



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

LA EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO CON ÉNFASIS EN LATINOAMÉRICA

Olga Anabela Díaz Ponce

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, abril de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

LA EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO CON ÉNFASIS EN LATINOAMÉRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha noviembre de 2010.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Olga Anabela Díaz Ponce', written over a horizontal line.

Olga Anabela Díaz Ponce

Guatemala, 13 de febrero de 2012

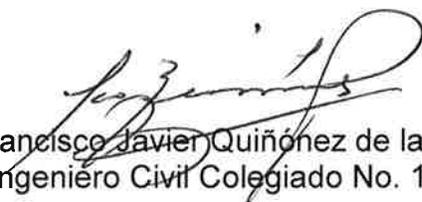
Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación "**La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica**", desarrollado por la estudiante universitaria **Olga Anabela Díaz Ponce**, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por la estudiante **Díaz Ponce**, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,



Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Ingeniero Civil Colegiado No. 1941

FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ
Ingeniero civil colegiado No. 1941



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala, 13 de febrero de 2012

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

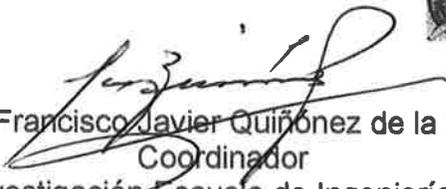
Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **"La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica"**, desarrollado por la estudiante universitaria **Olga Anabela Díaz Ponce**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por la estudiante **Díaz Ponce** satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA


Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
Coordinador

Unidad de Investigación Escuela de Ingeniería Civil -UIEIC-



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de la Unidad de Investigación, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación de la estudiante Olga Anabela Díaz Ponce, titulado LA EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO CON ÉNFASIS EN LATINOAMERICA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, abril de 2012

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **LA EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO CON ÉNFASIS EN LATINOAMÉRICA**, presentado por la estudiante universitaria **Olga Anabela Díaz Ponce**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval shape.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, abril de 2012



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios y a la Virgen María	Por ser esos seres supremos que me brindaron el regalo de la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia.
Mis padres	Carlos Díaz y Guisela de Díaz, por ser mis ejemplos a seguir y por todo el apoyo y el amor que me dedicaron a lo largo de mi carrera y de mi vida entera.
Mis hermanos	Guisela de Dávila y Freddy Dávila, por ser mis guías y brindarme su ayuda en cada momento que lo necesité.
Mi abuela	Flory Krings de Ponce, por creer siempre en mí y comprenderme hasta en los momentos más difíciles.
Mis tíos, primos y sobrinos	Por ser parte importante de este logro.
Mis amigos	Por cada momento compartido en las buenas y malas. Especialmente a Elder Prado, por su apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios y a la Virgen María	Por ser esos seres supremos que me brindaron el regalo de la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de prepararme como profesional en esta casa de estudio, para contribuir de manera positiva a la sociedad guatemalteca.
Mi asesor	Ing. Francisco Javier Quiñónez, por compartir sus conocimientos y dedicarle el tiempo necesario a este trabajo de graduación.
Mis padres	Carlos Díaz y Guisela de Díaz, por ser mis ejemplos a seguir y por todo el apoyo y el amor que me dedicaron a lo largo de mi carrera y de mi vida entera.
Mis hermanos	Guisela de Dávila y Freddy Dávila, por ser mis guías y brindarme su ayuda en cada momento que lo necesité.
Mi abuela	Flory Krings de Ponce, por creer siempre en mí y comprenderme hasta en los momentos más difíciles.
Mis tíos, primos y sobrinos	Por ser parte importante de este logro.

Mis amigos

Por cada momento compartido en las buenas y malas.
Especialmente a Elder Prado, por su apoyo y cariño.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IV
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. CONOCIMIENTOS GENERALES DEL CEMENTO	1
1.1. Qué es el cemento.....	1
1.1.1. Definición.....	1
1.2. Tipos de cementos	2
1.2.1. Cementos naturales.....	2
1.2.2. Cementos artificiales	3
1.2.2.1. Portland	3
1.2.2.2. Aluminato cálcico.....	5
1.2.2.3. Siderúrgico.....	5
1.2.2.4. Puzolánico	5
1.2.2.5. Especiales	6
1.3. Características físicas y químicas del cemento Portland.....	6
1.3.1. Características físicas de los cementos Portland	7
1.3.1.1. Finura de molido	7
1.3.1.2. Tiempo de fraguado.....	8
1.3.1.3. Potencial de hidrógeno	9
1.3.1.4. Expansión y retracción.....	10
1.3.1.5. Calor de hidratación.....	10
1.3.1.6. Rigidez y resistencia mecánica.....	11

1.3.2.	Características químicas de los cementos Portland.....	12
1.3.2.2.	Productos de hidratación del cemento Portland.....	12
1.3.3.	Proceso de hidratación y fraguado del cemento	15
1.3.3.1.	Hidratación	15
1.3.3.2.	Fraguado.....	16
1.4.	Qué es una adición del cemento Portland.....	16
1.4.1.	Definición de adición	16
1.4.2.	Adiciones de los cementos Portland	17
1.4.2.1.	Cenizas volantes	18
1.4.2.2.	Humo de sílice.....	18
1.4.2.3.	Escoria granulada de horno alto.....	19
1.4.2.4.	Puzolanas.....	19
1.4.2.5.	Esquisto calcinado.....	20
1.4.2.6.	Caliza	20
1.5.	Proceso de fabricación del cemento Portland	21
1.5.1.	Obtención y preparación de materias primas.....	22
1.5.2.	Homogeneización y molienda del crudo.....	22
1.5.3.	Pre calentador de ciclones	23
1.5.4.	Fabricación de clínker	23
1.5.5.	Molienda de clínker	23
1.5.6.	Procesos de fabricación del clínker.....	26
1.5.6.1.	Proceso de vía seca.....	26
1.5.6.3.	Procesos de vía semiseca y semihúmeda.....	26
2.	GRANDES CIVILIZACIONES Y EL ORIGEN DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO	29
2.1.	Indicios del origen del cemento	29

2.2.	La China antigua.....	31
2.3.	Los griegos y los romanos	31
2.4.	Civilizaciones del nuevo mundo.....	33
3.	DESCUBRIMIENTO Y EVOLUCIÓN DEL CEMENTO EN SIGLOS ANTERIORES	39
3.1.	Industria del cemento sel siglo XVIII al XIX	39
3.2.	Industria del cemento del siglo XX.....	41
3.3.	Inicios de la industria del cemento en latinoamérica en el siglo XX.....	43
3.3.1.	Primeras décadas.....	43
3.3.2.	La emergencia de la industria cementera.....	47
3.3.3.	Consumo del cemento.....	49
3.3.4.	Década de los 70 y 80	52
4.	LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN LA ACTUALIDAD	57
4.1.	Industria del cemento del siglo XXI.....	57
4.1.1.	Europa	59
4.1.2.	Asia.....	61
4.1.3.	América con énfasis en Latinoamérica	62
4.1.3.1.	América anglosajona	63
4.1.3.2.	Latinoamérica	65
4.2.	Principales productores y consumidores de cemento en el mundo.....	71
4.2.1.	Europa	73
4.2.2.	América	76
4.2.3.	Asia.....	81
4.3.	Situación de Guatemala y el resto de Centro América:	88

5.	ESTUDIOS RECIENTES EN MEJORA DEL CEMENTO DEL FUTURO	95
5.2.	Cementos compuestos elaborados con puzolana natural y escoria granulada de alto horno	98
5.3.	Propiedades y durabilidad de los cementos adicionados con metacaolín.....	100
5.4.	Durabilidad de pastas de cemento api clase b expuestas disoluciones acuosas de iones cloruro, sulfato y magnesio.	103
5.5.	Cemento obtenido a partir de residuos sólidos	105
5.6.	Hidratación del cemento de aluminato de calcio en condiciones de muy elevada alcalinidad	108
5.7.	Hidratación y microestructura de cemento portland sustituido parcialmente con sílice ultrafina	111
5.9.	Predicción de las propiedades mecánicas del cemento en la microescala	114
5.10.	Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento portland caracterización activación alcalina	115
5.11.	Uso de la escoria de cobre en el proceso de fabricación de clínker para cemento portland	116
6.	IMPACTO AMBIENTAL A CAUSA DEL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO	119
7.	LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN EL FUTURO	125
	CONCLUSIONES.....	129
	RECOMENDACIONES	131
	BIBLIOGRAFÍA.....	132

