción de cemento Portland por planta, 2003-2012 (en toneladas)	16
TABLA 4 Producción total de cemento Portland 2012 (en toneladas)	16
TABLA 5 Producción de clínker (en toneladas).....	16
TABLA 6 Uso de combustibles para elaboración de cemento Pórtland.....	17
TABLA 7 Ventas al mercado interno y exportación de cementos Pórtland en toneladas.....	18
TABLA 8 Tipos de cemento y composición.....	20
TABLA 9 Requisitos mecánicos (UNIT20:2003).....	21
TABLA 10 Requisitos físicos para CPC (UNIT 20:2003)	21
TABLA 11 Requisitos químicos para CPC (UNIT 20:2003)	21
TABLA 12 Energía entregada a la red en el período 2010-2012.....	25
TABLA 13 Propiedades mecánicas de las mezclas estudiadas con CCA de Arrozur.....	34
TABLA 14 Propiedades mecánicas de las mezclas estudiadas con CCA de Galofer.....	35
TABLA 15 Propiedades mecánicas de las mezclas elegidas con CCA de Arrozur.....	46
TABLA 16 Propiedades mecánicas de las mezclas elegidas con CCA de Galofer.....	47
TABLA 17 Cantidad de CO ₂ retenida en CPC por sustitución de cemento por CCA de Arrozur.....	48
TABLA 18 Cantidad de CO ₂ retenida en CPC por sustitución de cemento por CCA de Galofer.....	49
TABLA 19 Emisiones totales de CO ₂ con mezclas de ARROZUR y reducciones con respecto al CPN.....	50
TABLA 20 Emisiones totales de CO ₂ con mezclas de GALOFER y reducciones con respecto al CPN.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

ACA	Asociación de Cultivadores de Arroz
ACI	American Concrete Institute
ANCAP	Administración Nacional de Combustible Alcohol y Pórtland
ANII	Agencia Nacional de Investigación e Innovación
CCA	Ceniza de Cáscara de Arroz
CCS	Carbon Capture and Storage
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CP40 ARS	Cemento Puzolánico Altamente Resistente a los Sulfatos
CPC	Cemento Pórtland Compuesto
CPF	Cemento Pórtland con Filler
CPN	Cemento Pórtland Normal
CSI-PRS	Cement Sustainable Initiative- Progress Report Summary
F	Filler calcáreo
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
FICEM	Federación Interamericana del Cemento
FSE	Fondo Sectorial de Energía
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
GNR	Getting the Numbers Right
IAP	Índice de Actividad puzolánica
IEM	Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería, UDELAR
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kton	Kilo-toneladas
LCC	Low Carbon Cement
MDL	Mecanismo de Desarrollo Libre
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
MVOTMA	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
MW	Megawatts
MWh	Megawattshora
NBR	Norma Brasileña
P	Puzolana
PK	Protocolo de Kioto
Ton.	Tonelada
UNFCCC	United Nations Framework
UNIT	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas

UTE Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas

WB World Bank

WBCSC- CSI World Business Council for Sustainable Construction-Cement Sustainability Initiative

RESUMEN

A partir del siglo XX los adelantos tecnológicos en la industria del cemento y su utilización como aglomerante en el hormigón permitieron construir principalmente las infraestructuras de las sociedades de todo el mundo. Los beneficios de usar hormigón estuvieron históricamente asociados a su larga durabilidad con bajo costo de mantenimiento y más recientemente a la posibilidad de ser reciclado separándolo en agregados al final de su vida útil (WBCSD, 2009).

Sin embargo, la industria del cemento consume gran cantidad de energía para operar y emite al ambiente el 5% de la generación mundial de dióxido de carbono producido por el hombre. Desde comienzos de este siglo la preocupación de organizaciones relacionadas con el medio ambiente y gobiernos por el cambio climático se focalizó en este hecho. Más aún, sabiendo que la fabricación de cemento seguirá creciendo en particular en los países en desarrollo, resulta indispensable un análisis del proceso desde una perspectiva que evalúe el impacto que genera en el medio ambiente y en las comunidades involucradas (WBCSD, CSI, 2005).

Para reducir las emisiones de dióxido de carbono durante el proceso de fabricación del cemento existen diferentes alternativas. En este trabajo se optó por reducir la relación clínker/cemento de muestras elaboradas en base a cemento Portland compuesto (CPC) con un desecho de la agroindustria: la ceniza de cáscara de arroz (CCA) y filler calcáreo. Luego de ser ensayadas en laboratorio, se seleccionaron las que cumplían con la norma UNIT 20:2003. Se calcularon las emisiones provenientes de las muestras seleccionadas y se compararon con los valores correspondientes al cemento Portland normal (CPN) de referencia en base a la metodología propuesta por el Intergovernmental Panel on Climate Change (UNFCCC, 2000). Los valores de sustitución variaron entre 10% y 35% considerando la CCA y el filler calcáreo. Además de darle un uso a un desecho de la agroindustria, los materiales silíceos como la CCA reaccionan con el hidróxido de calcio presente en la pasta de cemento hidratada y forman compuestos hidráulicos que aumentan la compacidad de las mezclas. Se concluye que a mayor porcentaje de sustitución de clínker, mayor es la reducción de la cantidad de emisiones de dióxido de carbono al ambiente. Por lo tanto la incorporación de CCA no sólo reduce las emisiones de dióxido de carbono sino que debido a sus propiedades puzolánicas también logra mejorar las calidades de los materiales en los cuales estos cementos son empleados y contribuir a disminuir los residuos de la agroindustria. Es así que el proceso de producción se torna más sustentable desde el punto de vista ambiental, técnico y económico.

Palabras clave: Cemento Portland Compuesto, Emisiones de dióxido de carbono, Ceniza de Cáscara de Arroz

ABSTRACT

Since the beginning of 20th century, technological advances in the industry of cement and its use as a binding agent in concrete have mainly allowed societies to build the infrastructures of the entire world. The benefits of using concrete have historically been related to its long lasting life, its low maintenance cost and more recently to the possibility to be recycled into separate aggregates at the end of its service life (WBCSD, 2009).

However, cement industry consumes large amounts of energy to operate and emits 5% of the worlds' man-made carbon dioxide. Since the beginning of this Century the environmental organizations and governments' concern about climate change have focussed on this fact. What is more, knowing that cement production will keep on growing particularly in developing countries, it turns imperative to analyse the production process from a perspective which evaluates its impacts on the environment and on the communities involved (WBCSD-CSI, 2005).

There are different alternatives to reduce the carbon dioxide emissions in the cement production process. The main aim of this study is to reduce the ratio between clinker and cement in the composites elaborated with blended cements composed with one agro industrial waste: the rice husk ash (RHA) and calcareous filler. After testing the samples in the lab, the ones which complied with rule UNIT 20:2003 were chosen.

Based on Intergovernmental Panel on Climate Change methodology (UNFCCC, 2000), emissions from the chosen composites were calculated and compared to Normal Portland Cement reference values. Substitution values varied in a range from 10% to 35%, considering both rice husk ash and calcareous filler. Not only do these composites use residual material coming from the agro-industrial field, but also siliceous materials like rice husk ash react with free calcium hydroxide present in hydrated cement paste and turns it into hydraulic compounds which enlarge the mixtures' compactness.

It can be concluded that the larger the clinker substitution percentage is, the greater the reduction of carbon dioxide emissions is. Therefore, the incorporation of rice husk ash to cement not only reduces the carbon dioxide emissions, but also improves the quality of the materials in which these cements are used. Besides, it contributes to diminishing the agro-industrial amount of waste. As a result, the production process becomes more sustainable from the environmental, technical and economic point of view.

Key-words: Blended Portland cement, Dioxide Carbon Emissions, Rice Husk Ash

1. INTRODUCCIÓN

1.1 FUNDAMENTACIÓN

El cemento es uno de los materiales hecho por el hombre más usado en el mundo. Se consumen en promedio casi 450kg de cemento por habitante por año. Gran parte de este consumo es debido al crecimiento sostenido de la población mundial y al proceso de urbanización, hechos que demandan nuevos edificios e infraestructura (WBCSC- CSI, 2012).

La industria del cemento es responsable del 5% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono antrópico, el principal gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global (WBCSD-CSI-PRS, 2012). Este fenómeno está asociado a las características de los procesos de extracción de materia prima y fabricación del clínker (principal componente del cemento), los cuales consumen materiales y energía intensamente generando además impactos globales y locales en el medio ambiente (WBCSC-CSI-PRS, 2012). Para producir una tonelada de clínker se emite casi una tonelada de dióxido de carbono (MEHTA, 2002). De acuerdo con los datos publicados por las Naciones Unidas (WBCSD- CSI-GNR1, 2012)¹ la producción de clínker mundial creció desde 1990 a 2011 de 421000 toneladas a 665000 (un 58%) y si no se tomaran medidas de mitigación seguirá creciendo a ritmo acelerado. En el año 2012 la producción mundial de cemento ascendió a 3.83 billones de toneladas (FICEM, 2013). La Agencia Internacional de Energía junto al WBCSD elaboraron un mapa de ruta² para reducir a la mitad las emisiones de dióxido de carbono originadas en la producción de cemento durante el período que va desde el año 2006 al 2050. Una de las estrategias allí descritas consiste en sustituir parte del clínker por elementos residuales de otras industrias con el fin de disminuir la cantidad de energía necesaria en su fabricación. Como gran parte de esa energía proviene del empleo de combustibles fósiles, los cuales liberan dióxido de carbono a la atmósfera, una disminución en la utilización de dichos combustibles redundaría en una reducción de las emisiones de dióxido de carbono. Algunos componentes adicionales como la escoria de alto horno, la ceniza volante, la sílice activa y la ceniza de cáscara de arroz ya son usados a nivel mundial. En general son residuos provenientes de la industria o agroindustria. Su incorporación al cemento no sólo reduce el

¹ WBCSD, CSI, GNR World Business Council for Sustainable Development, Cement Sustainable Initiative, Get the Numbers Right.

² Cement Technology Roadmap, 2009

impacto ambiental (por reducción de las emisiones de dióxido de carbono) sino que mejora también la durabilidad de morteros y hormigones al actuar como puzolanas. Estudios sobre la incorporación de la ceniza de cáscara de arroz en hormigones y morteros (MEHTA, 1977; MEHTA, 1978; JAMES e SUBBA RAO, 1996; MALHOTRA e MEHTA, 1996, CHAGAS CORDEIRO, 2006; entre otros) resaltan la potencialidad de este residuo para ser usado en cementos compuestos y adiciones debido a su composición química rica en sílice.

El Análisis del Ciclo de Vida (LCA)³ es el procedimiento de analizar formalmente la compleja interacción de un sistema, que puede ser un material, un componente, o un conjunto de componentes con el ambiente a lo largo de todo el ciclo de vida, (Silva 2003). En el caso de los materiales se debe considerar la energía incorporada en el transporte de su materia prima, durante su fabricación, puesta en obra, operación y en el momento de su reciclaje al final de su vida útil. Por lo tanto el valor de la energía incorporada a lo largo de la vida útil de un material va a variar de acuerdo con la región, el tipo de transporte, la localización de las materias primas, la tecnología empleada, etc. En esta tesis se evaluará la energía incorporada en el cemento durante su proceso de fabricación.

En Uruguay se han realizado investigaciones sobre desarrollo de cemento portland puzolánico en base a la incorporación de ceniza de cáscara de arroz amorfa obtenida a partir de pretratamiento ácido de cáscara de arroz uruguayo (Rodríguez, 2010). Los datos que arrojan estos estudios muestran que es posible sustituir hasta un 10% de cemento por puzolana sin alterar las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros y hormigones, en comparación con los tradicionales. Desde 2012 se vienen realizando investigaciones en relación al empleo de ceniza de cáscara de arroz residual uruguayo para desarrollar cemento Portland Compuesto (CPC), en el marco del proyecto ANII FSE_1_2011_1_6476 “Cemento Portland Compuesto (CPC) con ceniza de cáscara de arroz: oportunidad para el ahorro energético y disminución de emisiones de CO₂ en el proceso de elaboración de cementos de nuestro país”. Dicho proyecto culminará en mayo de 2015. A partir de los resultados allí obtenidos, en el siguiente trabajo se calcularán las emisiones de cementos compuestos en base a cenizas de cáscara de arroz residual y filler calcáreo y se compararán con las del Cemento Portland Normal (CPN).

1.2 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es calcular las emisiones de carbono producidas por diferentes cementos Portland compuestos con filler calcáreo y cenizas de cáscara de arroz (CCA) durante su proceso de fabricación y compararlas con las del cemento común.

³ LCA Life Cycle Analysis

1.3 METODOLOGÍA

La metodología se basa en el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono del CPC con formulación elaborada en base a muestras realizadas en laboratorio con diferentes proporciones de cemento, filler calcáreo y ceniza de cáscara de arroz en el marco del Proyecto ANII FSE_1_2011_1_6476 “Cemento Portland Compuesto (CPC) con ceniza de cáscara de arroz: oportunidad para el ahorro energético y disminución de emisiones de CO₂ en el proceso de elaboración de cementos de nuestro país”

Para ello se seleccionan las mezclas que además de cumplir con la Norma UNIT 20:2003 obtengan mejores resultados en las pruebas de resistencia a compresión.

Para determinar el valor de las emisiones de dióxido de carbono se utilizará la metodología adoptada por el Intergovernmental Panel on Climate Change a partir del United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2000). El cálculo se realiza sumando las emisiones producidas por la calcinación de la piedra caliza y las provenientes de la quema de combustibles fósiles.

El uso de la CCA como subproducto reduce el desecho de carbono proveniente de su composición química que se libera al ambiente y pasa a formar parte del CPC. Este factor también será tenido en cuenta en el cálculo final de emisiones.

1.4 CONTENIDO DE LOS CAPITULOS

En el capítulo 1, denominado Introducción se fundamenta la elección del tema, se definen los objetivos, el alcance del trabajo y sus limitaciones, así como la metodología utilizada.

En el capítulo 2, relativo al Cemento Portland se describen los procesos de la industria del cemento, su producción mundial y sus consecuencias medioambientales. Se clasifican los tipos de cemento de acuerdo con su composición, se describe el proceso de producción en Uruguay y se especifican las normas técnicas referidas a su composición y ensayos de referencia (UNIT20:2003 y UNIT-ISO 679:2009 respectivamente).

La ceniza de cáscara de arroz es abordada en el capítulo 3. Allí se desarrollan los conceptos de producción y utilización de la cáscara de arroz así como la composición de la ceniza resultante de la quema. Se describen también los métodos de disposición final de la CCA y sus propiedades cuando se emplea como un aditivo mineral en cementos.

El capítulo 4, Viabilidad económico-ambiental del cemento Portland compuesto, analiza las muestras ensayadas de acuerdo con sus propiedades, seleccionando aquellas que cumplan con la norma UNIT para poder calcular en el siguiente capítulo las emisiones de carbono. Además se exponen las razones por las cuales se podría incluir el uso de CCA en la fabricación de cemento dentro de los Mecanismos de Desarrollo Limpio y se realiza una

revisión bibliográfica en torno a las ventajas e inconvenientes de la emisión de bonos de carbono en el mercado.

En el capítulo 5 se calculan las emisiones de dióxido de carbono emitidas anualmente en la producción de Cemento Portland Normal (CPN) en la planta de ANCAP de Minas y se comparan con las de diferentes muestras de CPC elaborado con CCA y filler calcáreo.

Las conclusiones de lo presentado en los capítulos anteriores, la conveniencia de promover la fabricación del CPC en la coyuntura actual y las sugerencias para futuras investigaciones se desarrollan en el capítulo 6.

1.5 ALCANCE DEL TRABAJO Y LIMITACIONES

Esta tesis se encuadra dentro de un proyecto del Fondo Sectorial de Energía (FSE) de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII). En dicho proyecto se busca disminuir las emisiones de carbono producidas en la elaboración del clínker sustituyendo parte de este compuesto por residuos agroindustriales sin afectar las propiedades de los materiales en que se utilice. Mediante una de investigación teórico-experimental se pretende revalorizar los residuos agroindustriales incentivando su empleo en la industria del cemento.

Para evaluar las emisiones de dióxido de carbono del cemento se considerarán las producidas por la calcinación del calcáreo (clínker) y el resultante de la quema de combustible de los hornos. No se estudiará el combustible utilizado por el transporte de la CCA desde la arrocería hasta la planta de fabricación de cemento; en ese sentido cabe mencionar que se proyecta construir una cementera en el km 328 de la Ruta 8 mientras que la arrocería Arrozur, de la cual proviene la ceniza, se encuentra en Villa Sara a 45 km sobre la misma Ruta 8 (km 283), ambas en el departamento de Treinta y Tres.

Otro punto que merece mención es que las muestras ensayadas en el proyecto ANII-FSE están formadas por cemento portland con adición de moliendas separadas de filler calcáreo y CCA y fueron elaboradas en el laboratorio. Cabe observar que los cementos compuestos cuyas adiciones se muelen conjuntamente con el clínker en la planta cementera garantizan una finura homogénea de los materiales a la vez que un mejor aprovechamiento de las capacidades de producción de la fábrica de cemento (Rodríguez, 2010). Por lo tanto una limitación del proyecto es trabajar en base a resultados de laboratorio, y no a nivel industrial.

2 CEMENTO PORTLAND

2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

El Cemento Portland, uno de los componentes básicos para la elaboración del hormigón, debe su nombre a Joseph Aspdin, albañil de origen inglés quién en 1824 obtuvo la patente para este producto a partir de la quema a elevadas temperaturas de piedra caliza y arcilla, finamente molidas y mezcladas. Debido a su semejanza con una caliza natural que se explotaba en la Isla de Portland, sur de Inglaterra, lo denominó Cemento Portland. Ver figura 1.



**Figura 1 Costa Oeste de la Isla de Portland cerca de Weston, Dorset, Gran Bretaña
(Fuente: <http://www.geograph.org.uk/photo/1029515>)**

Los componentes básicos para la fabricación del cemento son el óxido de calcio, óxido de sílice, alúmina y el óxido de hierro, todos provenientes de la piedra caliza y la arcilla. También se agregan materiales correctivos como arena, bauxita y mineral del hierro cuya función es suplir al clínker con elementos no disponibles en las materias primas principales (Cordeiro, 2006).