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Portlandita.....	14
2.	Geles C-S-H.....	14
3.	Ettringita.....	15
4.	Proceso de fabricación de cemento I.....	25
5.	Proceso de fabricación del cemento II.....	27
6.	Consumo vrs producción 1900-1930.....	50
7.	Consumo de cemento per cápita en 1929.....	51
8.	Gráfico de Importación de Cemento de Latinoamérica 1900 -1930.....	52
9.	Consumo y producción.....	64
10.	Productores de cemento de la Cembureau 2005.....	74
11.	Producción de países europeos sobresalientes, al 2011.....	75
12.	Consumo en México.....	78
13.	Producción de países americanos sobresalientes, al 2011.....	80
14.	Producción y capacidad mundial 2010-2011.....	82
15.	Producción de cemento por región.....	83
16.	Producción de cemento en Latinoamérica.....	84
17.	Producción de países asiáticos sobresalientes, al 2011 (I).....	85
18.	Producción de países asiáticos sobresalientes, al 2011 (II).....	86
19.	Producción africana y el resto de ciudades para el 2011.....	87
20.	Producción mundial 1900-2011.....	92
21.	Producción latinoamericana 1900-2011.....	93
22.	Producción guatemalteca.....	93
23.	Relación producción mundial y latinoamericana 1900-2011.....	94

TABLAS

I.	Principales óxidos de clínker	4
II.	Tiempo de fraguado de acuerdo con la resistencia mecánica	9
III.	Propiedades que aportan los componentes del cemento	11
IV.	Principales compuestos químicos del cemento no hidratado	13
V.	Porcentaje de elementos componentes	35
VI.	Propiedades mecánicas del cemento maya	36
VII.	Producción de cemento en toneladas 1900-1930	53
VIII.	América Latina y el Caribe, producción 1977-1982, en miles de toneladas	55
IX.	Producción mundial en millones de toneladas	72
X.	Producción de cemento en Centro América	88
XI.	Exportaciones e importaciones de cemento Portland	91

GLOSARIO

Aglomerante	Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico.
Amilopectina	Polisacárido que se diferencia de la amilosa en que contiene ramificaciones que le dan una forma molecular parecida a la de un árbol: las ramas están unidas al tronco central.
Caliza margosa	Roca sedimentaria carbonatada con 10 a 35 % de arcilla.
Cemento belítico	Cemento que ha sido modificado para la reducción de los consumos energéticos en la industria del cemento y a la reducción del impacto ambiental, logrando una mayor durabilidad por su estabilidad química.
Clínker	Producto principal del cemento común y se obtiene como resultado de la calcinación en horno, de mezclas de calizas arcillosas, preparadas artificialmente con adición eventual de otras materias.

Conglomerante	Material capaz de adherirse a otros y dar cohesión al conjunto, por efectos de transformaciones químicas que se producen en su masa y que originan un nuevo conjunto.
Despasivación	Corrosión de metales y aleaciones.
<i>Drywall</i>	Método constructivo consistente en placas de yeso (<i>gypsum</i>) o fibrocemento, fijadas a una estructura reticular liviana de madera o acero galvanizado, en cuyo proceso de fabricación y acabado no se utiliza agua.
Efecto <i>Filler</i>	Fenómeno que tiene que ver fundamentalmente con la capacidad de las partículas finas en llenar u ocupar los espacios disponibles.
Escoria de cobre	Material abrasivo que tiene uso en la limpieza de superficies metálicas, no contaminante, su aplicación es por medio de aire-presión.
Espectrografía	Imagen obtenida por medio de un monitor.
Ettringita	Cristales de sulfo-aluminato cálcico en forma de agujas muy expansiva.
Exudación	Salida de una sustancia o un líquido a través de los poros o las grietas del recipiente que lo contiene.

Feldespáticas	Concerniente al grupo de minerales tectosilicatos, constituyentes fundamentales de las rocas ígneas como los silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio, o mezclas de estas bases.
Hematita	Mineral compuesto de óxido férrico y constituye una importante mina de hierro ya que en estado puro contiene un 70% de este metal.
Ignición	Ocurre cuando el calor que emite una reacción llega a ser suficiente como para sostener la reacción química.
Ignimbrita	Roca ígnea volcánica, ácida y compacta.
Metacaolín	Deshidroxilado que se forma de los minerales de la arcilla caolinita .
Molturabilidad	Facilidad que presenta un material de ser molido.
Protocolo de Kioto	Acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de los gases que causan el calentamiento global y gases industriales fluorados, en un porcentaje aproximado de al menos un 5%, dentro del 2008-2012, en comparación con las emisiones al año 1990.
Reológicas	Concerniente al estudio de la deformación y el fluir de la materia.

Resistencia mecánica	Capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse.
Sinterización	Procedimiento de elaboración de piezas a partir de polvo del material que compone dicha pieza.
WIT	<i>West Texas Intermediate</i> , es un promedio en cuanto a calidad, del petróleo producido en los campos occidentales del estado de Texas (Estados Unidos). Se emplea como precio de referencia para fijar el precio de otros petróleos crudos producidos en medio oriente o el mar del Norte (Petróleo Brent).

RESUMEN

El cemento es uno de los principales materiales utilizados en la industria de la construcción. La demanda y producción a nivel mundial tiene diferentes comportamientos de acuerdo con la región y el desarrollo de los diferentes países. A través de toda la historia de la producción de cemento, este ha ido evolucionando, convirtiéndose en un material que responde a la mayoría de las necesidades mecánicas que las construcciones modernas exigen.

Este trabajo de graduación adentra al lector desde el primer capítulo a conocer las características físicas y químicas del cemento, su estructura, y demás elementos generales. En el segundo capítulo se recopiló información de la historia del uso de materiales cementantes en las civilizaciones antiguas como los griegos, los egipcios, los romanos, incluyendo las civilizaciones maya y azteca. Con esto se marca el inicio de la búsqueda de los ahora conocidos como cementos portland de la actualidad. Cómo se descubrió el cemento portland y cómo se fue modificando entre los siglos XVIII Y XIX, es mencionado en los capítulos tres y cuatro.

La región latinoamericana tiene una gran demanda tanto en el consumo como en la producción de este material, debido al inmenso potencial en construcción que representa. Esto se da ya que la mayoría de los países de la región de los conocidos como “en vías de desarrollo”, su crecimiento se va observando con la aparición de infraestructura a grandes escalas.

Contrario a lo que sucede en los países desarrollados, como los europeos y los norteamericanos, en Estado Unidos y Canadá, la demanda y producción del producto ha disminuido, no solo por la crisis económica que recientemente han sufrido, sino que también por la disminución en infraestructura. Por esta razón empresas transnacionales como Holcim, Cemex y la francesa Lafarge, han cerrado plantas productoras en muchos países europeos y han colocado plantas sucursales en los países latinoamericanos o han comprado acciones de las empresas productoras de cada país, trayendo mejores beneficios y ganancias aún mayores.

Latinoamérica no solo demanda, sino que también produce, teniendo como ejemplos vivos, la situación de Brasil y México, cuya situación actual es de competencia a nivel mundial, siendo los mayores productores de la región. Todo esto se encuentra más especificado por medio de tablas y gráficas en los capítulos cuatro y cinco del presente trabajo.

Por otra parte, la situación del cambio climático y la contribución a la destrucción de la capa de ozono de gases como el dióxido de carbono, provenientes de la fabricación de cemento debido a la producción de clínker, ha sido tema de discusión en los últimos años, por lo que las investigaciones ahora están siendo enfocadas, no solo a la búsqueda de un cemento con las características físicas, químicas y mecánicas ideales, a menor costo, sino que también un cemento amigable con el ambiente, tratando de disminuir la producción de clínker, que en la actualidad asciende a millones de toneladas.

Estas investigaciones se han enfocado en sustituir en algún porcentaje al clínker por materiales cementicios suplementarios, o sustituir algún producto de hidratación del cemento, creando nuevas reacciones que emiten menos gases perjudiciales para el ambiente.

Los capítulo seis y siete están enfocados en la problemática ambiental y los cambios que se han venido dando en la fabricación de nuevos cementos amigables al medio ambiente.

Este trabajo fue realizado como parte del Proyecto de Investigación registrado en el No. 023-2010, correspondiente a la línea FODECYT del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y ejecutado por la Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Civil, a cuyas instituciones se agradece por la oportunidad.

OBJETIVOS

General

Recopilar, ordenar y resumir en un documento la información de la evolución de la industria del cemento a nivel mundial, dando mayor importancia a la región latinoamericana.

Específicos

1. Proporcionar un conocimiento general acerca de los componentes y fabricación del cemento.
2. Conocer los orígenes, desarrollo y evolución de la industria del cemento alrededor del mundo.
3. Proveer información del estado de la industria del cemento en Latinoamérica, tanto en la actualidad como en sus orígenes.
4. Dar a conocer los últimos estudios acerca de mejoras en el cemento y cómo afectarían dichos cambios en el desenvolvimiento de este material en el futuro.
5. Proporcionar información acerca del escenario ambiental, causas, consecuencias, daños y soluciones, que la fabricación del cemento ha ocasionado al medio ambiente a través del tiempo.

6. Visualizar el futuro de la Industria cementera en Latinoamérica y en el mundo.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento que toda persona involucrada en el ámbito de la construcción, desde su planificación, pasando por el diseño y la ejecución, no debe limitarse solo a la noción superficial de los elementos físicos primordiales utilizados en esta industria, sino que conocer más allá sobre sus usos, evolución y consecuencias que esta ha traído. El elemento físico primordial y que sin él no podría ser posible tanta evolución en la industria de la construcción, es el denominado “cemento”, que ha permitido el desarrollo de muchas civilizaciones en el pasado y muchos países en la actualidad.