El proceso de fabricación del cemento consiste en dosificar y moler la mezcla en proporciones adecuadas para luego hornearla a temperaturas próximas a 1450°C. Se llega así a obtener un compuesto, el clínker, con forma de nódulos. Una vez enfriado el clínker se muele y se le pueden agregar yeso y otras adiciones hasta obtener una granulometría pareja y fina. La homogeneización y el molido de las materias primas pueden ser hechos

tanto por vía húmeda como seca. El proceso por vía húmeda es más antiguo y debido al alto consumo energético necesario para eliminar el agua se encuentra en desuso (Mehta y Monteiro, 2014).

2.1.1 Industria del cemento

En la actualidad el cemento Portland es el principal material de construcción empleado por el hombre. El hormigón, que está compuesto por cemento, áridos y agua, representa en conjunto con el acero la base de la ingeniería estructural moderna (Cordeiro, 2006). La figura 2 muestra la evolución de la producción de cemento mundial agrupada por regiones desde el año 2001 al 2012. En Asia y Africa la pendiente de la gráfica es positiva desde 2001, lo que indica que la producción ha crecido de forma sostenida en el período. En Europa y la Comunidad de Países Independientes ha habido una caída de la producción durante 2009 y en 2012, probablemente debido a la crisis económica de la región. “La producción continuó en aumento en 2012 en comparación con los años anteriores en América del Sur, África y Asia” (FICEM, 2013).

En cuanto a la representatividad de los datos, cabe destacar que la Cement Sustainable Initiative tiene una cobertura del 25% de la producción mundial de cemento y del 68% de la producción de América Latina y el Caribe (WBCSD-CSI, 2011). Además, de 1990 a 2011 la producción de cemento de las compañías participantes del estudio en el mundo aumentó 75% y en Latinoamérica 135% (WBCSD-CSI, 2011).

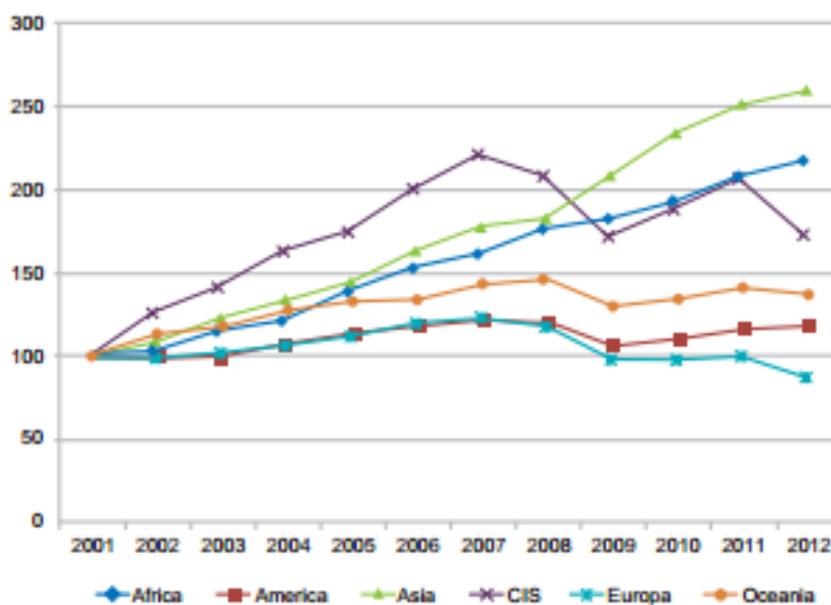


Figura 2 Evolución de la producción de cemento en el mundo por región 2001-2012 en millones de toneladas, base 2001=100 (Fuente: FICEM Informe Estadístico 2013)

La tabla 1 muestra la producción y consumo de cemento por región durante los años 2010, 2011 y 2012. Ambas variables toman valores considerablemente mayores en el norte de Asia que en el resto del mundo. Junto al subcontinente Indio las dos regiones alcanzaron a producir el 69% del producto mundial en 2012. Otro aspecto a resaltar es que la relación entre el total de la producción mundial de las regiones y el total del consumo alcanza anualmente valores de 1,016 % en 2010, 1,065% en 2011 y 1,025% en 2012, todos muy cercanos a la unidad. Esto significa que el promedio de la producción mundial es apenas superior al consumo. Los máximos de esta relación se obtienen en Europa Central durante el período 2010-2012 con un excedente de 10%. El mayor déficit del producto se encuentra en Austral Asia y Centro y Sur de África con un 17% para el primer caso y un 19% para el segundo durante el mismo período (2010-2012). En el Norte de Asia y Subcontinente Indio, donde como anteriormente se mencionó se fabrica el 69% del producto mundial, la producción es prácticamente igual al consumo. Interpretando la tabla se puede afirmar que la gran mayoría de las regiones producen el cemento necesario para su uso interno con muy poco excedente. Este fenómeno debería ser estudiado con mayor profundidad pero una de las causas podría ser los altos costos de transporte de cargas pesadas y la necesidad de infraestructura vial apta para tales fines.

TABLA 1 Producción y consumo de cemento por regiones (millones de toneladas)

Región	2010		2011		2012E ⁽²⁾	
	Producción	Consumo	Producción	Consumo	Producción	Consumo
América Latina y el Caribe	161,150	159,390	172,460	170,370	180,110	178,120
Norte América ⁽¹⁾	77,470	79,980	79,000	81,030	86,530	90,390
Europa Occidental	243,090	221,770	253,380	230,420	230,500	207,800
Europa Central	26,990	26,520	28,170	26,540	27,290	25,280
Europa Oriental	84,900	82,820	94,500	94,470	102,210	102,870
Norte y Este de África	118,860	130,310	116,580	126,460	133,060	136,180
Centro y Sur de África	30,720	40,570	37,800	45,400	45,100	50,520
Medio Oriente	169,040	167,090	176,620	176,730	188,070	181,810
Subcontinente Indio	276,840	273,920	293,750	293,500	302,200	303,520
Norte de Asia	2.008,080	1.959,730	2.209,800	2.161,180	2.352,770	2.272,310
Sur de Asia	157,420	156,450	166,560	165,910	172,610	173,850
Australasia	10,290	13,140	10,120	13,160	10,430	13,430
Total	3.364,850	3.311,690	3.638,740	3.585,170	3.830,880	3.736,080

(1) Las cifras de México están incluidas en América Latina y el Caribe.

(2) Valores estimados.

(Fuente: FICEM, Informe Estadístico 2013)

2.1.2 Métodos de producción y emisiones de carbono

Aproximadamente el 50% de las emisiones de dióxido de carbono provenientes de la fabricación de cemento se originan en la reacción química que convierte la piedra caliza (CaCO_3) en monóxido de calcio (CaO). Cerca del 40% se producen en la quema de combustibles fósiles de los hornos, un 5% en el transporte de los materiales y el otro 5% en la producción de electricidad (Batelle 2002, apud WBCSD-CSI-GEMR, 2012). En la actualidad los intentos por reducir las emisiones de dióxido de carbono se pueden clasificar en tres formas:

- Incrementando la eficiencia energética por optimización del proceso y modernización de las plantas cementeras.
- Sustituyendo el combustible proveniente de derivados del petróleo por otras fuentes de energía como biomasa o residuos de la agroindustria.
- Sustituyendo parte del clínker por adiciones como puzolanas, cenizas voladoras, escoria, ceniza de cáscara de arroz, etc. Estas adiciones descarbonatadas tienen propiedades hidráulicas vinculantes y pueden ser usadas para producir cementos con menor contenido de carbono.

Además existen proyectos de investigación para reducir las emisiones de dióxido de carbono intrínsecas asociadas con la producción de cemento por otros métodos. Son los llamados “low carbon cement” (LCC) y los “carbon capture and storage” (CCS), ambos mecanismos de más reciente abordaje (WBCSD-CSI-PRS, 2012).

Este trabajo está orientado a estudiar la posible reducción de emisiones de carbono producidas en la reacción química de fabricación del cemento sustituyendo parte del mismo por adiciones. Actualmente gran parte de la energía que se utiliza para el funcionamiento de los hornos (85%) no es renovable (ANCAP, 2012). El contar con hornos más eficientes y utilizar una mayor proporción de energías renovables, así como reducir el transporte está dentro de las políticas de los fabricantes, en este caso la empresa estatal ANCAP, y escapa al alcance de este trabajo.

Según se muestra en la figura 3 la industria latinoamericana del cemento tiene un comportamiento similar al resto del mundo alcanzando una tasa de reducción de emisiones de 17% entre 1990 y 2011, valor que equivale a la tasa de reducción obtenida a nivel mundial (FICEM, 2013).

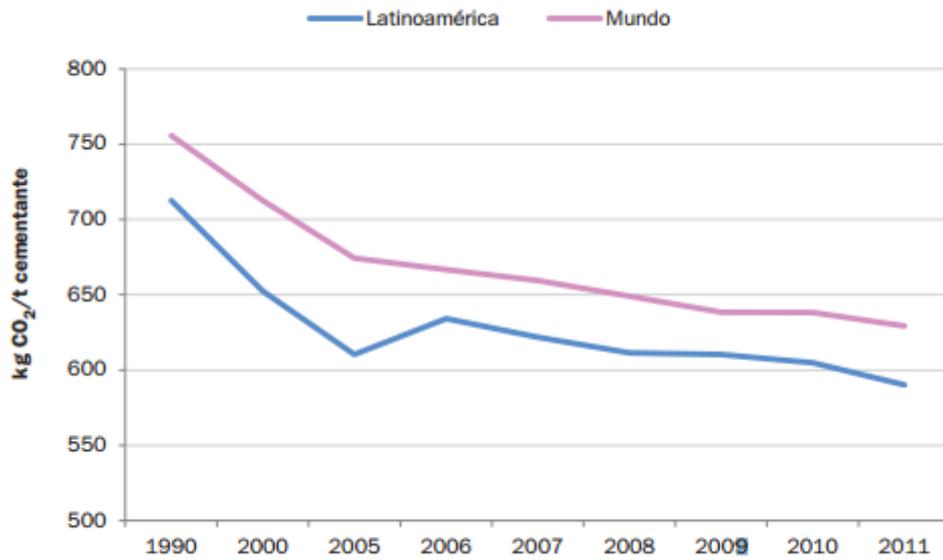


Figura 3 Emisiones netas específicas promedio de CO₂ por tonelada de producto cementante

(Fuente: FICEM, Informe Estadístico 2013)

La figura 4 muestra que el consumo de energía térmica para producir una tonelada de clínker en Latinoamérica en el 2011 superó ligeramente al promedio mundial en 1,7%.

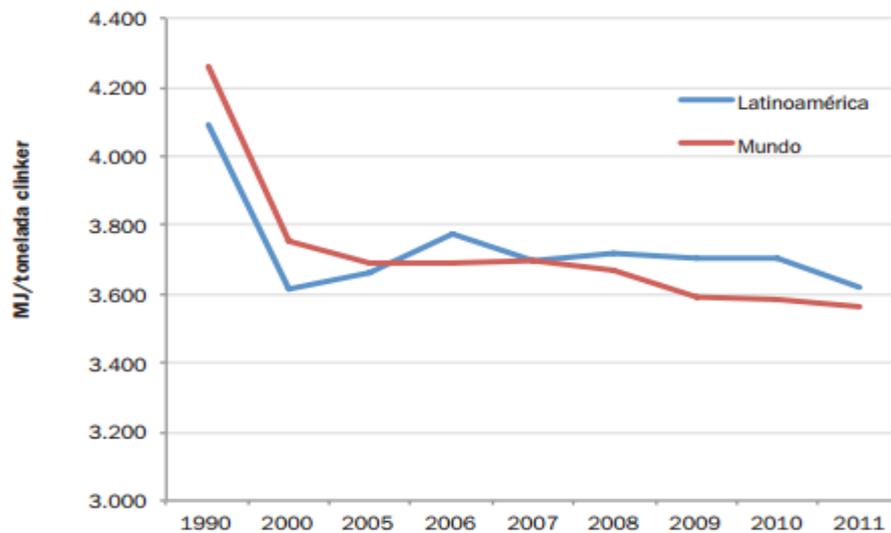


Figura 4 Consumo de energía térmica por tonelada de clínker

(Fuente: FICEM, Informe Estadístico 2013)

“Esta pequeña variación es debida a las diferencias de tecnologías, como un mayor uso de hornos secos con precalentador y sin precalcinador que son menos eficientes que aquellos que presentan precalcinador adicional” (FICEM, 2013). Sin embargo del análisis de los datos se observa que Latinoamérica ha entrado en el proceso de eficiencia energética al igual que los países industrializados.

2.1.3 Composición y clasificación

El cemento, como ya se explicó previamente, se fabrica con materiales provenientes de la naturaleza, principalmente piedra caliza y arcillas a los que se le agregan materiales correctivos y adiciones. Puede ser constituido solamente por clínker y sustancia reguladora de fraguado, lo que se denomina cemento normal o por adiciones minerales y aditivos que le mejoran ciertas propiedades y permiten utilizarlo en fines específicos. Cada país tiene sus especificaciones técnicas en cuanto a composición y proporciones de los materiales principales y minoritarios. También se deben cumplir ciertos requisitos físicos, mecánicos y químicos determinados por ensayos de referencia. En general es un compuesto producido con materiales locales y no existe una clasificación universal. En Uruguay la norma UNIT20: 2003 define 5 tipos de cementos de acuerdo a su composición. Ellos son el normal, con escoria, con filler, puzolánico y compuesto como se verá más adelante en 2.2.2.

2.1.4 Adiciones

Las adiciones pueden ser definidas como materiales utilizados conjuntamente con el cemento Portland con el objetivo de proporcionar un desempeño tecnológico diferenciado a productos cementicios (Cordeiro, 2006). Debido a consideraciones económicas y de durabilidad son sustitutos parciales del cemento Portland (Mehta y Monteiro, 2014). La siguiente tabla 2 muestra una clasificación de adiciones de acuerdo con el grado de reacción como puzolanas. La ceniza de cáscara de arroz, objeto de este estudio, está clasificada como una puzolana altamente reactiva.

Existe otra clasificación de materiales puzolánicos en relación a sus características genéticas en naturales y artificiales (Massazza, 1998 apud Cordeiro, 2006). Las puzolanas naturales son aquellas que no necesitan tratamiento para revelar o acentuar su carácter puzolánico a excepción del molido. Estas se encuentran en minerales como la arena, el cuarzo y la amatista como óxidos, mientras que en los granitos, feldespatos y mica se encuentran en estado de silicatos. Las puzolanas artificiales comprenden los materiales que necesitan modificaciones químicas y mineralógicas para exhibir actividad puzolánica. A modo de ejemplo se encuentran en este grupo los subproductos provenientes de actividades

industriales y agroindustriales como la ceniza volante, la sílice activa y la ceniza de cáscara de arroz.

TABLA 2 Clasificación de adiciones minerales para el hormigón

CLASIFICACION	ADICIONES MINERALES
Cementantes o Puzolánicos	Escoria granulada de alto horno (cementante) Ceniza volante con alto tenor de calcio (cem.y puz.)
Puzolanas altamente reactivas	Sílice activa o ceniza de cáscara de arroz
Puzolanas comunes	Ceniza volante con bajo tenor de calcio Materiales naturales
Puzolanas poco reactivas	Escoria de alto horno enfriada lentamente Ceniza de parrillero Escoria Ceniza de cáscara de arroz quemada en campo

(Fuente: Mehta y Monteiro, 2014)

La ceniza volante es un subproducto de la quema del carbón mineral en unidades industriales principalmente usinas termoeléctricas, mientras que la sílice activa es un subproducto del proceso de fabricación del sílice metálico o aleaciones férreo-silíceas en grandes hornos eléctricos a arco voltaico (Cordeiro, 2006, Mehta y Monteiro, 2014). La ceniza de cáscara de arroz proveniente de la quema controlada en hornos es altamente reactiva, no así la quemada en campo a cielo abierto (Cordeiro, 2006).

2.1.5 Cementos puzolánicos y compuestos

En un comienzo puzolana se le llamó a los materiales naturales de origen volcánico que reaccionan con cal en presencia de agua y temperatura ambiente, pero hoy en día el término se refiere también a materiales que teniendo un origen diverso presentan un comportamiento similar. Se considera puzolánico todo material inorgánico, natural o artificial, silíceo o aluminio- silíceo que por sí solo no presenta actividad hidráulica pero cuando es finamente dividido en presencia de agua reacciona con hidróxido de calcio a temperatura ambiente (ACI-116, 2002). La actividad puzolánica se manifiesta cuando los compuestos químicamente activos de la adición mineral reaccionan con el hidróxido de calcio producido

por la hidratación de los silicatos del cemento Portland formando así nuevos productos hidratados. El hidróxido de calcio contribuye muy poco para la resistencia de la pasta de cemento y es el primero en ser disuelto en agua (Neville, 1997 apud Cordeiro, 2006) dejando huecos y disminuyendo la resistencia de morteros y hormigones. Por lo tanto la gran ventaja que presentan los materiales silíceos finamente pulverizados como la puzolana es que al combinarse con el cemento reaccionan con el hidróxido de calcio libre y forman compuestos hidráulicos que disminuyen la porosidad y aumentan la compacidad de las mezclas.

El uso de cementos puzolánicos está desarrollado a nivel mundial debido a las múltiples ventajas que ofrecen con respecto a los cementos comunes. Estas ventajas están relacionadas con la mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad, los beneficios económicos por el menor costo de las puzolanas en relación al cemento y los beneficios ambientales originados en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono a raíz de un menor uso de materiales y combustibles (Rodríguez, 2010). Dentro de la región, tanto en Argentina como en Brasil, se producen cementos puzolánicos recomendables para usos específicos. Un ejemplo en Argentina es el cemento puzolánico CP40 (ARS) altamente resistente a los sulfatos, muy recomendable para estructuras en contacto con el agua o suelos o ambientes con contenido alto de sulfatos. En Brasil el CP IV: Cemento Portland puzolánico tiene de un 15% a 50% de puzolana y dada su gran resistencia e impermeabilidad se utiliza en obras expuestas a la acción del agua en corrientes y agentes agresivos. También es apto para obras con uso masivo de cemento, debido a que posee un bajo calor de hidratación. Como contrapartida estos cementos requieren una mayor cantidad de agua para su hidratación, fenómeno que reduce la resistencia inicial del hormigón especialmente cuando se reemplazan grandes proporciones de cemento (Naik et al, 2001). Según el ACI-116, 2002, los cementos compuestos son cementos hidráulicos que consisten esencialmente en la mezcla íntima y uniforme de un número de diferentes materiales constituyentes. Son producidos por la molienda conjunta del clínker con otras adiciones o por la mezcla del cemento Portland con adiciones o por una combinación de ambos procedimientos. Estas adiciones pueden ser dos o tres componentes tales como: ceniza volante, escoria de alto horno, humo de sílice, ceniza de cáscara de arroz, filler calcáreo, etc. Los diferentes materiales constituyentes de los cementos compuestos contribuyen a mejorar las propiedades a corto, mediano y largo plazo. Como se vio en los cementos puzolánicos a mayor sustitución del cemento por puzolana la demanda de agua también es mayor y por lo tanto menor la resistencia inicial. El filler calcáreo tiene la virtud de aumentar la hidratación inicial induciendo una resistencia inicial alta y se complementa con el efecto de la puzolana que mejora la resistencia a mediano y largo plazo (Menéndez et al, 2003).