Por eso, este trabajo se enfoca en esos aspectos que la mayoría ha olvidado, o que nunca han conocido acerca del cemento, uno de los descubrimientos más asombrosos de la vida del ser humano. Entre estos aspectos se pueden mencionar los tipos de cemento; sus componentes, tanto físicos como químicos; las clases de adiciones; el proceso de fabricación haciendo mención a las materias primas; su origen, que abarca desde las primeras mezclas que las civilizaciones antiguas utilizaron para sus edificaciones, hasta los primeros indicios del nacimiento del Portland; el descubrimiento del cemento que se utiliza en la actualidad, con todos sus elementos, personajes destacados y fechas importantes.

Así como también la evolución de la industria en Europa, en Latinoamérica, y alrededor del mundo desde que nace, su desarrollo, hasta llegar a la actualidad y la identificación de las grandes productoras y consumidoras de dicho material alrededor del mundo entero en los últimos tiempos, pasando por Europa, Latinoamérica, África, Asia, entre otras regiones.

La microestructura de cada uno de los elementos que al mezclarlos integran el cemento, son tan relevantes como los procesos de fabricación del mismo. A esto se debe la importancia de las características físicas y químicas, porque teniendo un conocimiento más profundo del comportamiento de los elementos que lo componen, se puede comprender las reacciones que este podría tener, especialmente en su resistencia y durabilidad.

Por lo que se asignó un capítulo exclusivamente para abordar el tema de los conocimientos generales acerca del cemento, entre ellas las características físicas como finura de molido, el tiempo de fraguado, potencial de hidrógeno; características químicas como los componentes y los productos de hidratación; tipos de cementos, procesos de fabricación, los componentes cementicios suplementarios; entre otros temas.

Para la investigación realizada, fue necesario iniciarla buscando información histórica sobre las primeras apariciones que tuvo el cemento como un elemento constructivo. Esto llevó a encontrar información de civilizaciones egipcia, griega, romana, china, maya y azteca. En la civilización maya se han encontrado vestigios de la utilización de un elemento cementante bastante similar al cemento actual, especialmente con resistencias muy parecidas, por lo que datos de estas investigaciones fueron citados en uno de los capítulos de este trabajo. Otra situación curiosa es la de la civilización china, en la que se ha descubierto la utilización del arroz como un tipo de mortero, hace unos 1500 años.

Ya para el siglo XVIII, el ingeniero John Smeaton, en 1758, aceptó el encargo de reconstruir el Faro de Edystone con un material resistente al viento, al fuego y al oleaje. Así empezó a investigar diferentes mezclas de mortero, hasta desarrollar un cemento hidráulico.

Logrando ser patentado en 1824, por James Parker y Joseph Aspdin y fabricado por la combustión conjunta de caliza y carbón, que denominaron Portland Cement por su color oscuro, similar a la piedra de la isla de Portland. Cómo evolucionó entre los siglos XVIII y XX, es mencionada en uno de los capítulos que se abordan en este trabajo.

Para Latinoamérica, la industria cementera tuvo su nacimiento al inicio del siglo XX, teniendo su auge en los años 30, decayendo después debido a la Segunda Guerra Mundial. En la actualidad, Latinoamérica es una región con un gran potencial en construcción de infraestructura, por lo que la demanda del cemento ha ido aumentando en las últimas décadas. Esto se debe a la denominación que se le da a muchos, sino es que a su totalidad, de los países latinoamericanos, de ser “países en desarrollo”, donde el crecimiento demográfico es notablemente grande, por lo tanto también su demanda en vivienda, infraestructura vial, comercial, entre otros.

Contrario a lo que sucede con los países desarrollados, cuya demanda en infraestructura ha disminuido más notablemente desde la crisis económica de 2008; por lo que la mayoría de las empresas transnacionales productoras de cemento, como Holcim, Cemex y Lafarge, han preferido cerrar sus plantas de fabricación en esas ciudades y abrir nuevas en países latinoamericanos, lo que les es de mayor beneficio que pagar los precios altos de costo de transporte del producto. Pero aunque a simple vista parecieran fuentes de trabajo para la región, esto trae consecuencias negativas a la problemática ambiental.

Algo muy importante que hasta hace unos años atrás se le ha puesto el énfasis que requiere, ha sido el impacto ambiental que como consecuencia ha acarreado la industria del cemento en todo el mundo.

Actualmente, existen investigaciones para disminuir la producción de CO₂ que esta industria emite y poder disminuir en algún porcentaje la contaminación.

En los últimos años, se han realizado muchas investigaciones para mejorar la resistencia y funcionalidad del cemento, adicionando componentes o alterando desde su estructura molecular, y de esta manera lograr que este material, que hasta ahora no ha podido ser sustituido por ningún otro, siga evolucionando, trayendo nuevas tecnologías, usos e ideas y continuar siendo el principal elemento del concreto y de la construcción. Todos estos temas aquí mencionados, fueron investigados y son expuestos en este trabajo de graduación.

Este trabajo describe la historia, desarrollo y evolución de la industria del cemento a través del tiempo a nivel mundial y dándole una importancia mayor al área latinoamericana.

Este trabajo fue realizado como parte del Proyecto de Investigación registrado en el No. 023-2010, correspondiente a la línea FODECYT del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y ejecutado por la Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Civil, a cuyas instituciones se agradece por la oportunidad.

1. CONOCIMIENTOS GENERALES DEL CEMENTO

El cemento como mezcla de uso universal posee ciertos elementos y características que lo hacen singular frente a una gran variedad de materiales presentes en la naturaleza y entre los elaborados a través de procedimientos industriales simples o complejos. Para poder visualizar la industria de este producto se debe conocer qué es, su microestructura, su comportamiento frente a ciertos cambios, entre otros.

1.1. Qué es el cemento

A continuación se dará dos de algunos de los conceptos más entendibles y conocidos para la palabra cemento, para empezar a familiarizarse con el tema que se va a desarrollar.

1.1.1. Definición

El cemento es un conglomerante hidráulico; es un producto que mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto en el aire, como bajo agua.

El cemento es un material básico para la edificación y la ingeniería civil. Tiene como propiedad principal la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua.

El endurecimiento de la mezcla ocurre cierto tiempo después del amasado, permitiendo por lo tanto, moldear el producto resultante.

1.2. Tipos de cementos

Los cementos son materiales conglomerantes obtenidos por calentamiento hasta la clinkerización (sinterización) de carbonato cálcico, sílice y alúmina.

Los productos obtenidos son hidráulicos (silicatos y aluminatos cálcicos que fraguan bajo el agua) que se muelen hasta obtener materiales en forma de polvo muy fino. Aunque se trata de materiales artificiales, se distinguen los siguientes dos tipos:

1.2.1. Cementos naturales

Se utiliza para su fabricación calizas margosas (arcillosas). Estos cementos son descritos por la norma UNE 80309-2006 “Cementos naturales. Definiciones, clasificación y especificaciones de los cementos naturales” y designados genéricamente por el prefijo CN, seguido de las letras R o L, haciendo mención si se trata de cementos rápidos o lentos en fraguar. Son el resultado de la calcinación de margas a unos 1000°C. De composición química muy variable, suelen tener más sílice y alúmina y menos cal que los cementos artificiales. Pueden utilizarse en obras de albañilería, pero debido a su baja resistencia no son apropiados para elementos estructurales.

1.2.2. Cementos artificiales

Se mezclan calizas y arcillas para su fabricación, en proporción tal, que toda la cal reaccione con los silicatos convenientemente preparados y dosificados. Son más constantes en su composición que los cementos naturales. La cocción de la mezcla se realiza a una temperatura de entre 1450 y 1480 °C. La masa homogénea obtenida se denomina clínquer, la cual, después de ser triturada finamente, se convierte en el componente básico para la fabricación del cemento. Entre los cementos artificiales se distinguen los siguientes:

1.2.2.1. Portland

El clínker de cemento portland se obtiene por sinterización de una mezcla de materias primas (crudo, pasta o harina finamente dividido, íntimamente mezclado y homogéneo) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y pequeñas cantidades de otras materias.

Las materias primas para la fabricación del cemento Portland consisten esencialmente en caliza, marga, arena silíceas y arcilla. También se emplean otras adiciones tales como yeso o materiales puzolánicos. Las calizas y margas aportan el óxido de calcio y las arcillas son responsables del aporte de los óxidos metálicos.

El proceso de elaboración consiste en mezclar las rocas calcáreas y las arcillas en proporciones adecuadas y molerlas finamente, de manera que el CaO de la caliza y los compuestos de la arcilla (SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) resulten homogenizados adecuadamente.

El producto resultante, denominado polvo crudo, se calcina en un horno a temperaturas de 1450°C-1600°C, donde se produce la fusión incipiente del producto resultante, denominado clínker. El clínker está compuesto fundamentalmente por los cuatro óxidos anteriormente mencionados y conocidos como se describe en la tabla I.