Una selección adecuada de adiciones, proporciones de la mezcla y técnicas de curado hace que estos cementos compuestos no solo puedan mejorar las propiedades de durabilidad del hormigón sino que también tengan ventajas económicas y ambientales al reducir la proporción de cemento y emisiones de dióxido de carbono (Menéndez et al., 2003).

2.2 PRODUCCION DE CEMENTO EN URUGUAY

Si bien el subsuelo uruguayo no permite desarrollar industrias independientes debido a la carencia de algunos minerales, la industria del cemento es una excepción, donde casi el 100% de las materias primas consumidas son nacionales, siendo el combustible el principal producto importado (ANCAP, 2013). El proceso de elaboración del cemento tiene varias etapas y comienza con la extracción de la piedra caliza de las canteras mediante el uso de explosivos. Ver figura 5.



Figura 5 Extracción de piedra caliza y carga en camiones
(Fuente: Memoria anual de ANCAP, 2011)

Luego se fracciona y transporta en camiones hasta la trituradora primaria donde se reduce el tamaño de las piedras hasta un máximo de 25 cm. Una vez fraccionado se le agregan las adiciones para lograr una prehomogeneización del crudo en seco y mediante cintas transportadoras llega a los silos de piedra donde se dosifica. A partir de allí el material

ingresa en los molinos de crudo. Tanto el molido como la homogeneización se realiza por vía seca, con el consiguiente ahorro de energía. Previo a entrar al horno el material se calienta a 750°C, usando para ello el calor que emana del mismo horno. Este mecanismo se denomina precalcínación y tiene como objetivo acortar el recorrido dentro del horno, para alcanzar en menos tiempo la temperatura de calcínación (1400°C) a la vez que ahorrar combustible. “En las etapas de quema y enfriamiento ocurren, respectivamente, reacciones de estado sólido entre las fases constituyentes del clínker y transformaciones mineralógicas que determinan la composición final del cemento” (Cordeiro, 2006; Mehta y Monteiro, 2014). Cuando la molienda final se realiza en forma conjunta con el yeso y las demás adiciones (planta de Minas), éstas se agregan previamente en los silos. El proceso culmina con su almacenamiento y expedición. La figura 6 es un fluxograma del proceso productivo de la planta de Minas.

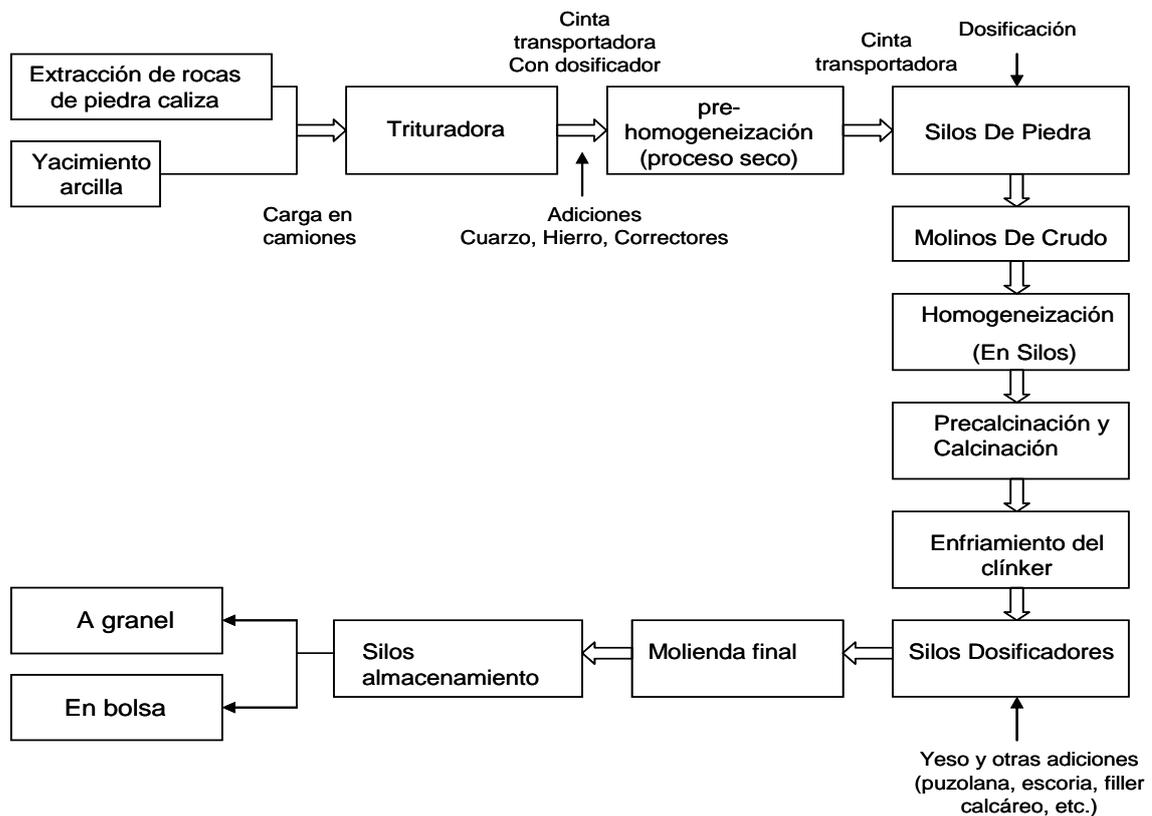


Figura 6 Fluxograma de producción de cemento Portland con adiciones por molienda conjunta en planta Minas (Fuente: Elaboración propia)

En la actualidad se están realizando obras de modernización y ampliación de la capacidad de la planta de Minas. Esta obra comprende la instalación de una nueva línea semiseca

para la producción de clínker la cual incluye la ejecución de un nuevo horno, un enfriador, la torre de precalentamiento, el calcinador y un nuevo filtro eléctrico que permitirá ampliar la capacidad de la planta a 1.000 ton/día de clínker (Teyma, 2014).

También se construirá una planta cementera completa, Cielo Azul, para la utilización de coke y carbón mineral como combustibles principales, y se realizarán modificaciones en la planta existente (molinos de crudo, alimentación de pasta y servicios) que seguirá en servicio (Teyma, 2014).

En la siguiente figura 7 se grafica la producción de cemento en las plantas de Minas y Paysandú, ambas propiedad de ANCAP, mediante diagrama de barras. Se aprecia claramente que hubo una baja en la producción de ambas plantas en el año 2003 probablemente ocasionada por la crisis económica que sufrió el país en el año 2002. La tabla 3 expresa las cifras exactas en toneladas durante el período 2003 a 2012. En la planta de Minas se obtuvo el máximo de producción en el 2012, con 249.188 toneladas, en tanto Paysandú alcanzó su máximo en 2004 con 211.714 toneladas.

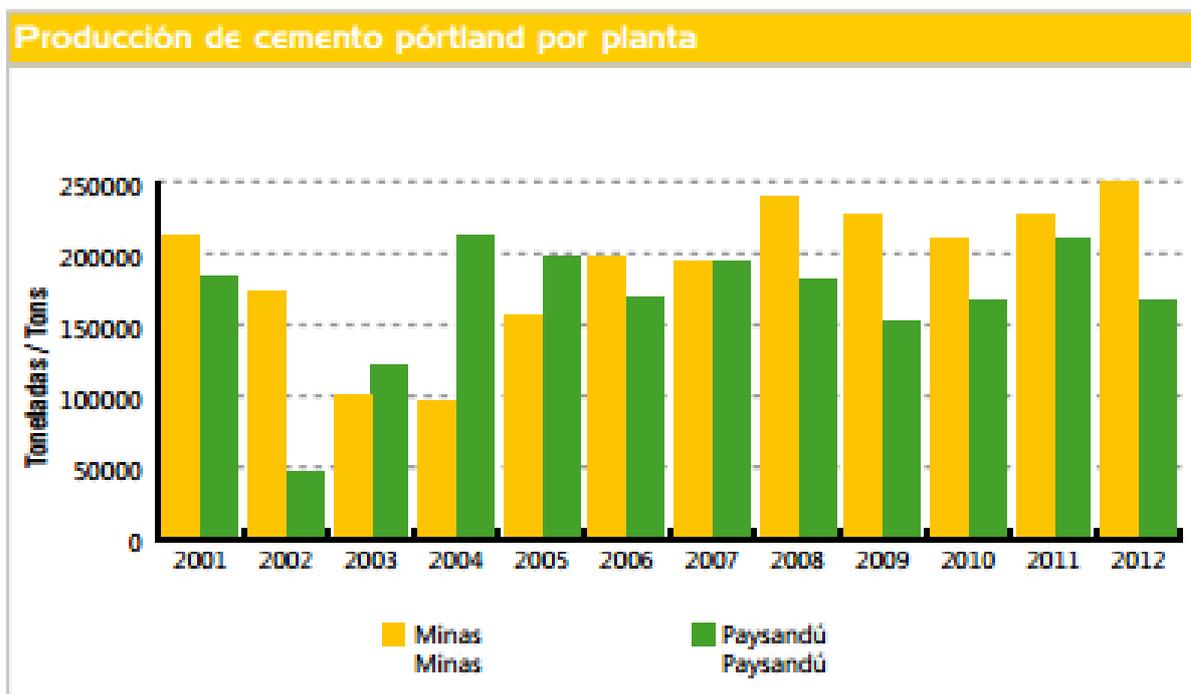


Figura 7 Producción de cemento Portland por planta, 2001-2012
(Fuente: Memoria anual de ANCAP, 2012)

TABLA 3 Producción de cemento Portland por planta, 2003-2012 (en toneladas)

Producción de cementos Pórtland por Planta (t)										
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Minas	101.144	97.172	156.001	198.080	193.682	239.627	226.490	211.309	227.874	249.188
Paysandú	119.763	211.714	196.995	167.636	192.215	181.728	152.646	167.006	209.004	167.244

(Fuente: Memoria anual de ANCAP, 2012)

La tabla 4 grafica el total de la producción de cemento en las plantas de ANCAP (Minas y Paysandú). La producción anual de clínker durante 2012, en Uruguay se puede apreciar en la tabla 5.

TABLA 4 Producción total de cemento Portland 2012 (en toneladas)

PLANTA MINAS	249.188
PLANTA PAYSANDU	167.244
TOTAL	416.432

(Fuente: Memoria anual de ANCAP, 2012)

TABLA 5 Producción de clínker (en toneladas)

Producción de Clinker (t)										
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Minas	120.049	102.363	139.692	168.244	161.530	179.802	150.247	123.534	130.581	135.940
Paysandú	106.617	175.887	179.443	159.005	173.747	137.464	150.578	151.337	180.748	147.411
Total	226.666	278.250	319.135	327.249	335.277	317.266	300.825	274.871	311.329	283.351

(Fuente: Memoria anual de ANCAP, 2012)

Mientras que la producción de cementos en Planta Minas alcanzó las 249.188 toneladas correspondientes al 99% de la capacidad instalada, la producción de clínker fue de 135.940 toneladas. Para compensar la menor producción propia de clínker y poder cumplir con la demanda interna de cemento se compró una parte a Cementos Artigas.

De acuerdo con la tabla 6 en la planta de Minas durante el 2012 se continuó con el proceso de sustitución de fuel oil por combustibles alternativos. Los combustibles alternativos

sustituyeron aproximadamente el 15% de la energía total empleada en los hornos de clinkerización, generando la consecuente reducción de costos. (ANCAP, 2012). Por lo tanto vemos que Uruguay al igual que el resto de países de America Latina si bien están produciendo mayores cantidades de cemento que en años anteriores (Tabla 1) ese aumento no implica un incremento proporcional en las emisiones de dióxido de carbono, ya que parte de la energía utilizada en el proceso proviene de fuentes renovables o menos contaminantes.

TABLA 6 Uso de combustibles para elaboración de cemento Pórtland

Planta Minas	
FUEL OIL	15.967 m3
CÁSCARA DE ARROZ	6.368 ton
ACEITE	275 m3
GAS OIL fuera de especificación	47 m3
RESIDUOS DE FONDO DE TANQUE DE LA TEJA	771 m3

(Fuente: Memoria anual de ANCAP, 2012)

Para el proceso productivo, se utilizaron 15.967 m3 de fuel oil y adicionalmente, se consumieron los combustibles alternativos que se muestran en la tabla 6. Sin embargo para estudiar las emisiones no se considerará el dato del fuel oil aportado por la Tabla 6, debido a que parte del clinker utilizado se compró a la empresa Cementos Artigas, según se mencionó anteriormente. Se considerará en cambio el total de cemento producido en la planta de Minas durante el año 2012 (Tabla 4).

Por otra parte en la planta de fabricación de Minas se adoptó el método de precalcación del crudo. Este procedimiento utiliza el calor proveniente de los hornos de calcinación para pre-calentar la mezcla cruda antes de ingresar a ellos. De esta forma se disminuye el tiempo de exposición a altas temperaturas (1400°C) con el consiguiente ahorro de energía.

En 2012 el volumen del mercado de cemento se incrementó 4,7% con respecto al año anterior, alcanzando su máximo histórico desde 2001 a 2012. Se vendieron 416.509 toneladas en el mercado interno y se exportaron 5.446 toneladas a Argentina exclusivamente, lo cual representó un 1,3%. En la siguiente figura 8 se muestra que a partir de 2003 el consumo interno viene creciendo año a año, no así las exportaciones, que comenzaron a decrecer en 2008. Dentro de las políticas actuales de ANCAP se destaca la construcción de una nueva planta de cal inaugurada en 2013 y otra de cemento en vías de

ejecución, ambas en Treinta y Tres. Se pretende ampliar la capacidad productiva a fin de exportar aproximadamente 750.0000 toneladas anuales a la región sur de Brasil (ANCAP, 2012). Este fenómeno casi triplicará la producción actual, y si bien se apuesta a utilizar combustible proveniente de fuentes renovables, las emisiones de dióxido de carbono asociadas a los procesos productivos también se verán fuertemente incrementadas.

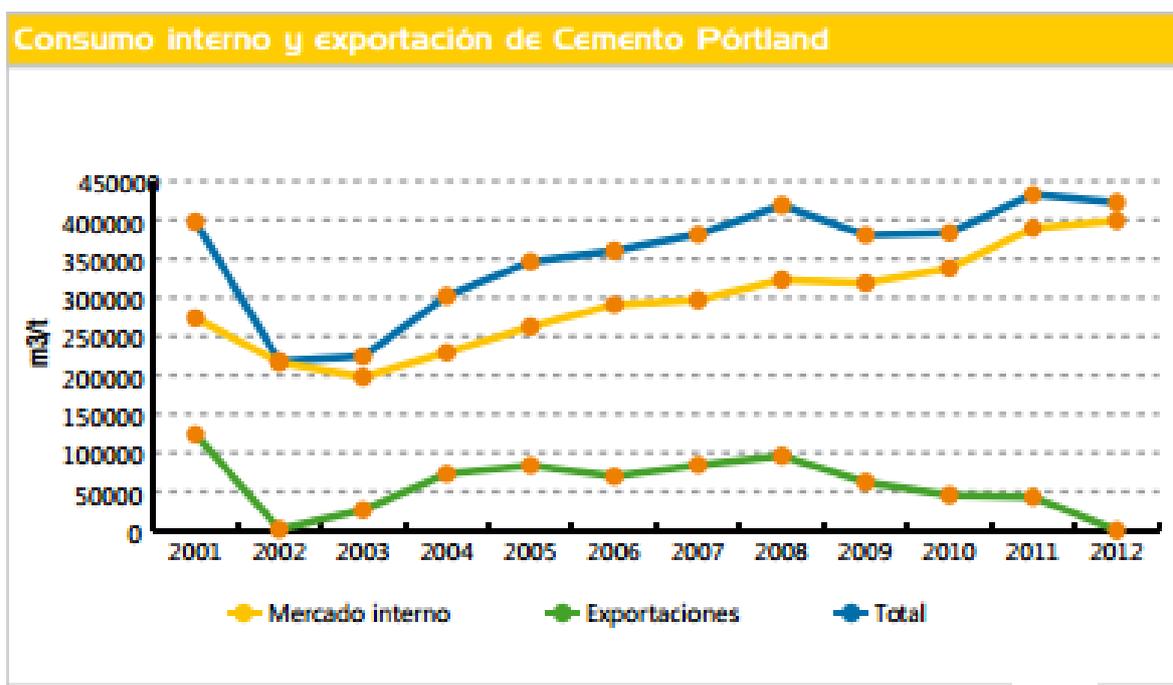


Figura 8 Consumo interno y exportación de cemento Portland, 2001-2012
(Fuente: Memoria anual de ANCAP, 2012)

TABLA 7 Ventas al mercado interno y exportación de cementos Portland en toneladas

Ventas mercado interno y exportación de cementos Pórtland (en toneladas)										
ANCAP	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Mercado Interno	197.716	229.042	262.399	290.621	296.944	322.406	318.375	337.588	397.668	416.509
Exportaciones	26.425	72.882	83.581	69.449	84.204	96.091	61.984	45.578	34.772	5.446
TOTAL	224.141	301.924	345.980	360.070	381.148	418.497	380.359	383.166	432.440	421.955

(Fuente: Memoria anual de ANCAP, 2012)

2.2.1 Norma UNIT 20: 2003

La norma UNIT 20:2003 define al cemento Portland como un conglomerante hidráulico constituido por clínker Portland y demás componentes en proporciones definidas, molidos en conjunto o por separado en planta de cemento o dependencias. Se le adiciona sulfato de calcio como regulador de fraguado y eventualmente aditivos.