Tabla I. **Principales óxidos de clínker**

Compuesto	Fórmula	Abreviatura
Cal	CaO	C
Sílice	SiO	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	A
Hierro	Fe ₂ O ₃	F
Agua	H ₂ O	H
Anhídrido Sulfúrico	SO ₃	Ŝ
Óxido Magnésico	MgO	M
Óxido Sódico	Na ₂ O	N
Óxido Potásico	K ₂ O	K

Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 30.

1.2.2.2. Aluminato cálcico

Se fabrican con caliza y bauxita (alúmina), obteniéndose aluminatos cálcicos y presentan alta resistencia inicial. Los compuestos que se forman son aluminato monocálcico y silicato bicálcico. No necesita ningún tipo de regulador de fraguado. Llamados anteriormente cementos aluminosos, de endurecimiento muy rápido y, por lo tanto, de muy altas resistencias a cortas edades. De acuerdo con la norma UNE 80310:1996 “Cementos de Aluminato de Calcio” se designan con el prefijo CAC, seguido de la letra R, indicativa de altas resistencias iniciales.

1.2.2.3. Siderúrgico

Mezcla de clínker de Portland, yeso y escoria de alto horno. La escoria de alto horno es un material hidráulico latente, es decir, que posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada. Esta escoria debe de estar constituida por lo menos 2/3 en masa de la suma de CaO, MgO y SiO₂. El resto contiene Al₂O₃ junto con pequeñas cantidades de otros óxidos. La escoria granulada del horno alto se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria en estado de fusión de composición adecuada, procedente de la fusión de mineral de hierro en altos hornos y constituida al menos en dos tercios de su masa por escoria vítrea.

1.2.2.4. Puzolánico

Mezcla de clínker de Portland, yeso y puzolana (material silíceo que mezclado con cal y agua produce compuestos hidráulicos). Los materiales puzolánicos son sustancias naturales o industriales de composición silícea o silicoaluminosas, o bien una mezcla de ambas.

Estos materiales no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan a la temperatura ambiente, con el hidróxido de calcio disuelto y forman compuestos de silicato y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. Estos compuestos son similares a los formados durante el endurecimiento de los materiales hidráulicos..

1.2.2.5. Especiales

Estos no son otros que los cementos de uso general a los cuales se les ha incorporado ciertas propiedades especiales que le agregan utilidad para determinadas aplicaciones particulares. Entre estos se puede mencionar los blancos, de alta resistencia inicial, altamente resistente a los sulfatos, moderadamente resistente a los sulfatos, de bajo calor de hidratación, resistente a la reacción álcali-agregado.

1.3. Características físicas y químicas del cemento Portland

El cemento tiene ciertas características físicas y químicas que permiten se realicen cambios en él, mejorando su rendimiento si se dan de la manera adecuada, ya que por lo contrario se pueden alterar dando como resultados cementos de baja calidad y poco resistentes. A continuación se explicarán brevemente algunas de ellas.

1.3.1. Características físicas de los cementos Portland

Las características físicas de los cementos Portland están íntimamente ligadas con su contextura, como su nombre hace referencia, su forma, tamaño, su manera de reaccionar y transformarse frente a estímulos de origen físico.

1.3.1.1. Finura de molido

Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tiene lugar durante su fraguado y primer endurecimiento.

Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento hidratan solo en profundidades de 0.01 mm, por lo que, si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte.

Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que, en general, resulta perjudicial), el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado, y disminuye su resistencia a las aguas agresivas. Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se llega a una situación de compromiso: el cemento portland debe estar finamente molido, pero no en exceso. Lo deseable es que un cemento alcance sus debidas resistencias, a las distintas edades, más bien por razón de calidad de clínker que por razón de finura de molido. La nuevas normativas no incluyen prescripciones para finura de molido.

1.3.1.2. Tiempo de fraguado

Tiempo que tarda la pasta de cemento en adquirir rigidez, desde el inicio hasta el fin del fraguado. La velocidad de fraguado de un cemento viene limitada por las normas, estableciendo un período de tiempo, a partir del amasado, dentro del cual deben producirse, como se dijo ya, el inicio y el fin del fraguado. Ambos conceptos se definen de un modo convencional, mediante la aguja de Vicat, ya que el fraguado es un proceso continuo que inicia al amasar el cemento y se prolonga por el endurecimiento, sin solución de continuidad. Las penetraciones de la aguja de Vicat sobre una probeta de pasta normal de cemento, en función del tiempo, dan referencia del proceso de fraguado.

El límite inferior que marca la tabla II para el comienzo del fraguado es pequeño y puede resultar insuficiente para muchas obras de hormigón, en las que las distancias de transporte sean grandes. Debe comprobarse, en tales casos, que el principio de fraguado del cemento se aleja del mínimo admitido.

El fraguado es más corto y rápido en su comienzo cuanto más elevada es la finura del cemento. La meteorización de este (almacenamiento prolongado) aumenta la duración del fraguado.

La presencia de materia orgánica (que puede provenir del agua o de arena) retrasa el fraguado y puede llegar a inhibirlo. A menor cantidad de agua de amasado, así como a mayor sequedad del aire ambiente, corresponde un fraguado más corto.

Tabla II. **Tiempo de fraguado de acuerdo con la resistencia mecánica**

Resistencia del cemento	Principio del Fraguado (min)	Final del fraguado (horas)
Muy alta	>45	<12
Alta, Media y Baja	>60	<12

Fuente: Universidad de Castilla- La Mancha.

http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Cementos_RC08.pdf. Consulta: 13 de septiembre de 2011.

1.3.1.3. Potencial de Hidrógeno

Es muy alcalino a causa de la presencia de portlandita. Desde el punto de vista de la durabilidad la portlandita, es la mayor contribuyente a la elevada alcalinidad o reserva alcalina del hormigón, manteniendo al material en la zona de pasivación del acero de las armaduras, lo que las protege de una posible oxidación.

“Al ser el producto hidratado de mayor solubilidad, actúa como una disolución amortiguadora del pH, impidiendo fenómenos de degradación, que se basan en una acidificación de la fase acuosa de los poros.”¹ (Massana, 2010, p.41). Por otro lado, hace al hormigón más vulnerable frente a compuestos ácidos y su mayor solubilidad posibilita una teórica disminución de la densidad del material, al encontrarse expuesto a fluidos.

¹ MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 41.

1.3.1.4. Expansión y retracción

Los ensayos de estabilidad de volumen tienen por objeto manifestar, a corto plazo, el riesgo de expansión tardía que puede tener un cemento fraguado debida a la hidratación de óxido de calcio y/o de óxido de magnesio libres. La retracción es debida al agua de amasado no combinada.

La retracción por secado es lo que la mayoría considera “la verdadera contracción”. Este tipo involucra el movimiento y pérdida de agua dentro de los poros extremadamente pequeños de la pasta hidratada de cemento y desde el interior de la estructura de los productos de hidratación o gel, que modifica el volumen en el concreto. La retracción por carbonatación ocurre debido a la reacción del cemento hidratado con el dióxido de carbono en el aire, en presencia de humedad.

1.3.1.5. Calor de hidratación

La propiedad de liga de las pastas de cemento se debe a la reacción química entre el cemento y el agua, llamado hidratación, la cual provoca una reacción exotérmica que produce calor.

El término hidratación es una descripción global de varios fenómenos a raíz de la reacción química del cemento Portland y agua. Esta reacción deriva la formación de una pasta de cemento hidratado creando masa sólida cohesiva y adherente, el elemento esencial del concreto.

Tabla III. **Propiedades que aportan los componentes del cemento**

Propiedades	S₃C	S₂C	C₃A	C₄AF
Velocidad de hidratación	Grande	Pequeño	Instantánea	Grande
Calor de hidratación	Grande	Pequeño	Grande	Pequeño
Resistencia mecánica	Grande y pronta	Grande y tardía	Escasa	Escasa
Resistencia química	Aceptable	Buena	Malísima	Buena

Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de Morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 32.

1.3.1.6. Rigidez y resistencia mecánica

La pasta al fraguar adquiere rigidez y, con el tiempo, resistencia. La resistencia mecánica de un hormigón será tanto mayor cuanto mayor sea la del cemento empleado.

Pero esta característica no es la única que debe buscarse, ya que por sí sola no garantiza otras igual de necesarias, o quizás más como la durabilidad. Como resistencia de un cemento se entiende la de un mortero normalizado amasado con arena de características y granulometría determinadas y con relación agua/cemento establecida.

La tabla III describe cómo actúan algunas de las propiedades físicas del cemento de acuerdo con sus componentes químicos.

1.3.2. Características químicas de los cementos Portland

Las características químicas de los cementos Portland están íntimamente ligadas a las reacciones químicas que se crean al estar frente a estímulos de origen químico.

1.3.2.1. Componentes químicos del cemento Portland

Todos están compuestos de óxidos de silicio, aluminio y calcio y son los mostrados en la tabla IV.