Según esta norma el cemento está compuesto por componentes principales, siendo éstos materiales inorgánicos usados en proporción mayor a 5% en masa con respecto a la suma de todos los componentes principales y minoritarios, los cuales se diferencian de los primeros en su proporción en masa que es igual o inferior al 5%. Dentro de los componentes principales se encuentran el clínker, constituido por no menos de 2/3 de silicatos de calcio y el resto combinaciones de óxido de aluminio, óxido férrico y otros. Otros componentes principales pueden ser la escoria granulada de alto horno, los materiales puzolánicos, las puzolanas naturales o industriales y el filler calcáreo. Los componentes minoritarios muchas veces son materiales minerales derivados del proceso de fabricación del clínker especialmente seleccionados y correctamente preparados. Esto significa que deberán ser seleccionados, homogeneizados, secados y pulverizados en función de su estado de producción y suministro. Otras veces simplemente corresponden a impurezas asociadas con la materia prima como la piedra de yeso o algez.

“El regulador de fraguado puede ser yeso (sulfato de calcio dihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), anhidrita (sulfato de calcio anhidro CaSO_4) o cualquier mezcla de ellos.” (UNIT 20:2003).

Los aditivos son usados para mejorar la fabricación o las propiedades de los cementos y su cantidad total no debe superar el 1% en masa de cemento. Un ejemplo son los agentes de molienda.

2.2.2 Clasificación

La siguiente tabla 8, (UNIT 20:2003) clasifica los diferentes tipos de cementos de acuerdo con su composición y porcentaje de componentes principales y minoritarios. El CPC, objeto de este estudio estará compuesto por filler calcáreo y puzolana, por lo cual según la norma se denomina cemento compuesto. Puede tener en su composición desde un 10 a un 35% de otros componentes principales, además del clínker.

Según la Norma UNIT 20:2003 las puzolanas deben constar esencialmente de sílice reactiva SiO_2 no menor al 25% en masa y alúmina Al_2O_3 . Se distinguen puzolanas naturales de artificiales. Las naturales “son sustancias de origen volcánico o bien rocas sedimentarias con una composición química y mineralógica apropiada” y las artificiales “son arcilla o esquistos tratados y activados térmicamente, escorias de plomo, cobre, zinc enfriado al aire y otros productos de la industria de las ferro-aleaciones.

El Filler calcáreo es “un material de naturaleza inorgánica y origen mineral carbonatado, compuesto en su mayor parte por carbonato de calcio, que afecta favorablemente las propiedades físicas de los hormigones, morteros y pastas de cemento, frescos y

endurecidos”, (UNIT 20:2003). La incorporación de filler calcáreo mejora la trabajabilidad, aumenta la retención de agua y disminuye la fisuración. La dureza de la piedra calcárea en la escala de Mohs es de 1.8 a 3, mientras que la del clínker es 5,5. Esto significa que al incorporarse al final del proceso no va a requerir un mayor tiempo de molienda.

TABLA 8 Tipos de cemento y composición

TIPO DE CEMENTO	DESIGNACIÓN	Composición (g/100g)				
		Componentes principales				Componentes Minoritarios
		Clínker	Puzolana (P)	Escoria (E)	Filler Calcáreo (F)	
Cemento pórtland normal	CPN	100-95				0-5
Cemento pórtland con filler calcáreo	CPF	94-80			6-20	0-5
Cemento pórtland puzolánico	CPP	85-50	15-50			0-5
Cemento pórtland con escoria	CPE	94-65		6-35		0-5
Cemento pórtland compuesto	CPC	94-65	Dos o tres componentes Con P +E+F entre 10y 35%			0-5

(Fuente: UNIT 20: 2003)

En la siguiente tabla 9 se presentan los requisitos mecánicos que deben cumplir los cementos a la vez que la norma de referencia para realizar el ensayo.

TABLA 9 Requisitos mecánicos (UNIT20:2003)

Categoría	Resistencia a la compresión (Mpa)				Ensayos de referencia
	2 DIAS	7 DIAS	28 DIAS		
CP 30		Mín. 16	Mín. 30	Máx. 50	UNIT-ISO 679:2009
CP40	Mín. 10		Mín. 40	Máx. 60	
CP 50	Mín. 20		Mín. 50		

(Fuente: UNIT 20: 2003)

En todos los casos, los valores de la resistencia obtenidos a los 28 días deberán ser mayores que los valores obtenidos a los 2 y 7 días. La norma UNIT 20:2003 también establece los requisitos físicos y químicos que deben cumplir los diferentes tipos de CPC así como el método de ensayo (ver tablas 10 y 11). Las muestras seleccionadas para ser estudiadas en esta tesis cumplen tanto con los requisitos mecánicos como con los físicos y químicos.

TABLA 10 Requisitos físicos para CPC (UNIT 20:2003)

Físicos	Método de ensayo	Requisito
Finura: Superficie Específica	UNIT-NM 76	Mínimo 250 m ² /kg
Constancia de vol.: Expans. en autoclave	UNIT 514	Máximo 0,90%
Tiempo de fraguado: Inicial Final	UNIT-NM 65	Mínimo 45 min Máximo 10 hrs.

(Fuente: UNIT 20: 2003)

TABLA 11 Requisitos químicos para CPC (UNIT 20:2003)

Químicos	Método de ensayo	Requisito
Trióxido de azufre	UNIT-NM 16	Máximo 3,5
Cloruros	UNIT 1013	Máximo 0,10 g/100 g
Sulfuros	UNIT-NM 19	Máximo 0,50 g/100 g

(Fuente: UNIT 20: 2003)

3 CENIZA DE CASCARA DE ARROZ (CCA)

3.1 CONSIDERACIONES SOBRE LA CASCARA DE ARROZ

En el año 2014 se produjeron mundialmente 741,3 millones de toneladas de arroz (FAO, 2015). Se produjo un pequeño descenso estacional debido a efectos de un fenómeno meteorológico. La figura 9 muestra un incremento sostenido de la producción mundial de este cereal y debido a la gran cantidad de residuo que genera su destino final es un gran problema para los países arroceros. Para 2015 se prevé un aumento de producción de arroz a 749,8 millones de toneladas (499,9 millones de toneladas de arroz elaborado), o sea 8 millones de toneladas, más que en 2014. La figura 9 muestra el crecimiento de la producción mundial desde 2006 a 2015, así como los millones de hectáreas plantadas. Cada cinco toneladas de arroz producidas, una tonelada es cáscara (Rodríguez, 2000; Mehta, 1992), por lo tanto en 2012 se produjeron mundialmente alrededor de 146 millones de toneladas de cáscara.

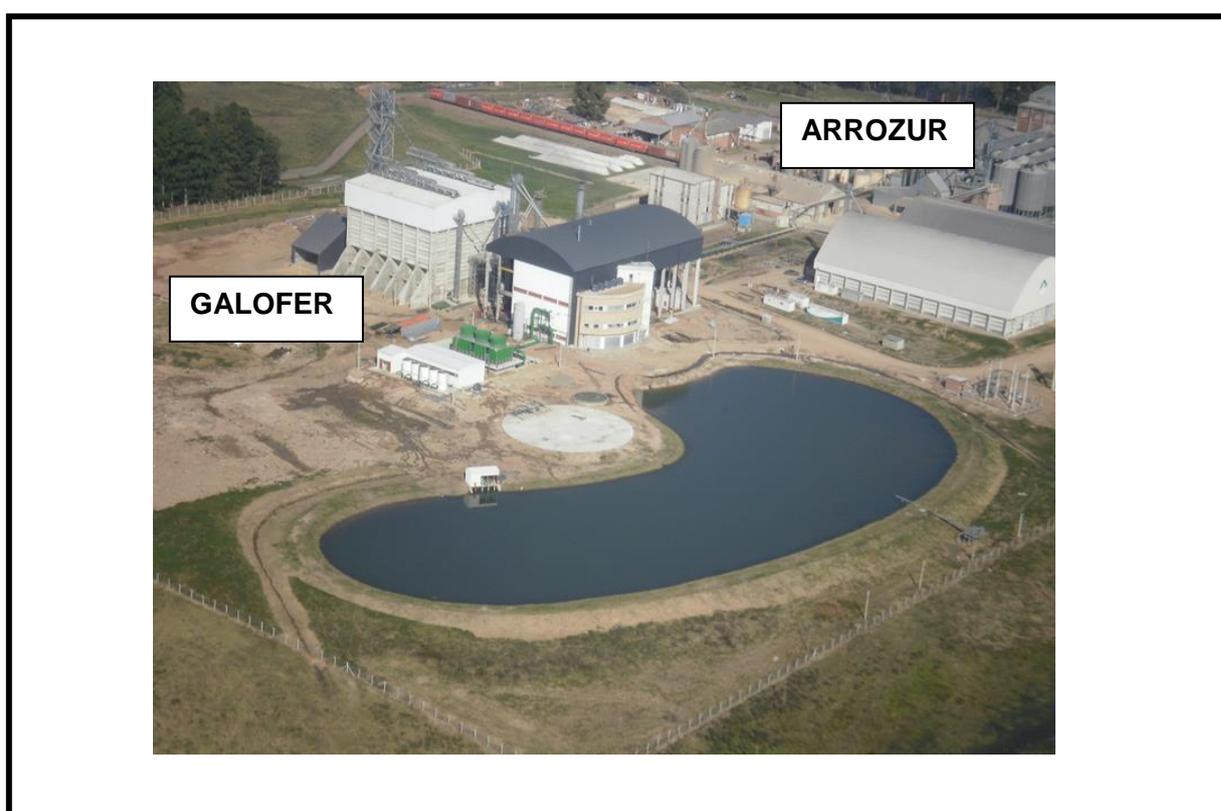


Figura 9 Producción y superficie mundiales de arroz en cáscara
(Fuente: FAO, 2015)

La manera más usual de reducir el volumen de la cáscara es mediante la quema a cielo abierto. Mediante este procedimiento se obtiene la ceniza que tiene el inconveniente de polucionar el aire, el suelo y los manantiales acuíferos y por lo tanto ser perjudicial para la salud. Debido a esta razón la quema está prohibida en varios países (Rodríguez, 2000).

En Uruguay la producción de arroz ha aumentado de 618.708 toneladas en la zafra 1991-92 a 1.348.301 toneladas en la zafra 2013-2014 (ACA, 2015), lo que implica que en veintidós años el producto se incrementó en un 118% y sólo en esta última zafra se generaron 269.660 toneladas de cáscara. La mayor parte (95%) es destinado a la exportación (ACA, 2015) y se prevé que el consumo mundial seguirá creciendo (FAO, 2015). Como se mencionó anteriormente, gran parte de su cáscara se quema obteniendo energía para las calderas de secado del propio arroz. La empresa Galofer S.A. surgió con el objetivo de darle valor a la cáscara de arroz introduciendo un nuevo producto renovable en el mercado energético, apto para la generación de energía eléctrica (Martínez, 2010). Otra aplicación es utilizarla como combustible para la producción de cemento Portland en sustitución del fuel oil, tal como se vio en el capítulo anterior en la planta de ANCAP de Minas. Sin embargo en 2012 sólo 6368 toneladas de cáscara fueron empleadas para tales fines (ANCAP, 2012). Por cada tonelada de arroz que se quema se obtienen 200 kg de ceniza de cáscara de arroz, lo que equivale a un 20% en peso de la cáscara de arroz que la originó (Juliano, 1985). Durante el proceso de quema se volatilizan los componentes orgánicos de la cáscara: celulosa y lignina, quedando como remanente residual la ceniza, la cual acarrea el problema de su disposición final. “El crecimiento de la producción agrícola e industrial en el mundo trae como contrapartida el incremento de residuos, y hace cada vez más difícil, costoso y ambientalmente poco sustentable su tratamiento y destino final” (Behak et al, 2008). En países como Uruguay donde la producción de arroz crece en forma continua es de gran relevancia encontrarle un destino final a dicha ceniza. La ceniza de cáscara de arroz (CCA) es una puzolana artificial que se la puede adicionar al cemento reduciendo los costos de producción (Massazza, 1993). Además, su empleo como material puzolánico permite mejorar las características de morteros y hormigones y mitigar la polución del ambiente (Santos, 1997, apud Rodríguez, 2000). Estos residuos también se pueden ver como una oportunidad de generar valor y reducir las cargas ambientales .“En lo que refiere a los residuos agrícolas el principal potencial se encuentra en el procesamiento de la cáscara de arroz” (Uruguay XXI, 2014). Actualmente existe sólo un emprendimiento de procesamiento del residuo con el fin de generar energía eléctrica, liderado por la empresa Galofer S.A. y existiría disponibilidad para instalar otro proyecto con capacidad de procesamiento de aproximadamente 40.000 toneladas de cáscara de arroz en la conjunción de Artigas y Salto lo cual significaría una potencia de cerca de 5 MW. De esta forma, no sólo se genera energía eléctrica para abastecer a la red del país, sino que a la vez se reducen las emisiones de metano que se producen cuando estos desechos quedan en canteras a cielo abierto. La empresa ETR-Fenirol se instaló en el departamento de Tacuarembó con miras a generar

energía eléctrica a partir de los residuos de la industria maderera, por hallarse allí uno de los principales centros forestales. Si bien en un comienzo se pensó que iba a quemar también cáscara de arroz, por el momento está abocada exclusivamente a la quema de residuos forestales. Galofer S.A. fue fundado por un grupo de empresas productoras y procesadoras de arroz de Uruguay, denominado Arroz Uruguayo S. A. (ARROZUR). Se ubica geográficamente en la localidad de Villa Sara en el departamento de Treinta y Tres, contiguo a la planta de Arrozur. Su ubicación estratégica en el centro de la región arrocera no solo le permite minimizar costos económicos y ambientales provenientes del transporte sino que también le permitió construir infraestructura para vincular ambas plantas. Ver figura 10. Cabe observar que Arrozur utiliza cáscara de arroz para generar vapor y emplearlo para realizar el parboilizado del arroz; fue la primera empresa en Uruguay en emplear la cáscara de arroz para un proceso industrial de escala relativamente grande para la época en que se instaló (1996).



**Figura 10 Galofer. Planta productora de energía a partir de la cáscara de arroz
(Fuente: <http://www.probio.gub.uy/cms/index.php/generacion/plantas-de-operación>)**

En la figura 11 se aprecia que Galofer tiene como único insumo el proveniente de la cáscara de arroz de los molinos arroceros.



Figura 11 Galofer, esquema de generación de energía.

(Fuente: <http://www.probio.gub.uy/cms/index.php/generacion/plantas-de-operación>)

El objetivo de la empresa es producir vapor y energía eléctrica a partir de la cáscara de arroz, un subproducto sin valor y con problemas de disposición final. El vapor generado es utilizado para la producción de arroz parboiled en Arrozur mientras que la energía eléctrica es utilizada en parte por la planta de Arrozur y el remanente se vende a UTE. Entre 2010 y 2012 lo vendido a UTE se multiplicó por 7 veces, según los datos de la tabla 12.

TABLA 12 Energía entregada a la red en el período 2010-2012

Energía entregada a la red en MWH	
2010	11.140
2011	33.542
2012	77.990

(Fuente: <http://www.probio.gub.uy/cms/index.php/generacion/plantas-de-operación>)

3.2 CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN DE LA CCA

Las adiciones minerales de cemento y hormigones se clasifican de acuerdo con su actividad puzolánica (RILEM, 1998). Dentro de las altamente puzolánicas se encuentra la sílice activa o humo de sílice y la ceniza de cáscara de arroz producida por combustión controlada. La sílice activa es un subproducto industrial inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura que se originan en la reducción de cuarzo con carbón durante los procesos de

obtención de silicio metal y ferro silíceo en hornos eléctricos de arco. Debido a su finura extrema y alto contenido de sílice amorfa el humo de sílice produce efectos físicos de lubricación, filler y puzolánicos muy importantes en los hormigones (Nguyen et al. 2011). Sin embargo la ausencia de este producto en Uruguay y su alto costo de importación limita sus aplicaciones. La ceniza de cáscara de arroz, en cambio, es un desecho de la industria arrocera del Uruguay y si se produce en condiciones controladas es altamente puzolánica, con un porcentaje de sílice amorfa del 90 a 96%. En un comienzo la ceniza de cáscara de arroz se quemaba de forma no controlada a una temperatura de entre 300 y 450° C a cielo abierto. Además del inconveniente de la contaminación ambiental ya mencionada, las bajas temperaturas no permitían la combustión total de la cáscara y en la ceniza permanecía un alto contenido de carbón sin quemar. Era esperable que un contenido de carbón superior al 30% produjera un efecto adverso en las reacciones puzolánicas de la CCA (Ganesan et al. 2008).

La siguiente figura 12 muestra las temperaturas y tiempos necesarios para obtener una CCA microporosa y con estructura celular. La superficie comprendida entre las curvas encierra las condiciones óptimas. Por el contrario la ceniza producida a temperaturas entre 550 y 700° C durante una hora de incineración transforma la sílice en fase amorfa.

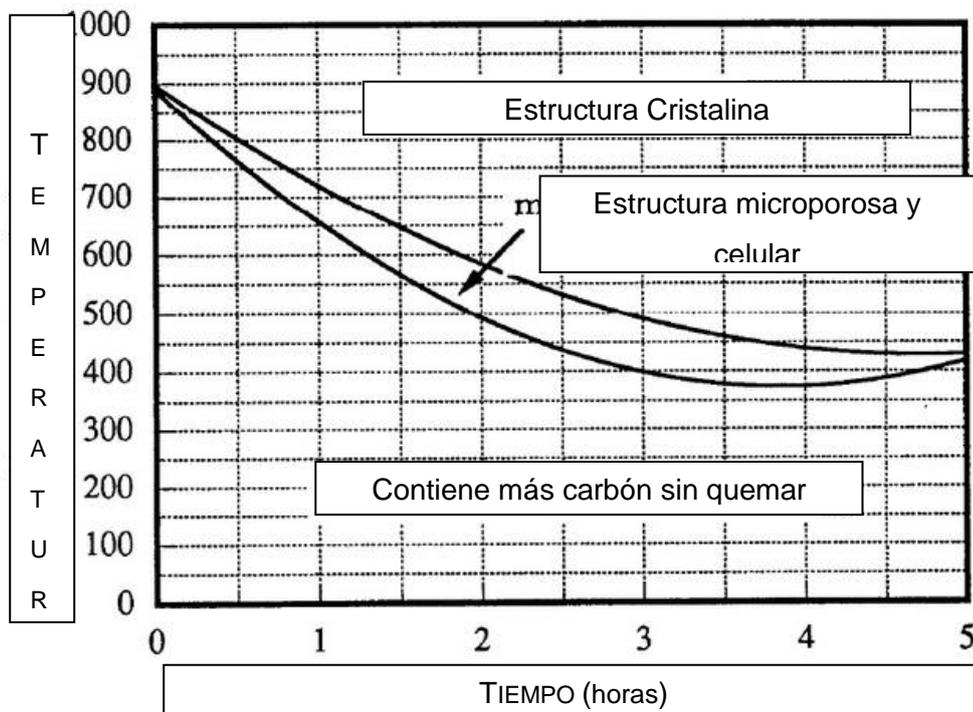


Figura 12 Curva de condiciones óptimas de incineración para obtener una CCA reactiva y celular

(Fuente: Huang et al. 2010)

Luego se pulveriza o muele con la finesa adecuada y se mezcla con el cemento para producir cementos compuestos. Al incorporarse al cemento se afecta la relación y el alcance de la hidratación (Nguyen et al. 2011).