- Silicato tricálcico (S_3C): aporta resistencia inicial.
- Silicato bicálcico (S_2C): aporta resistencia a largo plazo.
- Aluminato tricálcico (C_3A): aporta resistencia inicial. Acelera la velocidad de fraguado, mientras que el yeso controla su proceso de hidratación.
- Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF): acelera el fraguado. Los óxidos de hierro actúan como fundentes. Dan el color gris al cemento.

1.3.2.1. Productos de hidratación del cemento Portland

Al entrar en contacto con el agua, los componentes del cemento reaccionan (se hidratan), formando productos:

- Portlandita: cristales de hidróxido cálcico (cal libre) .Constituye entre el 20-25% del volumen de la pasta de cemento hidratado.

Apenas contribuye a la resistencia, debido a que su carácter enlazante es mínimo, por el mayor número de cristales. Desde el punto de vista de la durabilidad, la portlandita, es la mayor contribuyente a la elevada alcalinidad del hormigón, protegiendo al acero de una posible oxidación. Impide fenómenos de degradación por su solubilidad. Figura 1.

Tabla IV. **Principales compuestos químicos del cemento no hidratado**

Compuesto	Fórmula	Abreviaturas	Porcentaje
Silicato Tricálcico (alita)	3CaOSiO_2	S_3C	40-60
Silicato bicálcico (belita)	2CaOSiO_3	S_2C	30-20
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A	7-14
Ferroaluminato Tetracálcico (celita)	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5-12

Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 30.

- Geles tobermoríticos: estructuras laminares formadas por silicatos y aluminatos cálcicos hidratados (CSH). Entre las láminas se sitúan moléculas de agua que se polarizan. Es el componente mayoritario de la pasta de cemento hidratada, aproximadamente 50-60% del volumen total, y se considera el más importante por su aportación a las propiedades mecánicas de la pasta. Figura 2.

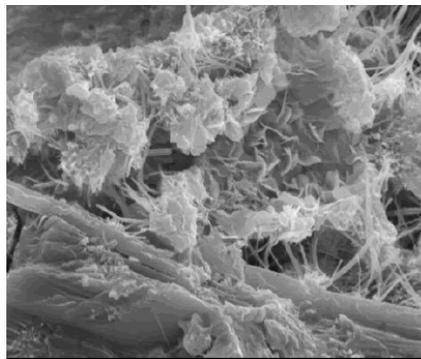
- Ettringita: cristales de sulfo-aluminato cálcico en forma de agujas (muy expansiva) . Estos compuestos constituyen un 15-20% del volumen de la pasta de cemento hidratado y, aunque contribuye en muy pequeña proporción a las resistencias del producto final, juega un papel muy importante en cuanto a la durabilidad en medios sulfatados. Figura 3.

Figura 1. **Portlandita**



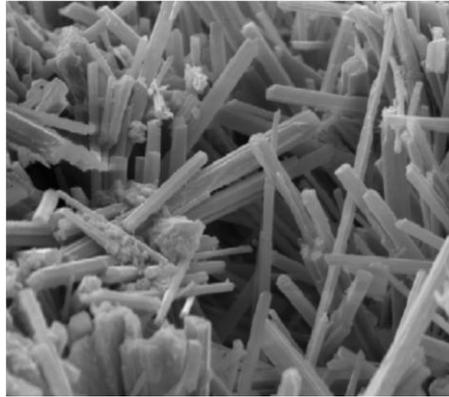
Fuente: BARLUENGA BADIOLA, G. Tema 3. Cementos. p. 14.

Figura 2. **Geles C-S-H**



Fuente: BARLUENGA BADIOLA, G. Tema 3. Cementos. p. 14.

Figura 3. **Ettringita**



Fuente: BARLUENGA BADIOLA, G. Tema 3: Cementos. p. 14.

1.3.3. Proceso de hidratación y fraguado del cemento

Uno de los principales procesos que sufre el cemento en contacto con el agua son la hidratación y el fraguado. De la correcta reacción entre los componentes depende si su resistencia alcanzará los valores esperados.

1.3.3.1. Hidratación

Para producir las reacciones químicas que provocan el endurecimiento del cemento es necesario añadir agua. Este proceso se define como hidratación y los productos que se forman, son productos de hidratación. “El cemento es un sistema químico de componentes anhidro inestables, que al combinarse con agua forman compuestos hidratados estables que tienen la propiedad de adherirse a los granos de áridos, formando una red resistente.”²

² MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 35.

1.3.3.2. Fraguado

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

1.4. ¿Qué es una adición del cemento Portland?

Las adiciones han sido usadas desde hace un tiempo para mejorar las características tanto físicas como químicas de los cementos; a continuación se hará una breve explicación de ellas.

1.4.1. Definición de adición

Compuestos orgánicos o inorgánicos que modifican las propiedades de los materiales conglomerados en estado endurecido. Pueden estar incorporadas al cemento (inorgánicas). Las adiciones pueden ser activas, cuando reaccionan con los productos de hidratación del Clínter, variando la resistencia, o inactivas, que no aportan resistencia. “Si tienen una elevada finura, mejoran la homogeneidad”.³

³ BARLUENGA BADIOLA, Gonzalo. Tema 3: Cementos. p. 3.

Se debe tener claro que al hablar de adición y aditivo no se refiere a lo mismo. Como ya se dijo, la adición se refiere a materiales orgánicos o inorgánicos que modifican propiedades de los conglomerantes desde la homogeneización de la materia prima y sus productos de hidratación, mientras que los aditivos son sustancias químicas agregadas para modificar propiedades después de su proceso de fabricación.

1.4.2. Adiciones de los cementos Portland

Se ha hablado últimamente de los materiales cementicios suplementarios, llamados también adiciones minerales que contribuyen al endurecimiento del concreto a través de actividad hidráulica o puzolánica. Ejemplos típicos pueden ser la ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice, los cuales pueden ser usados individualmente o combinados en cementos portland o mezclas de cemento. Estos materiales reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, liberado en la hidratación del cemento portland, para formar los componentes de este.

A menudo son agregados al concreto para hacer las mezclas más económicas, reduciendo la impermeabilidad, incrementando la resistencia o modificando otras propiedades. Las más usadas son:

- Filler calizo
- Cenizas volantes
- Escorias
- Puzolanas
- Humo de sílice o microsílíce

1.4.2.1. Cenizas volantes

Se obtienen por precipitación de cenizas de hornos alimentados con carbón pulverizado. Se distinguen dos tipos:

- Ceniza volante silíceas (V): es una puzolana industrial en forma de polvo fino constituido de sílice reactivo y alúminas partículas esféricas. (Se utilizan en la fabricación de cementos SR y MR.
- Ceniza volante calcárea (W): es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas o puzolánicas. Consta esencialmente de CaO reactivo, sílice reactivo y alúmina.

1.4.2.2. Humo de sílice

Es un subproducto de la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos eléctricos de arco, para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio.

Está constituido por partículas muy pequeñas con alto contenido de sílice amorfa (es muy reactivo). Reacciona con la portlandita produciendo geles tobermoríticos (C-S-H). Se utiliza en la fabricación de cementos SR y MR y en hormigones de altas prestaciones (HAP). Densifica la matriz de cemento (fuerte aumento de resistencia) y reduce la permeabilidad (HAP).

En general, es bien conocido que la incorporación de escorias, puzolanas y otros materiales, modifican la estructura de los poros y asimismo, la permeabilidad del cemento. En términos generales, se reduce la absorción capilar y se incrementa la resistencia a la penetración de cloruros.

Sin embargo, es necesaria una adición de buena calidad y en proporción óptima para obtener estas características.

1.4.2.3. Escoria granulada de horno alto

Se obtiene por enfriamiento rápido en estado de fusión del mineral de hierro en un horno alto. Aunque su composición es variable, al menos dos tercios de su suma debe estar constituida por la suma de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y dióxido de silicio (SiO₂) el resto contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) y otros compuestos. Las escorias de horno alto tienen capacidad hidráulica latente o potencial. Si estas se mezclan simplemente con agua, se recubren de una delgada capa protectora empobrecida en Ca⁺². En medios alcalinos (como los que se dan en medios cementantes) la reacción de hidratación continúa procediendo lentamente.

1.4.2.4. Puzolanas

Las puzolanas naturales son sustancias de composición silíceas y/o silico-aluminosas, de origen volcánico o sedimentario, con una composición química y mineralógica adecuadas. Las puzolanas naturales calcinadas son materiales del mismo origen pero activados térmicamente. Están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo (SiO₂) y óxido de aluminio (Al₂O₃), además de óxido de hierro (Fe₂O₃) y otros óxidos.

Los materiales puzolánicos no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos reaccionan con la portlandita formada en el proceso de hidratación del cemento Portland, dando como resultado final compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio.

De este modo, este tipo de cementos compuestos dispone de una menor reserva de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), presentando como contrapartida mayores proporciones de gel C-S-H que el cemento portland sin adiciones, proporcionándole, de esta manera, una mayor resistencia mecánica y una buena durabilidad frente a algunos ambientes agresivos.

1.4.2.5. Esquisto calcinado

Contiene fases del clínker, principalmente silicato bicálcico y aluminato monocálcico (hidráulico y puzolánico). El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800°C .

Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, el esquisto calcinado contiene fases de clínker y proporciones mayores de óxidos puzolánicamente reactivos. En consecuencia, en estado finamente molido, el esquisto calcinado presenta propiedades hidráulicas como las del cemento portland, así como propiedades puzolánicas.

1.4.2.6. Caliza

A diferencia del resto de adiciones comentadas, que pueden ser consideradas como activas, el filler calizo es químicamente inerte. Es un material de naturaleza inorgánica y origen mineral compuesto principalmente por carbonato cálcico (al menos el 75%) y con un contenido en arcilla menor al 1,2%. Puede utilizarse para aumentar la cantidad de finos (polvo), de la fracción menor de 0.125 mm, por ejemplo en hormigones autocompactantes.

Debido a que el fino que se elimina en las canteras durante la fabricación de áridos calizos triturados, es un residuo de difícil colocación que suele ir a vertederos inertes, así es la adición de menor coste y con cuya recuperación se hace la fabricación de hormigón más sostenible. Como se trata de un inerte, no tiene reacción hidráulica, pero aumenta la cohesividad necesaria para estos hormigones, disminuye la retracción química, y aumenta la durabilidad.

En general, en el campo del prefabricado y donde la demanda de resistencia inicial sea elevada, la adición más recomendada es el filler calizo. Sus prestaciones de resistencia inicial elevada lo hacen adecuado para la elaboración de hormigón, tanto en masa como armado, cuando se requiera un desencofrado rápido. También se utiliza para prefabricados ligeros, piezas de hormigón visto o arquitectónico y la elaboración de morteros preparados.

1.5. Proceso de fabricación del cemento portland

El proceso de fabricación del cemento se puede resumir en cinco subprocesos, que básicamente son los siguientes:

- Obtención y preparación de materias primas
- Homogeneización y molienda de crudo
- Precalentador de ciclones
- Fabricación de clínker
- Molienda de clínker

1.5.1. Obtención y preparación de materias primas

El proceso de fabricación del cemento comienza con la extracción de las materias primas que se encuentran en yacimientos. Las canteras se explotan mediante voladuras controladas, en el caso de materiales duros como caliza y pizarras, mientras que en el caso de materiales blandos, como arcillas y margas, se utilizan excavadoras para su extracción.

Una vez extraído y clasificado el material, se procede a su trituración hasta obtener una granulometría adecuada para el producto de molienda y se traslada a la fábrica, para su almacenamiento antes de la homogeneización.

1.5.2. Homogeneización y molienda del crudo

El material es almacenado en capas uniformes para ser posteriormente seleccionadas de forma controlada.

La prehomogeneización permite preparar la dosificación adecuada de los diferentes componentes reduciendo su variabilidad. Posteriormente, todos estos materiales son puestos en molinos verticales o de bolas, para reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno. En el molino vertical se tritura el material a través de la presión que ejercen sus rodillos sobre una mesa giratoria. De allí en adelante, la materia prima se almacena en un silo para incrementar la uniformidad de la mezcla.

1.5.3. Precalentador de ciclones

Se distinguen cuatro tipos de procesos de fabricación, en función de cómo se procesa el material antes de la entrada en el horno de clínker: vía seca, vía semiseca, vía semihúmeda o vía húmeda. La alimentación al horno se realiza a través del precalentador de ciclones, que calienta la materia prima para facilitar su cocción. La harina o crudo (materia prima molida) se introduce por la parte superior de la torre y va descendiendo por ella. Mientras tanto, los gases provenientes del horno, que están a altas temperaturas, ascienden a contracorrientes, precalentando así el crudo que alcanza los 1000°C antes de entrar al horno.

1.5.4. Fabricación de clínker

A medida que la harina va avanzando en el interior del horno, mientras este rota, la temperatura va aumentando hasta alcanzar los 1,500 °C. A esta temperatura se producen reacciones químicas que dan lugar al conocido clínker. A la salida del horno, el clínker se introduce en el enfriador, que inyecta aire frío del exterior para reducir su temperatura de los 1,400°C a los 100°C.

El aire caliente generado en este dispositivo se introduce nuevamente en el horno para favorecer la combustión, mejorando así la eficiencia energética del proceso.

1.5.5. Molienda de clínker

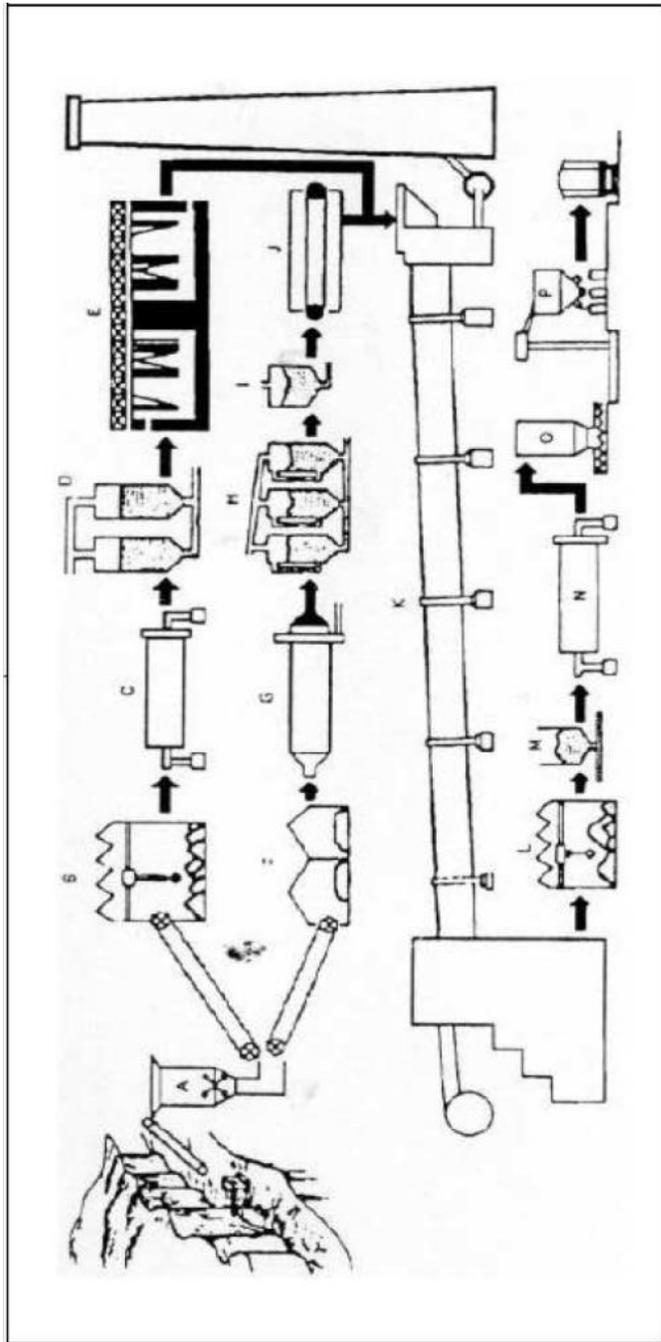
Con el clínker preparado, se mezcla con yeso y adiciones, en proporciones adecuadas, dentro de un molino de cemento. En su interior los materiales se muelen, se mezclan y homogeneizan.

Los molinos pueden ser de rodillos (horizontales y verticales) y de bolas. Este último consiste en un gran tubo que rota sobre sí mismo y que contiene bolas de acero en su interior. Gracias a la rotación del molino, las bolas colisionan entre sí, triturando el clínker y las adiciones, hasta lograr un polvo fino y homogéneo: el cemento.

Las distintas calidades del cemento se obtienen con la adición de materiales como escorias de alto horno, humo de sílice, puzolanas naturales, cenizas volantes y calizas ya mencionadas, que le permiten alcanzar determinadas características.

La figura 4 muestra el proceso para la fabricación del cemento en el siguiente orden: machacado, almacenamiento-humectación (proceso húmedo), pulverizado, dosificación, recipiente de almacenamiento de la mezcla pastosa, premezclado (proceso seco), pulverizado-secado, mezclado, granulación, secado, horno rotativo, escoria, aditivos, pulverizado, almacenamiento, embalado.

Figura 4. Proceso de fabricación del cemento I



Fuente: BARLUENGA BADIOLA, G. Tema 3: Cementos. p. 2.

1.5.6. Procesos de fabricación del clínker

Los procesos de fabricación del clínker pueden darse por las siguientes vías:

1.5.6.1. Proceso de vía seca

La materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverizada. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno. El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno, si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).