Si la ceniza es quemada a temperaturas muy altas o por tiempos muy extendidos, el contenido de sílice va a presentar una estructura cristalina. Si por el contrario se quema a bajas temperaturas o durante un reducido período de tiempo la CCA tendrá un alto contenido de carbono no quemado.

Por lo tanto los parámetros que influyen en la superficie de la CCA son la temperatura, el tiempo de combustión y el tratamiento de la cáscara antes de quemarla (James et al., 1986 apud Nair et al., 2006).

La ceniza usada en este estudio proviene de las empresas Galofer y Arrozur, las cuales procesan 15 y 85 toneladas diarias actualmente. La CCA llega al laboratorio (IEM) en estado húmedo. Allí se seca hasta obtener un peso constante, se pasa por un tamiz de 1.18 mm y se descarta el material retenido en éste. Luego se muele durante 30 minutos para obtener el tamaño medio requerido en la aplicación para cemento (Mehta, 1994). El tamaño medio de las partículas de CCA se obtiene por difracción de luz láser con equipo Coulter LS 230 en el Laboratorio de Biofarmacia y Tecnología Farmacéutica (BIOTEFA). Mediante la molienda se busca homogeneizar su tamaño, el cual presenta una distribución muy amplia entre 0.4 y 2000µm con el 95% de las partículas por encima de 40µm antes de las transformaciones. Luego de las transformaciones aplicadas las partículas alcanzan una distribución más estrecha con una dimensión media menor que 10µm.

Según Rodríguez (2013),

“Los resultados alcanzados con las CCA residuales luego de las transformaciones muestran beneficios obtenidos en la densidad absoluta, pérdida por calcinación e Índice de Actividad Puzolánica (IAP) en relación a los valores antes de las transformaciones, no habiendo alteración de la composición química ni de los difractogramas de las CCA estudiadas”.

Por lo tanto se concluye que las transformaciones realizadas en las CCA son indispensables para alcanzar el IAP requerido en la Norma UNIT 1035:98, no pudiendo ser utilizadas sin haberles realizado dichas transformaciones.

3.3 DISPOSICIÓN FINAL

Como ya se mencionó en el punto anterior, las empresas Galofer y Arrozur procesan respectivamente 15 y 85 toneladas diarias de ceniza de cáscara de arroz, según información brindada verbalmente por el ingeniero J. Martínez en diciembre de 2013. Para minimizar el impacto ambiental siempre es más conveniente revalorizar o reciclar el residuo antes de

depositarlo. Actualmente, la ceniza de cáscara de arroz no tiene un uso alternativo. El residuo del proceso agroenergético generado por esas dos empresas es de 100 ton/día, lo que equivale a 36.000 ton/año de CCA (Rodríguez, 2014).

Al no tener un destino las CCA se depositan en canteras, tal como se muestra en la figura 13.

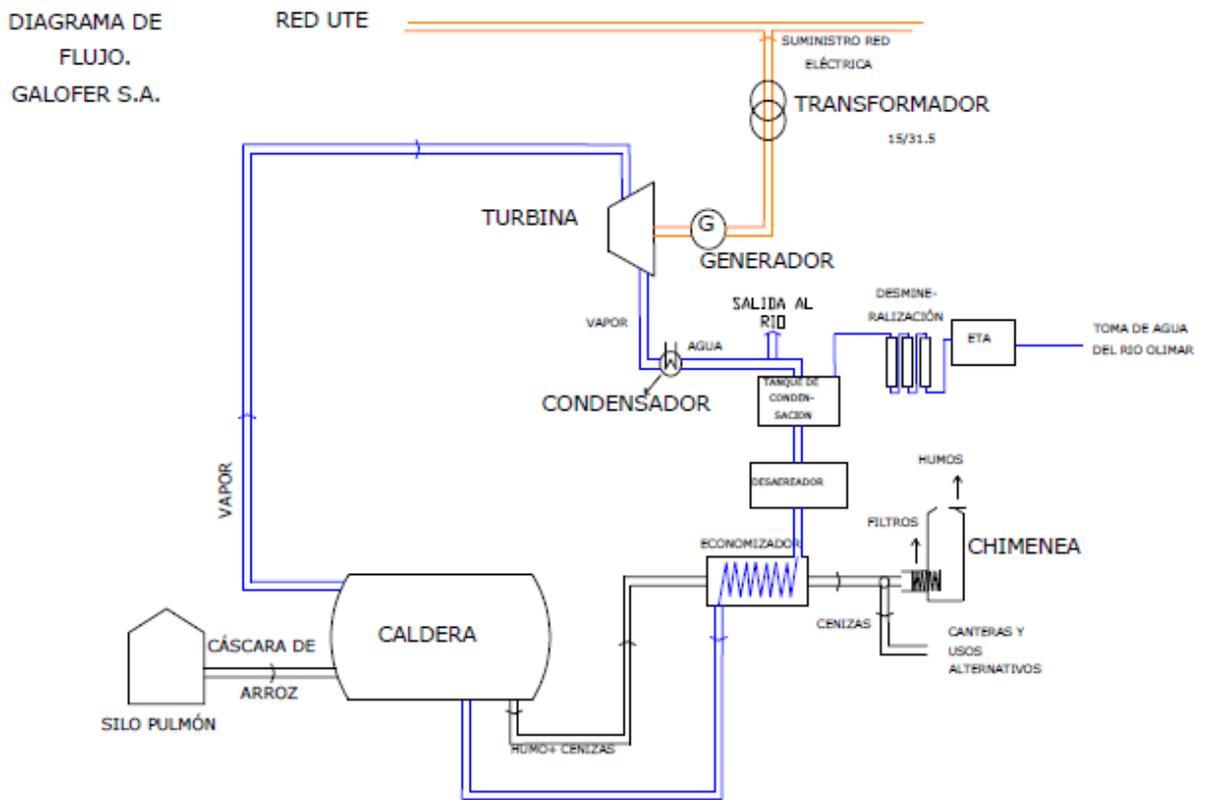


Figura 13 Galofer S.A. Diagrama de proceso de cogeneración de energía eléctrica con Cáscara de Arroz (Fuente: Gremial de Molinos Arroceros 2010)

Esto implica tener una cartera de tierras disponibles para tales fines o en su defecto comprarlas, lo cual representa un costo elevado de depósito y transporte en camión, ya que 1 metro cúbico de cenizas pesa 200kg. Las canteras deben estar en recintos confinados rodeados de vegetación para impedir la voladura de polvo o material fino y/o el arrastre de finos con las aguas pluviales que pudieran afectar la calidad de las aguas superficiales. Ver figura 14.



Figura 14 Complejo Industrial Arrozur-Galfer. Foto satelital del predio.

En la figura 15 se muestran los efectos de la quema a cielo abierto. La polución del aire a través del humo resultante del proceso ocasiona enfermedades alérgicas y respiratorias (silicosis) en la población, por lo tanto es conveniente dejar un área buffer para minimizar las afectaciones en los predios linderos o en ecosistemas de relevancia.



**Figura 15 Depósito con quema de cáscara
(Fuente: Gremial de Molinos Arroceros 2010)**

En la actualidad la cantera de AFE donde se vertían las cenizas quedó agotada por lo cual la empresa necesita adquirir nuevos terrenos aptos para rellenar a un alto costo. Dichos terrenos tendrán una vida útil de aproximadamente 10 años teniendo en cuenta el ritmo que se deposita el desecho actualmente (González, 2013). Como se mencionó anteriormente, tanto la compra de terrenos como el transporte continuo de CCA son gastos evitables si se le diera un uso apropiado al residuo.

La empresa Arrozur vierte las CCA en forma húmeda, pero al secarse en presencia de vientos es igualmente propensa a desplazarse grandes distancias. Ver figura 16. A pesar de disponer las capas de CCA alternadas con capas de arena y pedregullo se han visto afectados los terrenos próximos.



ARROZUR

GALOFER

Figura 16 Transporte y disposición final de la CCA
(Fuente: González, 2013)

3.4 EFECTO DE LA CCA EN SU EMPLEO COMO ADICION MINERAL EN CEMENTOS (EFECTO PUZOLÁNICO Y FILLER)

Las puzolanas tienen un rol importante cuando se adicionan al cemento Portland porque usualmente aumentan la resistencia mecánica y la durabilidad de las estructuras de hormigón. Los efectos más importantes en la microestructura de la pasta cementicia son los cambios en la estructura de los poros. Se produce una reducción en el tamaño del grano causada por las reacciones y el efecto puzolánico y la obturación y eliminación de poros por la acción de los granos más finos, lo que se denomina efecto físico o filler (Isaia et al., 2001). Las pequeñas partículas de puzolana son menos reactivas que el cemento portland y cuando se dispersan en la pasta generan un gran número de núcleos para formar productos hidratados, (Mehta et al., 1990 apud Isaia et al., 2001). Este mecanismo convierte a la pasta en más homogénea y densa por la distribución de poros finos generados en la reacción de

la sílice amorfa de la adición mineral y el hidróxido de calcio producido en las reacciones de hidratación del cemento.

El efecto físico de los granos finos permite densificar la pasta de cemento y reducir el efecto pared producido entre la pasta y los agregados del hormigón mejorando su microestructura y propiedades en general. Por lo tanto el efecto puzolánico en la microestructura de la pasta se manifiesta no solo en las reacciones puzolánicas sino también en las físicas (o efecto filler) de las partículas más finas de la mezcla. La acción física de la puzolana contribuye a la formación de una pasta de cemento más densa, homogénea y uniforme (Isaia et al., 2001).

“La ceniza de cáscara de arroz residual uruguaya cuando se muele adecuadamente puede ser una puzolana, habiéndose demostrado la factibilidad técnica de su utilización como material cementíceo suplementario” Se debe moler hasta obtener una dimensión media de partículas menor que 10 μ m. (Rodríguez de Sensale, 2006; Giaccio et al., 2007; Rodríguez de Sensale, 2010; Rodríguez de Sensale et al., 2014).

4 VIABILIDAD ECONOMICO-AMBIENTAL DE LA ELABORACION DEL CEMENTO PORTLAND COMPUESTO

4.1 SELECCION DE MUESTRAS A ESTUDIAR

4.1.1 Materiales empleados para la elaboración de las muestras

Para la elaboración de las muestras se emplearon materiales locales: cemento portland normal (CPN), dos CCA obtenidas industrialmente, filler calcáreo, agua destilada y también arena normal para la realización de probetas de mortero. El filler calcáreo empleado proviene de ANCAP y cumple los requisitos de la normativa (UNIT 1996). Las CCA fueron provistas por las empresas productoras del residuo, presentan igual contenido de dióxido de sílice y provienen de dos procesos diferentes. Una de ellas es el residuo de la utilización de cáscara de arroz como combustible para generar vapor en el proceso de parboilizado del arroz (Arrozur), mientras la otra es residuo de la utilización de cáscara de arroz como biomasa para generación de energía eléctrica (Galofer), (Rodríguez et. al 2014).

Por los resultados obtenidos en el proyecto ANII FSE -1-2011-1-6476 (Rodríguez, 2013), “los estudios realizados en el marco del proyecto indican que no es posible emplear para la elaboración de cemento las CCA residuales tal como se obtienen actualmente a nivel industrial”. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el mismo estudio recomienda realizar ciertas transformaciones para mejorar sus propiedades como material puzolánico. Dichas transformaciones fueron de secado, tamizado y molienda, y al finalizarlas se determinó el índice de actividad puzolánica. El filler calcáreo utilizado proviene de la molienda en laboratorio de la misma piedra caliza empleada en la elaboración de cemento Portland con filler (CPF) de ANCAP. Los ensayos realizados en el Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) de Facultad de Ingeniería y el polo tecnológico de Pando establecieron que el tiempo óptimo de molienda para la piedra caliza son 30 minutos, que coincide con el tiempo óptimo de molienda de las CCA estudiadas. Este hecho es positivo ya que permite moler en forma conjunta todos los componentes del CPC en la planta industrial (Rodríguez 2013). El cemento utilizado proviene de la planta de ANCAP de Minas, debido principalmente a la cercanía de la planta con la de producción de las CCA en Galofer y Arrozur (en Villa Sara, Treinta y Tres a 170km de distancia).

4.1.2 Composición química

Si bien la Norma UNIT 20:2003 permite elaborar CPC con inclusión de hasta tres componentes (Puzolanas, Escoria y Filler) además del clínker, para la elaboración de muestras se opta por utilizar sólo dos: la puzolana (P) representada por la CCA y el filler

calcáreo (F). En Argentina y Brasil se realizan CPC con escoria granulada de alto horno (E) debido a que ambos países poseen grandes cantidades de este residuo y su empleo contribuye a solucionar el problema de la disposición final. En Uruguay no existen altos hornos por lo cual no se justifica su empleo (Rodríguez 2013).

Las muestras de CPC elaboradas en laboratorio para la realización del proyecto ANII FSE - 1-2011-1-6476 (Rodríguez, 2013) mencionado anteriormente se realizaron variando hasta 35% los porcentajes de sustitución de clínker por F y CCA, porcentaje máximo permitido en Norma UNIT 20:2003. Por este motivo es que dichas mezclas se denominan ternarias.

Todas las muestras ensayadas cumplieron los requisitos de composición química presentes en la Norma UNIT 20:2003 para CPC, (Rodríguez 2013, Rodríguez et al. 2014).

4.1.3 Propiedades mecánicas

Para evaluar las propiedades mecánicas de las diferentes mezclas se estudió su resistencia a flexión y compresión. Se realizaron los ensayos sobre morteros de 100% de cemento como referencia y mezclas con sustituciones de entre 10% y 35% de CCA y filler, de acuerdo con la norma UNIT 20:2003 a los 2, 7 y 28 días (Rodríguez 2013).

Desde el punto de vista mecánico las diferentes mezclas estudiadas con CCA de Arrozur cumplen los requisitos especificados en la Norma UNIT 20 a los 7 y 28 días, salvo en los casos que la proporción de CCA es de 10% y 5%. Ver tabla 13.

TABLA 13 Propiedades mecánicas de las mezclas estudiadas con CCA de Arrozur

Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	Filler (%)	2 días (MPa)		7 días (MPa)		28 días (MPa)		Cumple requisitos UNIT 20
				R_f	R_c	R_f	R_c	R_f	R_c	
10	90	5	5	4,03	16,81	6,11	28,56	7,59	45,64	CPC 40
15	85	10	5	3,31	14,02	5,80	27,50	7,38	41,03	CPC 40
		5	10	3,64	14,56	5,60	27,11	7,44	38,13	CPC 30
20	80	15	5	3,38	12,65	5,45	28,96	8,46	38,45	CPC 30
		5	15	3,36	13,27	5,31	25,44	6,74	38,95	CPC 30
		10	10	3,51	14,67	5,68	27,66	7,03	36,57	CPC 30
25	75	20	5	3,06	12,63	5,15	26,04	8,26	39,50	CPC 30
		15	10	3,02	12,09	5,05	28,00	7,49	39,05	CPC 30
		10	15	3,06	12,14	4,46	22,55	6,83	35,26	CPC 30
		5	20	2,97	12,06	4,95	26,98	6,47	31,49	CPC 30
30	70	25	5	2,49	10,59	5,37	28,06	8,29	38,54	CPC 30
		20	10	2,43	9,84	5,31	26,91	7,87	38,45	CPC 30
		15	15	2,68	11,11	5,01	25,21	7,61	33,05	CPC 30
		10	20	2,42	10,40	4,20	20,47	6,42	30,85	CPC 30
		5	25	2,64	11,39	4,04	19,99	6,37	31,63	CPC 30
35	65	30	5	2,13	9,89	4,38	18,67	8,57	36,92	CPC 30
		25	10	2,12	9,53	4,15	19,71	7,88	34,55	CPC 30
		20	15	1,25	6,01	4,17	18,90	8,03	32,43	CPC 30
		15	20	1,15	6,01	3,91	19,74	7,74	31,21	CPC 30
		10	25	1,15	5,45	3,47	17,40	6,47	26,81	No cumple
		5	30	1,49	6,08	3,62	17,21	5,50	23,52	No cumple

(Fuente: Rodríguez 2013, Rodríguez de Sensale et al, 2014)

Por lo tanto para las diferentes sustituciones de CCA se obtienen los mejores resultados para los porcentajes de entre 10% y 35%.

Además existen 2 casos de muestras que cumplen con los requisitos de un CPC 40. Podemos observar también en dicha tabla que a medida que aumenta la edad de las muestras, aumenta su resistencia.

En cuanto a las mezclas ternarias de Galofer los resultados arrojados por los ensayos coinciden con los de Arrozur en que a medida que aumenta la edad también aumenta la

resistencia y que para las sustituciones entre 10% y 35% se obtienen los mejores resultados. Sin embargo no hay combinación posible de CCA+F que cumpla con los requisitos mecánicos para obtener un CPC 40, de acuerdo con la norma UNIT 20:2003. Para una sustitución de cemento por 30% de CCA+F no se cumple la norma con sustituciones de 5% y 10% de CCA y para una sustitución de 35% se cumple solo en los casos que la CCA representa el 30% y 25%. Ver tabla 14.

TABLA 14 Propiedades mecánicas de las mezclas estudiadas con CCA de Galofer

Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	Filler (%)	2 días (MPa)		7 días (MPa)		28 días (MPa)		Cumple requisitos UNIT 20
				R_f	R_c	R_f	R_c	R_f	R_c	
10	90	5	5	2,39	10,06	5,65	25,49	7,67	39,00	CPC 30
15		10	5	2,25	9,62	4,83	23,92	7,71	39,48	CPC 30
		5	10	2,16	8,70	5,60	22,56	6,63	34,15	CPC 30
20	80	15	5	2,30	9,17	4,88	21,99	7,95	38,70	CPC 30
		5	15	1,96	7,93	4,57	20,71	6,64	31,33	CPC 30
		10	10	1,93	7,87	4,66	20,65	6,95	31,66	CPC 30
25	75	20	5	2,00	8,32	4,60	20,20	7,43	33,80	CPC 30
		15	10	2,11	8,00	4,92	24,99	7,11	33,44	CPC 30
		10	15	2,16	7,90	4,95	22,57	6,47	27,61	No cumple
		5	20	1,88	6,88	4,44	21,05	6,26	28,12	No cumple
30	70	25	5	1,87	7,50	4,75	21,22	8,71	35,74	CPC 30
		20	10	1,93	7,08	4,72	22,76	7,76	33,51	CPC 30
		15	15	1,73	6,57	4,23	21,92	7,45	30,35	CPC 30
		10	20	2,05	7,37	3,97	17,93	7,19	27,91	No cumple
		5	25	1,73	5,83	3,72	18,63	6,09	27,28	No cumple
35	65	30	5	1,63	5,56	3,87	16,75	8,12	34,62	CPC 30
		25	10	1,90	6,30	3,49	16,56	7,92	32,81	CPC 30
		20	15	1,70	5,39	3,42	15,39	-	-	No cumple
		15	20	1,88	5,97	3,42	15,26	-	-	No cumple
		10	25	1,52	5,01	3,32	14,56	-	-	No cumple
		5	30	1,46	5,17	3,17	13,49	-	-	No cumple

(Fuente: Rodríguez 2013, Rodríguez de Sensale et al, 2014)

De todo lo visto anteriormente podemos concluir que en la mayoría de las combinaciones estudiadas se cumplen los requisitos mecánicos establecidos en la norma UNIT 20:2003. Asimismo se puede observar que las CCA de Arrozur arrojan mejores resultados en lo referente a propiedades mecánicas que las de Galofer. A los efectos de limitar la cantidad de muestras a estudiar en el Proyecto ANII-FSE-1-2011-1-6476 (Rodríguez, 2013) mencionado en la próxima sección del siguiente capítulo, se considerarán aquellas mezclas que tengan mayores porcentajes de CCA en su composición para cada porcentaje de sustitución. Por lo tanto se estudiarán 6 mezclas de cada CCA y una mezcla de referencia sin CCA.

4.2 VENTAJAS ECONOMICO-AMBIENTALES

Los cementos Portland compuestos (CPC) constituyen una importante ventaja para el desarrollo sostenible de la industria del cemento ya que al sustituir un porcentaje alto de clínker (en el entorno del 35%) por 2 componentes (filler y ceniza de cáscara de arroz) se reduce la cantidad de combustible empleada en su fabricación y por consiguiente también los costos de producción. A esta ventaja económica se suman varias ventajas ambientales. Por un lado en relación al punto anterior se disminuyen las emisiones de dióxido de carbono. Por otro se reduce la extracción de materia prima no renovable como lo es la piedra caliza y la arcilla y al mismo tiempo se contribuye a solucionar el problema de la disposición final de la CCA, convirtiendo en recurso un residuo de la cadena agroindustrial.

4.2.1 Mecanismo de Desarrollo Limpio

El Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL) se estableció en el Protocolo de Kioto (PK) y su propósito es ayudar a las Partes firmantes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) a lograr un desarrollo sostenible y dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, (MVOTMA, 2007). Según Cordeiro 2006, los MDL son formas creadas para permitir que los países desarrollados puedan promover la reducción de emisiones fuera de su territorio mediante la negociación de créditos de bonos de carbono. La medida que se usa para cuantificar estos bonos es el carbono equivalente o la cantidad de CO₂ que se deja de emitir por el uso del mecanismo limpio.

Cada país tiene total libertad para determinar el modo en que los proyectos MDL contribuyen o no a promover el desarrollo sostenible. Para la aprobación de proyectos en el marco del MDL se establecen diferentes categorías. Estas categorías corresponden a

critérios ambientales, sociales, económicos y políticos. Ver figura 17. Si bien la sustentabilidad abarca todas las categorías mencionadas esta tesis está enfocada en los aspectos ambientales exclusivamente.

Dentro de los criterios ambientales de desarrollo sostenible (figura 17), el empleo de CCA en la fabricación del cemento contribuye fundamentalmente a la eficiencia energética por la disminución en el uso de combustible, la reducción en generación de desechos sólidos y la preservación de la calidad del aire y recursos hídricos debido a la disminución de ceniza volante. En este mismo sentido, el hecho que disminuya la superficie de suelos afectados para la disposición final del residuo permite reservar más áreas para fines productivos.

La calidad del aire se verá doblemente mejorada por la reducción de polvo al disminuir la producción de clínker y también por la reducción en las CCA que vuelan. Por todos estos motivos explicitados anteriormente se podría considerar el empleo de CCA en el cemento como un MDL.

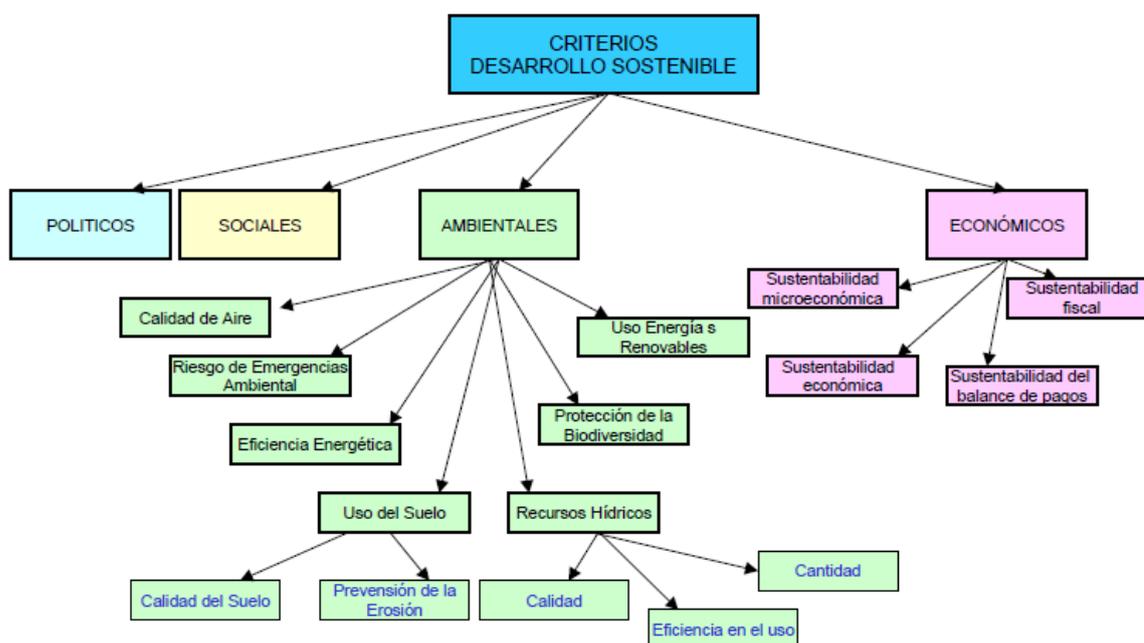


Figura 17 Criterios de desarrollo sostenible del MDL
(Fuente: MVOTMA, 2007)

4.2.2 Bonos de carbono

“El mercado de carbono puede entenderse como el conjunto de condiciones políticas, sociales y económicas que han dado lugar a la oferta, demanda y posterior comercialización de derechos de emisión y créditos por reducción de emisiones” (Godoy, 2008 apud Méndez

et al., 2012). Es una forma complementaria y más conveniente desde el punto de vista económico para posibilitar que los países que emiten gases de efecto invernadero (GEI) cumplan con sus compromisos de disminuir estas emisiones que causan el cambio climático. El mercado de créditos de carbono permite que los países con obligaciones de reducir sus emisiones puedan comprar reducciones a compañías u otros países que no tengan la obligación de hacerlo (Méndez et al., 2012). Otros autores en cambio opinan que este mecanismo comercial permite encubrir un tipo de intercambio de carbono en el cual las mismas compañías radicadas en los países industrializados compran créditos de carbono de sus sucursales en países en desarrollo y evitan así sus obligaciones en la casa matriz (Gilbertson y Reyes, 2009). El comercio de los permisos para contaminar constituye una búsqueda por encontrar soluciones más baratas para las industrias contaminantes, no importando dónde ni cómo se realizan las reducciones. No se reducen las prácticas insostenibles y el enfoque no permite encontrar soluciones efectivas sino más bien se ve el problema climático principalmente en términos financieros (Gilbertson y Reyes, 2009). Es por esta razón que los Mecanismos de Desarrollo Limpio son duramente criticados internacionalmente por considerarse soluciones falsas al problema del cambio climático.

Los países en desarrollo como Uruguay no tienen compromisos de reducción de la contaminación en el protocolo de Kioto. No obstante la reducción y captura de emisiones de GEI mediante Mecanismos de desarrollo Limpio ofrecen para el país oportunidades para la realización de negocios con gobiernos y empresas de países industrializados. Por lo tanto si bien no se resuelve la causa en su origen constituye una herramienta para contribuir a la mitigación del cambio climático y sitúa al país en una senda del desarrollo sostenible (Méndez et al. 2012). Los certificados de reducción de emisión (CER) representan una tonelada de CO₂ que deja de emitirse a la atmósfera y que ha sido generada y certificada mediante el esquema del mecanismo de desarrollo limpio y su precio es negociable en el mercado en función de los volúmenes que se puedan garantizar anualmente, los riesgos del negocio, si presentan o no una metodología, si documentan los procesos, la demanda internacional, etc.

A modo de ejemplo en Uruguay existe un parque eólico en Maldonado registrado en la CMNUCC que generará a partir de la energía eólica alrededor de 180000 créditos de carbono en los primeros 7 años (WB, 2012).

5 EVALUACION DE EMISIONES DE CARBONO

5.1 HISTORICO

Por primera vez en la publicación de Balance 2012 (MIEM, 2012) se incorporan las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provenientes de las actividades de quema de los combustibles correspondientes a las industrias de la energía y los diferentes sectores de consumo en Uruguay.

Según esa publicación, las emisiones totales de CO₂ fueron 8.199kton (miles de toneladas) provenientes del transporte (3.251kton), centrales térmicas de servicio público (2.925kton), industrial (643kton), agro/pesca (486kton), residencial (396kton), consumo propio de la refinería (338kton) y finalmente comercial/servicios (159kton). En el siguiente gráfico se observan las participaciones en forma separada de las diferentes actividades. Las emisiones de dióxido de carbono provenientes de la fabricación del cemento están consideradas dentro del sector industrial que contribuye con un 8% al resultado global de emisiones. Ver figura 18.

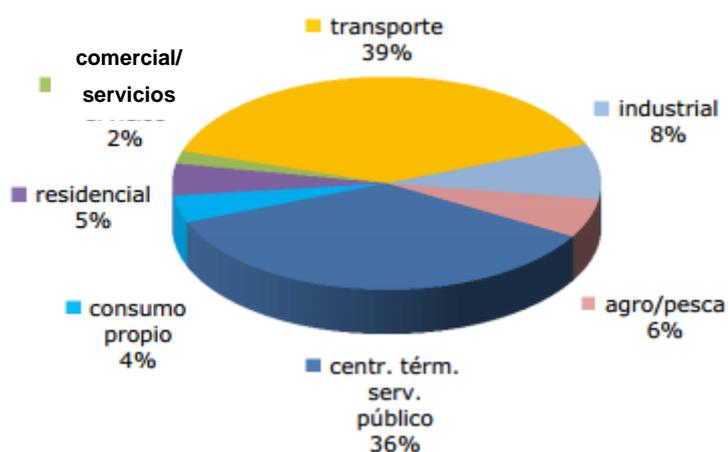


Figura 18 Emisiones CO₂, Industrias de la energía y Sectores de consumo, 2012 (%)
(Fuente: MIEM, 2012)

En cuanto a las emisiones provenientes de los sectores de consumo, se destaca que la principal categoría de emisiones de CO₂ ha sido históricamente el sector transporte, con una participación promedio de 45% en toda la serie (MIEM, 2012). En el caso de los demás sectores del consumo, incluso en la industria, las emisiones han permanecido relativamente constantes a lo largo del período estudiado. Ver figura 19.

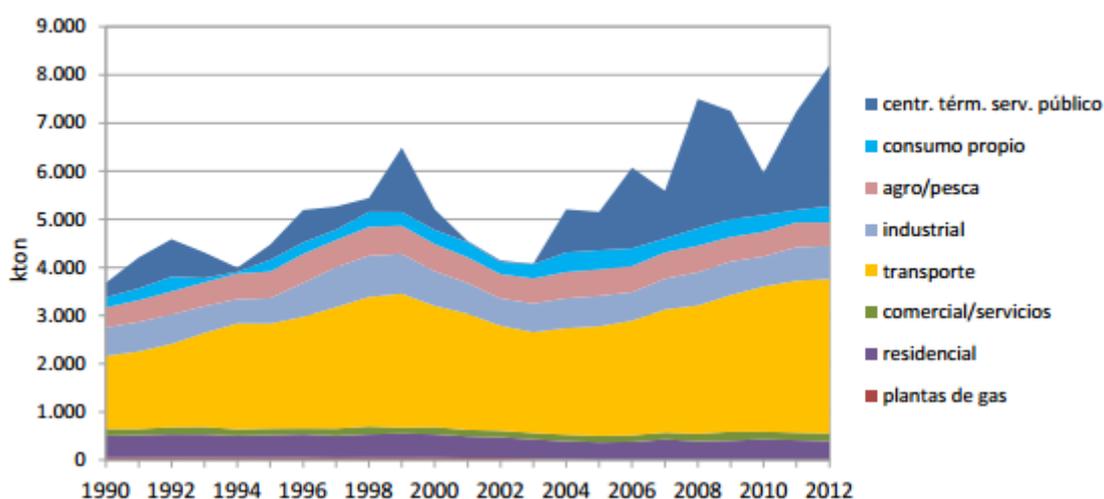


Figura 19 Emisiones CO₂, Industrias de la energía y Sectores de consumo, 1990-2012, (kton.)
(Fuente: MIEM, 2012)

5.2 CALCULO DE LAS EMISIONES DEL CPC

En este capítulo se busca evaluar el beneficio ambiental que pudiera aportar el empleo de cenizas agroindustriales de cáscara de arroz en la fabricación de cemento. Para calcular las emisiones de dióxido de carbono generadas en la fabricación de CPC se adoptó el método sugerido por el IPCC, 2000, el cual fue diseñado específicamente para esos fines por un Grupo Consultivo de Expertos del UNFCC. Dentro del Manual del Sector de los Procesos Industriales y de acuerdo con las circunstancias nacionales de cada país miembro de las Naciones Unidas se recomienda usar los datos nacionales de la producción de clínker y en caso que no existiera información tomarla del Método de buenas prácticas (UNFCC, 2000). Primeramente se calcularán las emisiones de dióxido de carbono generadas por la producción del CPC de ANCAP en la planta de Minas durante el año 2012. Luego se seleccionarán 12 mezclas de CPC (6 de Arrozur y 6 de Galofer) presentadas en el capítulo anterior que cumplan con todas las especificaciones de las normas UNIT 20:2003 y UNIT-ISO 679:2009. Se calculará su emisión de dióxido de carbono a la atmósfera y una vez obtenidos estos valores se compararán con los anteriores.

La metodología del IPCC, 2000, establece que las emisiones de CO₂ provenientes de la elaboración del CPC son la adición de dos partes: una se refiere al proceso de calcinación del carbonato de calcio para formar el clínker y la otra a la quema de combustibles fósiles

durante el proceso de fabricación. Como las mezclas ensayadas corresponden al CPC y la CCA contiene carbono, también se calcularán las emisiones provenientes de dicha adición (Cordeiro, 2006).

5.2.1 Emisiones por calcinación del calcáreo

La siguiente ecuación representa la cantidad de emisiones de CO₂ que se liberan a la atmósfera por la calcinación del calcáreo (IPCC, 2000).

$$E_{cal} = k_c \cdot \underbrace{CaO_{cl} \cdot Cl_{cp}}_{FE_{cal}} \cdot P_{cp}$$

E_{cal}: es la cantidad de CO₂ generada durante la calcinación del calcáreo y se mide en toneladas

K_c: es una constante igual a 0,785 [(g/molCO₂)/(g/molCaO)] según IPCC, 2000.

CaO_{cl}: relación óxido de calcio-clínker

Cl_{cp}: relación clínker-cemento pórtland

P_{cp}: producción de cemento pórtland (t)

FE_{cal}: Factor de Emisión correspondiente a la calcinación del calcáreo

Para calcular las emisiones de dióxido de carbono provenientes de la calcinación del calcáreo se utilizan los coeficientes que sugiere el Manual de Buenas Prácticas (IPCC, 2000) para los casos que no exista información local. En Uruguay la relación clínker-cemento es 1 y la relación óxido de calcio-clínker 0,632 (Rodríguez, 2009).

Teniendo en cuenta que la producción anual de cemento Pórtland en 2012 en la planta de Minas fue 249.188 toneladas (ANCAP, 2012) y sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene el siguiente resultado:

$$E_{cal} = 0,785 \times 0,632 \times 1 \times 249188 = \mathbf{123627,2 \text{ t}}$$

Son las toneladas de CO₂ emitidas anualmente por la carbonatación del calcáreo en la planta de Minas a lo largo del año 2012.

5.2.2 Emisiones por quema de combustible

Para calcular la emisión de CO₂ generada por el uso del combustible recurrimos a la siguiente fórmula:

$$E_{\text{com}} = \sum_b \left[\frac{C_b \cdot FC_b \cdot FE_b \cdot CO_b \cdot k}{E_{\text{comb}}} \right]$$

siendo:

E_{com} : es la cantidad de CO_2 debido a la combustión (t)

C_b : Es el consumo anual de combustible b (1000 tep)

FC_b : Factor de conversión (TJ/1000 tep)

FE_b : Factor de Emisión de CO_2 del combustible b (t. de carbono/TJ)

CO_b : Fracción de carbono oxidado en el proceso de combustión del combustible b

K: constante igual a 3.67 [(g/mol CO_2)/(g/molC)]

E_{comb} : emisión anual de CO_2 del combustible b (diesel, carbón, etc) debido a la combustión en el proceso de producción del clínker.