1.5.6.2. Proceso de vía húmeda

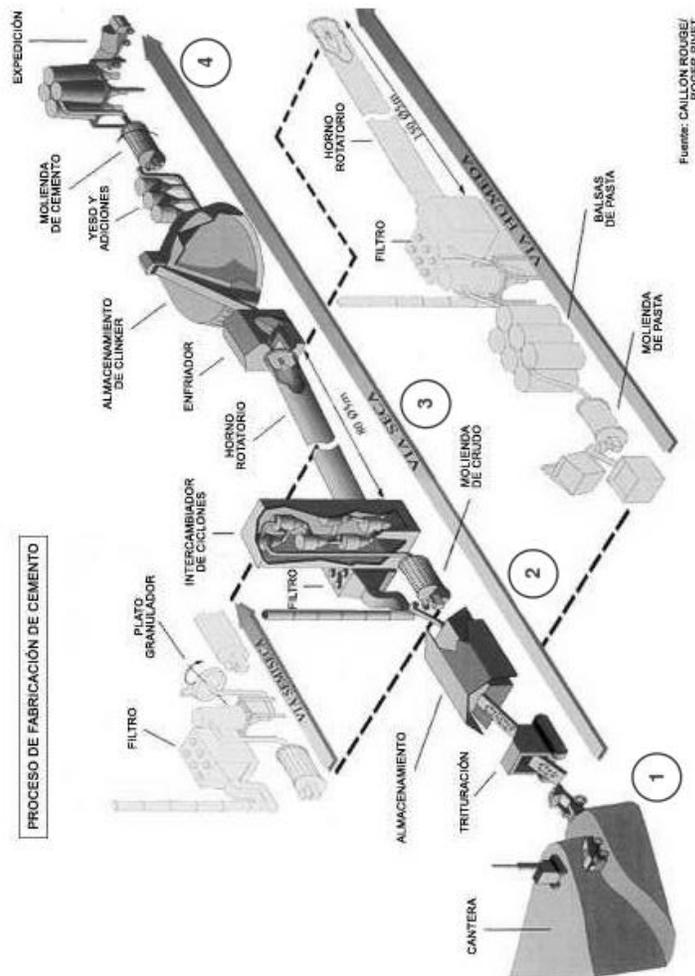
Este proceso es utilizado normalmente en aquellas materias primas de alto contenido en humedad. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta con agua resultando una pasta con contenido de agua de un 30-40 % que es alimentada en extremo más elevado del horno de clínker.

1.5.6.3. Procesos de vía semiseca y semihúmeda

El material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua respectivamente, al material obtenido en la molienda de crudo. Se obtienen "pellets" o gránulos con un 15-20 % de humedad, que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno. Cuando el material alcanza la entrada del horno, el agua se ha evaporado y la cocción ha comenzado.

En todos los casos, el material procesado en el horno rotatorio alcanza una temperatura entorno a los 1450°. Es enfriado bruscamente al abandonar el horno en enfriadores planetarios o de parrillas, obteniéndose de esta forma el clínker. La figura 5 muestra la manufactura del cemento con los diferentes procesos de fabricación del clínker.

Figura 5. Proceso de fabricación del cemento II



Fuente: CEMENTOS LAMONA. <http://www.lamona.biz/EL%20CEMENTO-1/historia%20del%20CEMENTO.pdf>. p. 3. Consulta: Septiembre 2010

2. GRANDES CIVILIZACIONES Y EL ORIGEN DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

2.1. Indicios del origen del cemento

De acuerdo con algunas investigaciones, los hallazgos más antiguos de los que se tiene conocimiento sobre el uso de mezclas cementantes datan de los años 7000 y 6000 a. C. cuando en las regiones de Israel y la antigua Yugoslavia, respectivamente, en una cabaña de Lepensky Vir, se encontraron vestigios de los primeros pisos de concreto a partir de calizas calcinadas

Parte de una de las pirámides de Gizeh (2.600 a.C.) fue levantada con hormigón, y en el año 1950 a. C. se emplearon mezclas similares para rellenar muros de piedra; así se construyó el mural de Tebas en Egipto, donde se conservan escenas de hombres fabricando hormigón y aplicándolo en una obra. En el año 4000 a.C. los egipcios utilizaron yeso calcinado impuro para realizar enlucido. Años después, estas mezclas comenzaron a ser utilizadas como material estructural.

Mientras que en el año 2000 a. C. los griegos y romanos produjeron cal a partir de la piedra caliza calcinada. Luego en el 300 a.C. se dio el primer paso para la fabricación del concreto u hormigón, creándose el mortero de cal puzolana. Entre el año 14 d .C y 120 d.C. se creó el concreto romano (cal puzolana más áridos) y se construyó el primer techo de la historia con este tipo de material en el domo de la Iglesia Santa María de los Mártires.

La civilización romana utilizaba el hormigón en la construcción de grandes edificios, y también en la red de agua potable y en la evacuación de aguas residuales.

El anfiteatro de Pompeya, construido en el año 75 a.C., muestra anillos de hormigón en su perímetro. El Coliseo de Roma, construido en el año 82 d.C., contiene hormigón en los cimientos, los muros interiores y la estructura. El Panteón de Roma, construido en el año 127 d.C., utilizó un hormigón aligerado para construir la cúpula, de 50 m de diámetro. Así como también diversas canalizaciones de agua. Después del gran papel del hormigón en las construcciones del Imperio Romano, no se encuentran muestras de su uso hasta el año 1.200, en que se vuelve a utilizar para la construcción de grandes obras como la Catedral de Salisbury en Inglaterra, cuyos cimientos están hechos de hormigón.

Mientras todo esto ocurría en el viejo mundo, en el nuevo mundo las civilizaciones precolombinas como las mayas, también tuvieron sus propios avances en este campo entre el año 300 a.C. y 1000 d. C durante el cual se creó el cemento y concreto maya.

Los egipcios utilizaban como material de construcción el adobe y la piedra para muros de contención, portadas y pavimentos. La madera era utilizada en los techos y en los revestimientos de las construcciones. Posteriormente, se hicieron mezclas de cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas; este fue el primer concreto de la historia.

2.2. La China antigua

Los constructores de los antiguos edificios chinos utilizaban el arroz como material principal tanto en las labores de edificación como en la restauración. Este "ingrediente" contiene amilopectina, un tipo de polisacárido, más eficaz que la cal por su resistencia a las altas temperaturas y al agua.

A pesar de ser la madera y el ladrillo los materiales más utilizados en la antigua China para la construcción, el estudio liderado por el doctor Bingjian Zhang, citado en Instituto de Educación Internacional (2010) concluye que "el arroz se usaba para rellenar los huecos existentes entre los bloques de piedra hace 1,500 años. Para ello, los arquitectos de la época trituraban el arroz hasta que se convertía en una especie de masa pegajosa".

Según Zhang, el uso del arroz en las construcciones "fue uno de los grandes hitos tecnológicos de su tiempo" ya que se empleaba en pagodas, tumbas y edificios. Muchas de estas estructuras lograron sobrevivir a los terremotos, según precisan los investigadores.

2.3. Los griegos y los romanos

Los griegos y los romanos empleaban al principio caliza calcinada que es un tipo de roca sedimentaria constituida principalmente por carbonato de calcio. Los griegos empleaban la cal mezclándola con arena lo que los llevó a descubrir que ciertas arenas de origen volcánico, molidas y mezcladas con la cal producían morteros, que son mezclas firmes y resistentes.

En el Mediterráneo Occidental, cerca del año 500 a. C., los antiguos griegos adoptaron el arte de hacer concreto y más tarde, en el año 300 a. C. la civilización romana copió algunas técnicas para construir varias de sus obras, entre ellas el Foro Romano. Durante el siglo 11 a. C. en la población de Puzzoli, mezclando caliza calcinada con finas arenas de origen volcánico, se desarrolló el cemento puzolánico.

Esta mezcla fue empleada para la construcción del Teatro de Pompeya en el año 75 a. C. Posteriormente, utilizando rocas de origen volcánico como agregado liviano y jarrones de barro incrustados para aligerar el concreto, se construyó el Coliseo Romano y el domo del Panteón con 50 metros de diámetro y con la caída del Imperio Romano el uso del concreto desapareció y fue recuperado por los ingleses como, se mencionó anteriormente.

Cuando los romanos conquistaron a los griegos, estos últimos les heredaron todo el conocimiento que tenían sobre los morteros. Los romanos edificaron estructuras que aún siguen en pie como muestra de la durabilidad de sus materiales de construcción.

El concreto de la antigua Roma ha resistido el ataque de los elementos de más de 2.000 años. Una estructura romana más inusual que muestra sus avances técnicos es el Panteón, un edificio de ladrillo visto que ha resistido los estragos de la erosión en perfecto estado. Por encima de todo, este edificio humilla al ingeniero moderno no solo en su esplendor artístico, sino también porque no hay barras de acero para hacer frente a las fuerzas de tracción como el moderno.

La gente del Medio Oriente hizo paredes en sus fortificaciones y casas golpeando arcilla húmeda entre las formas, a menudo llamado adobe. Para proteger las superficies de la arcilla de la erosión, los antiguos descubrieron que una capa húmeda de fina piedra caliza blanca, quemados químicamente se combinan con los gases en el aire para dar protección. Se puede intuir que el descubrimiento del pseudoconcreto ocurrió hace unos 200 años antes de Cristo, cuando una capa de cal se aplicó a una pared hecha de origen volcánico, ceniza puzolánica cerca de la localidad de Pozzuoli, en Italia.