En el caso de ANCAP, que emplea diferentes tipos de combustibles, se deberá realizar la sumatoria de las emisiones generadas por todos ellos. En este trabajo no se considerarán las emisiones provenientes de la energía eléctrica empleada en el proceso de fabricación del cemento debido a que gran parte de su generación en Uruguay es de tipo hidroeléctrica y no produce dióxido de carbono (Cordeiro, 2006).

En la planta de Minas se consumen 140 litros de fuel oil por cada tonelada de CP producido según los datos aportados telefónicamente por Luis Bordón, encargado de la oficina de producción de Minas, y el factor de conversión del fuel oil de refinería es 0.96 tep/t según la Internacional Energy Agency (IEA, 2014) para las Américas, por lo tanto el consumo durante 2012 fue:

$$C_b = 249,188 \text{ kton} \cdot 140 \cdot 0.96 \text{ tep/t} / 1000 = 33,490 \text{ (1000 tep)}$$

$$FC_b = 42,96 \quad \text{según IPCC, 1996}$$

$$FE_b = 21,1 \quad \text{según IPCC, 1996}$$

$$CO_b = 0,99 \quad \text{según IPCC, 1996}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se obtienen los siguientes valores:

$$E_{\text{com}} = 33,490 \cdot 42,96 \cdot 21,1 \cdot 0,99 \cdot 3,67 = 110296,9 \text{ t. de } \text{CO}_2$$

Si sumamos las emisiones generadas por la carbonatación del calcáreo con las del combustible se obtiene:

123627+110296,9 t = 233923,9 t de CO₂ generadas en la producción de cemento anual con fuel oil y representan el 36% del total de las emisiones anuales del sector industrial (643 kton).

El factor de correlación entre las emisiones generadas y el cemento producido es el siguiente:

$$233923,9/249188= \mathbf{0,94}$$

En cuanto al resto de los combustibles empleados en la producción de cemento, la cáscara de arroz es el que le sigue cuantitativamente en importancia al fuel oil. Su aprovechamiento energético no contribuye a aumentar el efecto invernadero ya que el balance de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera es neutro. El dióxido de carbono generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción por lo cual no incrementa la cantidad de CO₂ presente en la atmósfera. En el caso de los combustibles fósiles, por contrario, el carbono que se libera a la atmósfera se ha fijado en la tierra y sumideros oceánicos durante miles de años (Míguez, 2013). Es por este motivo que no se consideran las emisiones generadas en la quema de cultivos renovables. Los otros combustibles: residuos de fondo de tanque, gas oil y aceite al tener una participación muy menor en el total tampoco serán tenidos en cuenta en el cómputo de las emisiones.

5.2.3 Emisiones por transporte de ceniza de cáscara de arroz

No se incluirá en el cálculo de emisiones de dióxido de carbono las originadas por el transporte de la CCA desde su lugar de origen (Villa Sara, departamento de Treinta y Tres, km 283 de la ruta 8) a la planta cementera de ANCAP de Minas (km113, ruta 8), de donde provienen las muestras ensayadas porque en un futuro cercano se prevé ubicar una nueva planta de cemento a una distancia equivalente a la asociada con el transporte de caliza, como se explica a continuación. La distancia actual entre las dos localidades es de 170 km. Los yacimientos de cal se ubican en los departamentos de Lavalleja, Treinta y Tres y Paysandú, coincidiendo con la ubicación de las plantas de cemento. Ver figura 20.

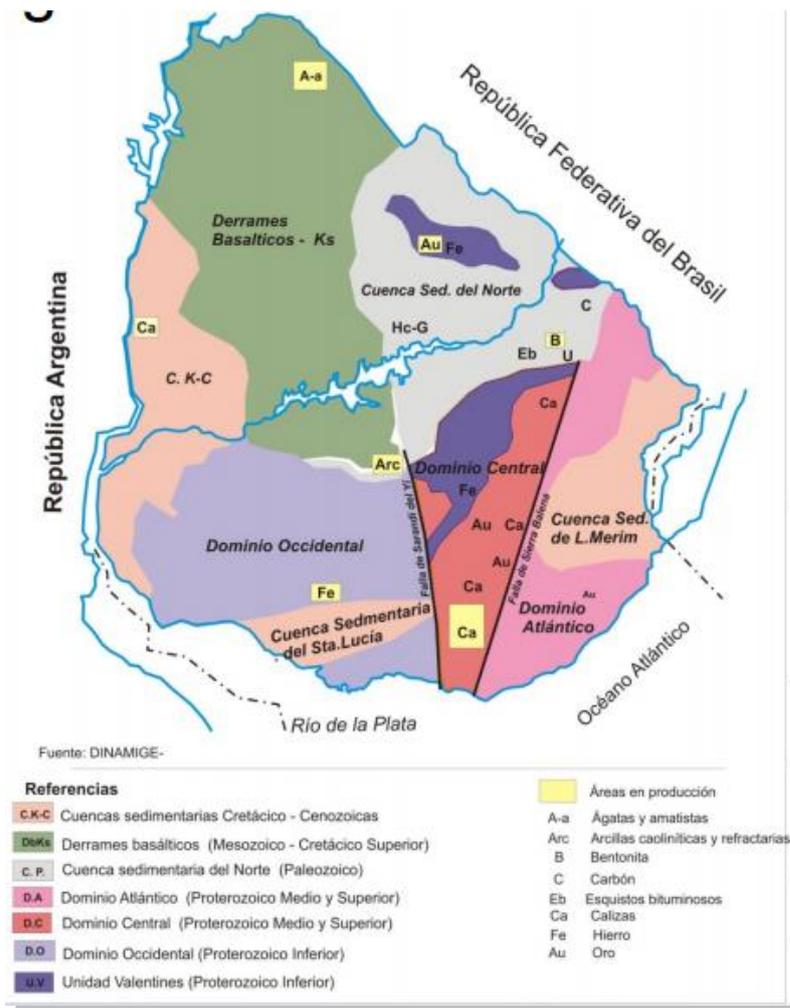


Figura 20 Mapa geológico del Uruguay.
(Fuente MIEM, 2011)

En los yacimientos de cal, a medida que resulta más difícil la extracción se van abriendo nuevas canteras. Como fue mencionado anteriormente, ANCAP construirá una nueva planta de cemento en el km 328 de la ruta 8, a 45km de distancia a las arroceras. En el momento que comience a funcionar esta planta las emisiones originadas por el transporte se verán reducidas a menos de un tercio de las generadas en la actualidad y es posible que se pueda contar con medios menos contaminantes de transporte. El Proyecto Cal de extracción de piedra caliza, inaugurado en 2013, se ubica a aproximadamente 20 km de la ciudad de Treinta y Tres y sobre la ruta 98. En un futuro, la distancia de la planta de extracción de piedra caliza a la cementera de Treinta y Tres será muy similar a la distancia de las arroceras a la misma ciudad, por lo cual no correspondería calcular las emisiones de transporte en el sentido que lo que se ahorra en trasladar la cal es relativamente equivalente al traslado de CCA.

5.2.4 Reducción de Emisiones por utilización de ceniza residual

Al sustituir parte del CPN por la puzolana (CCA) se van a reducir las emisiones de dióxido de carbono aportadas por la calcinación del calcáreo y por el empleo del combustible pero como las CCA presentan cierto contenido de carbono en su constitución química, la oxidación de ese carbono debe ser considerada en los cálculos totales de emisiones.

La cantidad total de CO₂ emitida por la puzolana por tonelada de cemento es determinada por la siguiente ecuación:

$$E_{\text{puz}} = k_c \cdot Q_p \cdot m_{\text{puz}}$$

De donde:

k_c : es una constante igual a 3.67 (Cordeiro, 2006)

Q_p : es la cantidad de carbono contenido en la puzolana y determinado por pérdida al fuego. Para la ceniza de Arrozur el valor es 13.15% y la de Galofer 12.01 %.

m_{puz} : cantidad de puzolana incluida en una tonelada de cemento (kg/ton).

Este valor depende de la constitución de las mezclas y varía entre 5% y 30% según se detalla en tabla 15.

En la tabla 15 se presentan las mezclas de CPC elegidas para calcular las emisiones de dióxido de carbono. Se observa que todas ellas cumplen con los requisitos mecánicos descritos en la tabla 8 del capítulo 2, a los 2, 7 y 28 días.

Los mejores resultados de resistencia se logran con las mezclas que sustituyen el 10% y 15% de cemento por CCA y filler. Según los ensayos de referencia de la norma UNIT 525 estas dos muestras cumplen con los requisitos de los cementos clase CP40, siendo más resistentes que los de la clase CP30. El resto de las mezclas (con 20% a 35% de sustitución) cumplen con los ensayos de referencia de la norma UNIT-ISO 679:2009 para los cementos clase CP30.

TABLA 15 Propiedades mecánicas de las mezclas elegidas con CCA de Arrozur

Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	Filler (%)	2 días (MPa)		7 días (MPa)		28 días (MPa)		Cumple requisitos UNIT 20:2003
				R_f	R_c	R_f	R_c	R_f	R_c	
10	90	5	5	4,03	16,81	6,11	28,56	7,59	45,64	CP 40
15	85	10	5	3,31	14,02	5,80	27,50	7,38	41,03	CP 40
20	80	15	5	3,38	12,65	5,45	28,96	8,46	38,45	CP 30
25	75	20	5	3,06	12,63	5,15	26,04	8,26	39,50	CP 30
30	70	25	5	2,49	10,59	5,37	28,06	8,29	38,54	CP 30
35	65	30	5	2,13	9,89	4,38	18,67	8,57	36,92	CP 30

(Fuente: Rodríguez, 2013)

Para la selección de mezclas de Galofer, se observa que a medida que aumenta la edad aumenta también su resistencia (ver tabla 16). Para las diferentes sustituciones entre 10% y 35% se obtienen los mejores resultados con los porcentajes menores de CCA.

No existe combinación de mezcla y filler calcáreo que cumpla con los requisitos mecánicos para obtener CPC 40 (UNIT 20: 2003), de acuerdo con la Tabla 16. Analizando los resultados en relación a requisitos mecánicos establecidos en UNIT 20:2003 para CPC puede concluirse que hay cumplimiento en la mayoría de las combinaciones estudiadas para ambas CCA, lográndose mejores resultados con la CCA de Arrozur que con la de Galofer.

TABLA 16 Propiedades mecánicas de las mezclas elegidas con CCA de Galofer

Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	Filler (%)	2 días (MPa)		7 días (MPa)		28 días (MPa)		Cumple requisitos UNIT 20:2003
				R_f	R_c	R_f	R_c	R_f	R_c	
10	90	5	5	2,39	10,06	5,65	25,49	7,67	39,00	CP 30
15	85	10	5	2,25	9,62	4,83	23,92	7,71	39,48	CP 30
20	80	15	5	2,30	9,17	4,88	21,99	7,95	38,70	CP 30
25	75	20	5	2,00	8,32	4,60	20,20	7,43	33,80	CP 30
30	70	25	5	1,87	7,50	4,75	21,22	8,71	35,74	CP 30
35	65	30	5	1,63	5,56	3,87	16,75	8,12	34,62	CP 30

(Fuente: Rodríguez, 2013)

En la siguiente tabla 17 se presentan los valores en kilos de la composición de las muestras de cemento con sustitución de CCA y Filler, así como el cálculo de dióxido de carbono que quedará retenido en el CPC. Cabe observar que cuanto mayor es la cantidad de cemento que se sustituye por CCA y Filler, mayor resulta la cantidad de dióxido de carbono retenido, obteniendo el máximo la muestra que tiene 300 kg de CCA y 50kg de Filler. Por el contrario la muestra con menor sustitución de cemento, 100 kg, es la que presenta una menor retención de dióxido de carbono. La tabla 18 contiene los resultados de los mismos cálculos que la tabla 17 pero para las cenizas provenientes de Galofer. Los valores son muy

similares para ambas CCA, arrojando algunas muestras de Arrozur resultados de retención de CO₂ levemente mayores.

TABLA 17 Cantidad de CO₂ retenida en CPC por sustitución de cemento por CCA de Arrozur

sustit. (ton)	CPN (ton)	CCA (ton)	Filler (ton)	kc	Qp CCA (%)	Cantidad de CO₂ retenida en CPC $E_{puz} = m_{puz} * k_c * Q_p$ (1*2*3) (ton.CO ₂ /ton cem.)
		1		2	3	
0,1	0,9	0,05	0,05	3,67	13,15	0,02413025
0,15	0,85	0,1	0,05	3,67	13,15	0,0482605
0,2	0,8	0,15	0,05	3,67	13,15	0,07239075
0,25	0,75	0,2	0,05	3,67	13,15	0,096521
0,3	0,7	0,25	0,05	3,67	13,15	0,12065125
0,35	0,65	0,3	0,05	3,67	13,15	0,1447185

(Fuente: Elaboración propia)

TABLA 18 Cantidad de CO₂ retenida en CPC por sustitución de cemento por CCA de Galofer

sustit. (ton)	CPN (ton)	CCA (ton)	Filler (ton)	kc	Qp CCA (%)	Cantidad de CO ₂ retenida en CPC $E_{puz} = m_{puz} * k_c * Q_p$ (1*2*3) (ton.CO ₂ /ton cem.)
		1		2	3	
0,1	0,9	0,05	0,05	3,67	12,01	0,02203835
0,15	0,85	0,1	0,05	3,67	12,01	0,0440767
0,2	0,8	0,15	0,05	3,67	12,01	0,06611505
0,25	0,75	0,2	0,05	3,67	12,01	0,0881534
0,3	0,7	0,25	0,05	3,67	12,01	0,11019175
0,35	0,65	0,3	0,05	3,67	12,01	0,1322301

(Fuente: Elaboración propia)

Las tablas 19 y 20 muestran las emisiones totales (E_T) de dióxido de carbono emitidas por la producción anual de la planta de Minas durante el año 2012 con la incorporación de las diferentes mezclas de CCA de Arrozur (t.17) y Galofer (t.18). En la columna de más a la derecha se grafica la reducción de emisiones de dióxido de carbono en caso que se hubiera empleado el porcentaje de CCA estipulado en cada mezcla. Se puede observar que de haber empleado 30% de CCA de Arrozur para elaborar CPC se hubiera podido reducir hasta un 19,58% las emisiones en relación a las emisiones totales de CPN (E_{TCPN}), y análogamente con CCA de Galofer un 20,91%.

TABLA 19 Emisiones totales de CO₂ con mezclas de ARROZUR y reducciones con respecto al CPN

sustit.	CPN	CCA Arrozur	Filler	Cantidad de CO ₂ retenida en CPC(A) $E_{puz}=k_c*Q_p*m_{puz}$ (ton.CO2/ton.cem.)	Producción anual cemento(B)	Emisiones por calcación del calcáreo (4)	Emisiones por empleo de combustible (5)	Emisiones por sust. CCA (6)	Emisiones totales (4+5+6)	Reducción Emisiones
(ton.)	(ton.)	(ton.)	(ton.)		(ton.)	(ton. anuales)	(ton. anuales)	(ton.anuales)	E_T (ton.anuales)	$100-E_T*100/E_{TCPN}$ (%)
0	1	0	0	0	249188	123627	110296,90	0,00	233923,90	0 (CPN)
0,1	0,9	0,05	0,05	0,02413025	249188	111.264,30	99.267,21	6012,97	216544,48	7,43
0,15	0,85	0,1	0,05	0,0482605	249188	105.082,95	93.752,37	12025,94	210861,25	9,86
0,2	0,8	0,15	0,05	0,07239075	249188	98.901,60	88.237,52	18038,91	205178,03	12,29
0,25	0,75	0,2	0,05	0,096521	249188	92.720,25	82.722,68	24051,87	199494,80	14,72
0,3	0,7	0,25	0,05	0,12065125	249188	86.538,90	77.207,83	30064,84	193811,57	17,15
0,35	0,65	0,3	0,05	0,1447815	249188	80.357,55	71.692,99	36077,81	188128,35	19,58

(Fuente: Elaboración propia)

TABLA 20 Emisiones totales de CO₂ con mezclas de GALOFER y reducciones con respecto al CPN

sustit. (ton.)	CPN (ton.)	CCA Galofer (ton.)	Filler (ton.)	Cantidad de CO ₂ retenida en CPC(A) $E_{puz}=k_c * Q_p * m_{puz}$ (ton.CO2/ton.cem.)	Producción anual cemento(B) (ton.)	Emisiones por calcínación del calcáreo (4) (ton. anuales)	Emisiones por empleo de combustible (5) (ton. anuales)	Emisiones por sust. CCA anual (6) (A*B) (ton.anuales)	Emisiones totales (4+5+6) E_T (ton.anuales)	Reducción Emisiones $100 - E_T * 100 / E_{TCPN}$ (%)
0	1	0	0	0	249188	123627	110296,90	0,00	233923,90	0 (E _{CPN})
0,1	0,9	0,05	0,05	0,02203835	249188	111.264,30	99.267,21	5491,69	216023,20	7,65
0,15	0,85	0,1	0,05	0,0440767	249188	105.082,95	93.752,37	10983,38	209818,70	10,30
0,2	0,8	0,15	0,05	0,06611505	249188	98.901,60	88.237,52	16475,08	203614,20	12,96
0,25	0,75	0,2	0,05	0,0881534	249188	92.720,25	82.722,68	21966,77	197409,69	15,61
0,3	0,7	0,25	0,05	0,11019175	249188	86.538,90	77.207,83	27458,46	191205,19	18,26
0,35	0,65	0,3	0,05	0,1322301	249188	80.357,55	71.692,99	32950,15	185000,69	20,91

(Fuente: Elaboración propia)

6 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS A FUTURO

De acuerdo con lo analizado en esta tesis, a partir del siglo XX el cemento tuvo un uso extendido como aglomerante del hormigón empleado en edificios e infraestructuras. Las principales ventajas que se le atribuyeron estuvieron relacionadas con su durabilidad y bajo costo de mantenimiento cuando es realizado de forma correcta. El crecimiento sostenido de la población mundial y su tendencia a aglomerarse en ciudades hace pensar que su producción seguirá creciendo en particular en los países en desarrollo.

El consumo de energía proveniente de la extracción de materiales y el proceso de fabricación del cemento son responsables del 5% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono antrópico. Si bien la industria de la construcción responde a necesidades sociales que pueden justificar el impacto ambiental originado en su fabricación, organismos como la AIE y el WBCSD, sensibles a los temas medioambientales, elaboraron una estrategia para reducir dichas emisiones paulatinamente. Conforme a las estrategias allí descritas y dentro del marco del proyecto ANII FSE_1_2011_1_6476, en este trabajo se sustituyó parte del clínker por cenizas de cáscara de arroz residuales con el fin de disminuir la proporción clínker/cemento necesario en la fabricación del CPN.

El proceso de fabricación de los cementos compuestos por filler calcáreo y CCA demandará menor cantidad de materias primas no renovables y por lo tanto durante la reacción necesaria para formar el monóxido de calcio se liberarán menos emisiones de dióxido de carbono al ambiente, teniendo en cuenta que aproximadamente el 50% de las emisiones de dióxido de carbono provenientes de la fabricación de cemento se originan en la reacción química que convierte la piedra caliza (CaCO_3) en monóxido de calcio (CaO). De acuerdo con el Análisis del Ciclo de Vida durante la etapa de fabricación del cemento también se reducirá la cantidad de energía incorporada proveniente de combustibles fósiles y por ende las emisiones de dióxido de carbono al producir menor cantidad de clínker.

Como fue visto en el análisis de las referencias bibliográficas realizado en los capítulos 2 y 3, los materiales silíceos finamente pulverizados como la CCA al combinarse con el cemento reaccionan con el hidróxido de calcio libre y forman compuestos hidráulicos que disminuyen la porosidad y aumentan la compacidad de las mezclas. Por lo tanto la incorporación de CCA no solo reduce las emisiones de dióxido de carbono sino que debido a sus propiedades puzolánicas también logra mejorar las calidades de los materiales en los cuales estos cementos son empleados. Estas ventajas están relacionadas con las propiedades mecánicas y de durabilidad.

Los cementos compuestos por filler calcáreo y CCA pueden contribuir al desarrollo sustentable debido a que su fabricación consume menos cantidad de recursos no

renovables (materiales y combustibles fósiles) y energía que los CPN. Esto se traduce en beneficios económicos por el menor costo de esta puzolana actualmente en nuestro país (Rodríguez, 2010) y también beneficios ambientales originados en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono a raíz de un menor uso de materias primas y combustibles, tal cual fuera demostrado en el capítulo anterior de esta Tesis.

De acuerdo con los datos anteriormente presentados, la empresa estatal ANCAP apuesta al crecimiento en la fabricación de cemento Portland para abastecer la región sur de Brasil. El establecimiento de extracción de piedra caliza y la planta de cemento en vías de construcción en el departamento de Treinta y Tres permitirán casi triplicar la producción.

Por su parte los cultivos de arroz también se han incrementado de forma sostenida durante los últimos años, principalmente para el mercado externo (90%). La ubicación de dos empresas productoras de ceniza de cáscara de arroz en nuestro país (Galofer y Arrozur), actualmente en el departamento de Treinta y Tres y cercanas a las fábricas de cemento, es un hecho que hace despreciable el cálculo de emisiones originadas en el transporte de las CCA.

Dentro de este contexto y tal como lo muestran los resultados obtenidos con esta tesis en el capítulo anterior, la producción de CPC será una buena oportunidad de reducir emisiones de dióxido de carbono ahorrándole recursos materiales al país y convirtiendo a las CCA en subproducto en lugar de seguir acumulándolas como desechos y ocupando nuevas tierras. En ese sentido la industria del cemento puede ser considerada como la destinataria final de residuos agroindustriales más que como emisora de gases de efecto invernadero.

La evaluación de la fabricación de CPC desde el punto de vista económico puede dar lugar a nuevas investigaciones. Se deberían comparar los costos de producción del CPN en relación al CPC. El CPC debería tener menor costo por el combustible y la mano de obra que se ahorrarían durante el proceso de producción, más aun considerando que la producción tenderá a aumentar. Un factor clave sería obtener las CCA de forma gratuita, que si bien hoy en día son un desecho al cual hay que darle un espacio físico, en la medida que sean demandadas podrían pasar a tener un valor de mercado.

Otro punto a evaluar en futuras investigaciones vinculadas a la temática sería la consideración de las CCA en la fabricación del cemento dentro de los MDL, teniendo en cuenta que contribuyen a la eficiencia energética, la preservación de la calidad del aire y recursos hídricos así como la disminución de superficie de suelos afectados para la disposición final del residuo. Podría constituir una oportunidad para la realización de negocios con gobiernos y empresas de países industrializados a través de la venta de certificados de reducción de emisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland, ANCAP, **Memoria y Balance 2012**. [En línea] [consulta 15 de octubre de 2013] Disponible en: http://www.ancap.com.uy/MemoriaBalance/2012/Memoria_2012.pdf

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, (2002), ACI Committee 116.R-00. **Cement and concrete terminology**. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Detroit: American Concrete Institute, 73 p.

Asociación de Cultivadores de Arroz, ACA, (abril 2015) Revista nº81, **Inauguración de la Cosecha de Arroz**. En línea [consulta 25 de abril de 2015] Disponible en: <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://www.aca.com.uy/wp-content/uploads/2015/05/Revista-arroz-81-ABRIL-2015-para-web.pdf&hl=es>

BATELLE MEMORIAL INSTITUTE, (2002), **Toward a Sustainable Cement Industry – Substudy 10: Environment, Health & Safety Performance Improvement**. AEA Technology research for WBCSD apud World Business Council for Sustainable Development- WBCSD Cement Sustainable Initiative-CSI- GEMR, 2012.

BEHAK, L., PERES, W. (2008), Revista Ingeniería de Construcción Vol. 23 N°1, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, **Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación**.

[En línea] [consulta 5 de noviembre de 2013] Disponible en: <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/BEHAK/pdf>

CORDEIRO, G. C., (2006). **Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto**, D.Sc., Engenharia Civil, Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE [Rio de Janeiro], XXXIX, 445 p. (COPPE/UFRJ)

COUTINHO, A. S., (1997), **Fabrico e propriedades do betão – Vol.1**, 3 ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 401 p. apud Cordeiro, G.C., 2006.

Federación Interamericana del Cemento. FICEM, (2013). **Informe estadístico 2013** [en línea] [consulta 24 de octubre de 2013] Disponible en: http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf

Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAO, (2015). **Seguimiento del mercado del arroz**. [En línea] [consulta 25 de abril de 2015] Disponible en: <http://www.fao.org/economic/est/publications/publicaciones-sobre-el-arroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>

GANESSAN, K., K. RAJAGOPAL, and K. THANGAVEL, (2008). **Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete**. Science Direct: Construction and Building Materials 22, issue 8, ps. 1675-1683.

Gremial de Silos Arroceros, (2010). **Desempeño ambiental de plantas de silos**. En línea [consulta 16 de junio de 2014] Disponible en: <http://www.mvotma.gub.uy/ciudadania/convocatorias/capacitaciones/item/download/664>

GIACCIO, G.; RODRIGUEZ DE SENSALE, G. and ZERBINO, R., (2007). **Failure mechanism of normal and high strength concrete with rice-husk ash**. Cement and Concrete Composites, Vol. 29, N°. 7, pp.566-574.

GILBERTSON, T.; REYES, O., (2009). **El mercado de emisiones cómo funciona y por qué fracasa**. Fundación Dag Hammarskjöld, colección Critical Currents, N°7. [En línea] [consulta 16 de julio de 2014] Disponible en: <http://www.dhf.uu.se>.

GONZALEZ, I., (2013) **Presentación sobre cenizas de cáscara de arroz: Valorización de residuos en la industria de la construcción**. Maestría de construcción de obras de arquitectura, edición 2012.

HUANG, C; CHANDRA, S., (2010). **The use of rice husk ash in concrete**. En línea [consulta 09 de enero de 2014] Disponible en <http://es.scribd.com/doc/45719494/2-The-Use-of-RHA-in-concrete>

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TECNICAS. UNIT 1035:98. **Materiales puzolánicos. Determinación de actividad puzolánica, índice de actividad puzolánica con cemento.**

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TECNICAS. UNIT 20:2003. **Cementos Portland para uso general.** Definiciones y requisitos. Uruguay, 2003.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TECNICAS. UNIT ISO 679:2009. **Método de ensayo de cementos.** Determinación de resistencias mecánicas. Uruguay, 2009.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, (1996). **Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.** En línea [consulta 09 de enero de 2014] Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdffiles/spnch1-1.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, (2000). **Good practice guidance and uncertainly management in national greenhouse gas inventories,** Japan: IPCC/IGES, 1.1-8.1 p.

International Energy Agency- IEA, (2014). **Key World Energy Statistics** En línea [consulta 10 de junio de 2014] Disponible en: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/keyworld2014.pdf>

ISAIA, G.C. GASTALDINI, A.L.G., MORAES, R., (2001) **Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete.** En Elsevier, Cement and Concrete composites, 2003, N°25, pp. 69–76. En línea [consulta 5 de setiembre de 2013] Disponible en [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Physical%20and%20pozzolanic%20action%20of%20mineral%20additions%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Physical%20and%20pozzolanic%20action%20of%20mineral%20additions%20(2).pdf)

JAMES, J., RAO, M.S., (1986) **Silica from rice husk through thermal decomposition** apud NAIR et al., (2006).

JULIANO B. O. (1985), **Rice: Chemistry and Technology.** American Association of Cereal Chemists apud BEHAK, L.; PERES, W., 2008.

MARTINEZ, J., (2010). **Cogeneración de energía eléctrica y vapor a partir de la quema de la cáscara de arroz.** [En línea] [consulta 5 de noviembre de 2013] Disponible en:

http://www.aca.com.uy/_oldsite/revista/revista%20nro.%2063/Cogeneracion%20de%20energia%20electronica%20y%20vapor.pdf

MASSAZZA, F., (1993). **Pozzolanic cements**. En Elsevier, *Cement and Concrete composites*. Nº 15, pp. 185-214.

MASSAZZA, F., (1998). **Pozzolana and pozzolanic cements**, apud CORDEIRO, G. C., 2006.

MEHTA, P. K., (2002), **Greening of the concrete industry for sustainable development**, *Concrete International*, Vol. 24, Nº 7, pp. 23-28 apud CORDEIRO, G. C., 2006.

MEHTA, P.K, AITCIN, PC., (1990). **Principles underlying production of highperformance concrete**. *Cement Concrete Aggregate*; 12(2):70–8 apud ISAIA et al., 2001. En línea [consulta 15 de abril de 2014] Disponible en <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/283.pdf>

MEHTA, P.K., (1992). **Rice Husk Ash-A unique supplementary cementing material**. *Proceeding of Advances in Concrete Technology*, Athens, CANMET, 2a. Edición, Ontario, pp. 419-443.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M., (2014). **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. Mc Graw Hill, Fourth Edition.

MÉNDEZ, J; PERUGACHE C., (2012). **Causalidad y sensibilidad entre precios de los derechos de emisión europeos y los certificados de reducción de emisiones de mecanismos de desarrollo limpio en el mercado europeo de transacción de emisiones**. *Estudios gerenciales*, Vol. 28, Nº. 124, pp. 141-167. [En línea] [consulta 2 de julio de 2014] Disponible en: <http://zl.elsevier.es/es/revista/estudios-gerenciales-354/linkresolver/causalidad-sensibilidad-entre-precios-los-90218834>

MENÉNDEZ, G; BONAVENTI, E., (2003). **Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag**. En Elsevier, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, Issue 1, pp. 61–67.

MIGUEZ, C.D. (2013). **La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y exergética**. Tesis doctoral Universidad Complutense de Madrid, Instituto Universitario de Ciencias Ambientales. [En línea] [consulta 15 de agosto de 2014] Disponible en:<http://eprints.ucm.es/17794/1/T34108.pdf>

Ministerio de Industria, Energía y Minería, MIEM, (2011). Comisión Interpartidaria para el Análisis Estratégico de la Minería de Gran Porte. **Situación actual de la Minería en Uruguay**. [En línea] [consulta 2 de setiembre de 2014] Disponible en: http://www.cimu.org.uy/wp-content/uploads/2-situacion_actual_mineria_uruguay.pdf

Ministerio de Industria, Energía y Minería-MIEM, 2012. **Balance energético 2012**. En línea [consulta 26 de junio de 2014] Disponible en: <http://www.miem.gub.uy/documents/15386/0/BALANCE%20ENERGETICO%202012.pdf>

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, MVOTMA, Dirección Nacional de Medio Ambiente, DINAMA, Unidad de Cambio Climático, (2007). **Criterios de desarrollo sostenible para la aprobación de proyectos en el marco del Mecanismo para un Desarrollo Limpio**, versión 9. En línea [consulta 27 de marzo de 2014] Disponible en: http://www.cambioclimatico.gub.uy/images/stories/documentos/plan_nacional/proyectos_mdj/criterios_desarrollo_sostenible.pdf

NAIK, T., WU, Z., (2001). **Properties Of Concrete Produced From Multi-Component Blended Cements** Report No. CBU-2001-18 REP-442 International Journal of Cement and Concrete Research Journal, 2002. Department of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science THE UNIVERSITY OF WISCONSIN – MILWAUKEE

NAIR, D.G., K.S. JAGADISH and A. FRAAIJ, 2006. **Reactive pozzolanas from rice husk ash: An alternative to cement for rural housing**. Cement and Concrete Composites. Research 36: 1062-1071. [En línea] [consulta 20 de noviembre de 2013] Disponible en: <http://dyuthi.cusat.ac.in/jspui/bitstream/purl/4642/1/Reactive%20pozzolanas%20from%20rice%20husk%20ash%20An%20alternative%20tocement%20for%20rural%20housing.pdf>

NEVILLE, A. M., (1997), **Propiedades do concreto**, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 828 p. apud CORDEIRO, 2006.

NEVILLE, A.M., (2011). **Properties of Concrete**. Ed. Pearson, Fifth Edition.

NGUYEN V. T., GUANG Y., KLAAS V. B., ALEX L. A. Fraaij, BUI D. D., (2011). **The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete**. En Elsevier, Construction and Building Materials 25 pp. 2030-2035.

RILEM TECHNICAL REPORTS, (1998) Final Report: **Siliceous by-products for use in concrete**. **Materials and Structures**, Vol. 21, N^o.121, pp.69-80.

RODRIGUEZ, G., (2000). **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz**
Orientadora: Profa. Dal Molin, D. Tesse de Doutorado em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 182 p.

RODRIGUEZ, G., (2013). Agencia Nacional de Investigación e Innovación- ANII Fondo Sectorial de Energía- FSE- 1 2011-1-6476. Informe Sobre La Ejecución Técnica Del Proyecto de: **Cemento Pórtland compuesto con cenizas de cáscara de arroz: oportunidad para el ahorro energético y disminución de emisiones de CO₂ en el proceso de elaboración de cementos en nuestro país**.

RODRIGUEZ, G, RODRIGUEZ, I, GODOY, D., (2014). **Efectos De La Incorporación De Ceniza De Cáscara De Arroz Residual Para Elaboración De Cemento Portland Compuesto**. Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Montevideo, Uruguay, noviembre de 2014.

RODRIGUEZ DE SENSALE, G., (2010). **Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials**. Cement and Concrete Composites, Vol. 32, N^o.9, pp.718-725.

RODRIGUEZ DE SENSALE, G., (2006). **Strength development of concrete with rice-husk ash**. Cement and Concrete Composites, Vol. 28, N^o.2, pp.158-160.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. Florianopolis, 1997, 133p. Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina apud RODRIGUEZ, G., (2000).

SILVA, V.G., (2003). **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: directrizes e base metodológica**. Director: Agopyan, V. Tese Doutorado em Engenharia Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 210 p.

STRUBLE, L., GODFREY, J., (2004). **How sustainable is concrete?** En: *International In: International Workshop on Sustainable Development and Technology*, part II, Beijing, China, pp. 201-211. apud CORDEIRO, G. C., 2006.

TEYMA CONSTRUCCION, **Proyectos industriales**, (2014). [En línea] [consulta 25 de junio de 2014] Disponible en: <http://www.teymaconstruccion.com.uy/web/es/proyectos/industrial/industrial13>

United Nations Framework Convention on Climate Change- UNFCCC, (2000). Grupo Consultivo de Expertos sobre la Comunicaciones Nacionales de las Partes no Incluidas en el Anexo I de la Convención, GCE. **Manual del Sector de los Procesos Industriales**. [En línea] [consulta 20 de noviembre de 2013] Disponible en: http://unfccc.int/files/national_reports/non-annex_i_natcom/training_material/methodological_documents/application/pdf/9-bis-handbook-ip-sector.pdf

Uruguay XXI, Promoción de Inversiones y Exportaciones, (agosto de 2014). **Energías Renovables. Oportunidades de inversión**. [En línea] [consulta 12 de noviembre de 2014] Disponible en: <http://www.uruguayxxi.gub.uy/inversiones/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Informe-de-energias-renovables.pdf>

World Bank-WB, (2012), Annual Report, **Carbon finance for sustainable development**. [En línea] [consulta 16 de julio de 2014] Disponible en: http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2013/05/16/000333037_20130516114125/Rendered/PDF/777420AR0201200mbargo0until0May0290.pdf

World Business Council for Sustainable Development- WBCSD, (2005). Cement Sustainable Initiative – CSI. **Environmental and social impact assessment (ESIA) guidelines**. Land and communities, [en línea] [consulta 30 de octubre de 2013] Disponible en http://www.wbcscement.org/pdf/cement_esia_guidelines.pdf

World Business Council for Sustainable Development- WBCSD, (2009). Cement Technology Roadmap – CTR. **Carbon emissions reduction up to 2050**. [En línea] [consulta 7 de octubre de 2013] Disponible en: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>

World Business Council for Sustainable Development-WBCSD, Cement Sustainable Initiative-CSI, 2011, **Cement Industry and CO₂ performance, Getting the Numbers Right**. [En línea] [consulta 5 de octubre de 2013] Disponible en: <http://www.wbcsd.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=11095>

World Business Council for Sustainable Development- WBCSD., Cement Sustainable Initiative CSI, (2012). **Guidelines por Emissions, Monitoring and Reporting in the cement industry**, Vol. 2.

World Business Council for Sustainable Development- WBCSD. Cement Sustainable Initiative - CSI, (2012). **Progress Report Summary PRS** [en línea] [consulta 29 de octubre de 2013] Disponible en: http://www.csiprogress2012.org/CSI_ProgressReport_Summary.pdf