Una reacción química se llevó a cabo entre los productos químicos en la pared de cenizas volcánicas (sílice y pequeñas cantidades de aluminio y óxido de hierro) y la capa de cal (hidróxido de calcio) que se aplica a la pared. Más tarde se descubrió que la mezcla de un poco de ceniza volcánica en un polvo fino con la cal húmeda hizo una capa más gruesa; pero también se produce un producto duradero que puede ser sumergido en el agua, algo que el producto de yeso de cal y arena húmeda no pudo igualar.

2.4. Civilizaciones del nuevo mundo

Las civilizaciones mesoamericanas (México y América Central) y las andinas, utilizaron materiales cementantes para la edificación de sus majestuosas e impresionantes construcciones, de esta manera se afirma que la búsqueda de un material con las características del concreto actual ha sido un fin muy antiguo.

En el caso de la cultura Inca, los muros eran construidos con piedras debidamente talladas y pulimentadas, las que unían con admirable precisión sin emplear ninguna argamasa que les sirviera como mezcla o elemento de unión.

Esta solidez ha hecho que los conjuntos arquitectónicos permanezcan inalterables con el paso del tiempo.

Se puede decir que el uso de materiales cementantes por la civilización maya fue heredado por sus antecesores, los Olmecas. Los grandes avances que tuvieron en métodos y materiales de construcción en la época conocida como de máximo esplendor maya, les permitió la construcción de edificaciones de gran dimensión, utilizando la caliza como base para la elaboración de morteros, estucos y más tarde concretos.

Los estucos se utilizaron para la decoración exterior e interior; los morteros se utilizaron para juntar piedras en la construcción de bóvedas, muros, gradas etc.; por último, los concretos fueron elaborados con material cementante mezclada con agregados de diferentes dimensiones con fines propiamente estructurales, como muros de contención y probablemente para pilas y estribos para puentes, obras de protección, entre otras.

Al inicio, en el caso del concreto, era utilizado un tipo de cemento ciclópeo con mezcla de agregados de diferentes tamaños. Con el tiempo, los ingenieros mayas se fueron dando cuenta de las ventajas de este material, y lo perfeccionaron; graduaron la cantidad de agregados, hasta conseguir una mezcla homogénea, con características similares a las de los concretos utilizados actualmente. Se ha supuesto que el cemento maya fue elaborado por molienda y quemado de piedra caliza y cantidades de arcilla a no más de 900°C, mientras que el actual es elaborado a temperaturas mayores a los 1100°C, necesarios para la formación de silicatos y aluminatos.

Tabla V. **Porcentaje de elementos componentes**

Elemento	Estuco	Mortero	Concreto	Grava	Cemento Portland
C	23,59	20,02	13,17	19,22	12,66
O	39,64	23,73	38,42	42,72	44,24
Na					3,31
Mg	5,75	1,57	5,48	3,48	1,37
Al	4,11	3,84	1,17	1,67	2,70
Si	4,2	6,65	2,82	3,07	9,59
S					1,30
K		0,99			0,92
Ca	19,06	36,98	38,01	28,44	22,66
Fe	3,65	4,87		0,71	
P		1,35		0,69	
Y			0,93		
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: RAMIREZ, Horacio; PÉREZ, Ramiro; DÍAZ, Heriberto. El cemento y el concreto de los mayas. p. 278.

En la tabla V se muestran porcentajes de componentes de las diferentes mezclas cementantes mayas y el cemento Portland actual, donde se observa que la mayoría de los cuales no varía demasiado.

De acuerdo con los estudios de los autores Horacio Ramírez, Ramiro Pérez y Heriberto Díaz en 1999, los resultados obtenidos después de realizar ensayos de microscopía, difracción de rayos X y espectrografía al material cementante maya, se concluyó que no existían diferencias químicas entre los estucos, morteros y concretos mayas. Así como también se analizaron las gravas calizas representativas de las rocas utilizadas para la obtención de la cal y se observó casi el mismo porcentaje de los componentes que los contenidos en la matriz cementante maya.

En el mismo estudio, las muestras de concreto obtenidas indican que los agregados estaban bien graduados, con tamaño máximo de 40 mm y con una buena compactación, ya que se tienen porcentajes de vacíos normales y los pesos volumétricos son mayores de 1,8 gr/cm³ (17,6 Kn/m³). Estas observaciones indican que se conocían técnicas para el mezclado transparente, colocación y compactación del concreto, que obtuvieron resultados similares a los de las técnicas recientes.

Tabla VI. **Propiedades mecánicas del cemento maya**

Probeta	Peso volumétrico		Resistencia a compresión simple	
	gr/cm ³	(kN/m ³)	kg/cm ²	(MPa)
I	1,87	(18,3)	58	(5,7)
II	1,82	(17,8)	53	(7,2)
III	1,804	(17,7)	60	(5,9)

Fuente: RAMIREZ, Horacio; PÉREZ, Ramiro; DÍAZ, Heriberto. El cemento y el concreto de los mayas. p. 281.

Con las probetas obtenidas en el área de Yaxchilan, Chiapas México, se realizaron pruebas de resistencia, las cuales resultaron bajas, debido a que fueron tomadas de restos expuestos a la intemperie y a las inclemencias del tiempo, ya que no fue permitido sacar muestra de las edificaciones en sí. Se obtuvo un promedio de resistencia de 66 kg/cm^2 (6,5 MPa), resultó bajo por los motivos ya mencionados, sin embargo, resulta suficiente para los fines estructurales que no exigen esfuerzos mayores de 25 kg/cm^2 (2.4 MPa); es de esperarse resistencias mayores en las condiciones originales, lo cual puede resultar aparente una vez se ensayen probetas de muestras más sanas.

De hecho, esto ya se ha comprobado con ensayos recientes en muestras de mejor consistencia con resistencias de 140 a 170 kg/cm^2 (13,7-16,7 MPa). En la tabla VI se muestran las resistencias obtenidas con tres diferentes probetas. Los materiales cementantes fueron utilizados por los mayas de forma masiva y variada. Se estima que un 6,2% de las construcciones mayas corresponde a este tipo de materiales. Si se toma en cuenta, la zona de Tikal en Guatemala, donde existen numerosos edificios repartidos en un área de 16 km^2 y con una altura hasta de 72 m, se podrá intuir la importancia que tuvieron estos elementos.

Referente a la civilización azteca, las últimas construcciones muestran la preocupación de concentrarse en la solidez de sus edificios, debido al subsuelo que paulatinamente se iba hundiendo. Como resultado, se usó ampliamente el tezontle, una piedra volcánica fuerte y liviana. El tezontle era muy popular porque resultaba fácil de tallar y su textura y color eran atractivos. Se usó en la construcción de edificios monumentales, como relleno de muros, y para hacer techos.

Se utilizaron cuerdas, cuñas, u otros medios para cortar la piedra, en tanto que la arena y el agua se utilizaban comúnmente como abrasivos. Las rocas y los rellenos se usaban para ampliar y estabilizar las pantanosas chinampas (parcelas de tierra que se usaban para la agricultura). El escombro, el mortero, el adobe, y la cal para hacer estuco, también se usaban en forma habitual.

3. DESCUBRIMIENTO Y EVOLUCIÓN DEL CEMENTO EN SIGLOS ANTERIORES

3.1. Industria del cemento del siglo XVIII Al XIX

Hasta el siglo XVIII puede decirse que los únicos conglomerantes empleados en la construcción fueron los yesos y las cales hidráulicas, sin embargo, es durante este siglo cuando se despierta un interés notable por el conocimiento de los cementos.

En este siglo fue cuando la historia del cemento y del concreto empezó su apogeo. El ingeniero John Smeaton, en el año de 1758, aceptó el encargo de reconstruir el Faro de Edystone con un material resistente al viento, al fuego y al oleaje. Así, inició sus experimentos con diferentes mezclas de mortero hasta desarrollar un cemento hidráulico.

Al cabo de pocos años, el Reverendo James Parker creó un nuevo cemento de manera accidental al quemar unas piedras calizas. Este nuevo cemento, denominado cemento romano porque se pensaba que era el que se había utilizado en la época romana, se patentó y se empezó a utilizar en diversas obras en el Reino Unido.

En 1824, James Parker y Joseph Aspdin patentaron un nuevo cemento hidráulico artificial, fabricado por la combustión conjunta de caliza y carbón, que denominaron Portland Cement por su color oscuro, similar a la piedra de la isla de Portland.

En sus inicios este material no fue muy empleado, a causa de su complejo procedimiento de fabricación, que encarecía su producción. Hacia finales del siglo XIX, el proceso de industrialización y la introducción de hornos rotatorios propiciaron la extensión de su uso para todo tipo de aplicaciones. La primera fábrica de cemento se instaló dos años después en Wakefield (Inglaterra).

Puede decirse con acierto que el primer padre del cemento fue Vicat, a él se debe el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad y que propuso en 1817. En 1818 publicó su "*Researches experimentales*" y en 1828 "*Mortiers et ciments calcaires*". En estos trabajos marca la pauta a seguir en la fabricación del cemento por medio de mezclas calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente.

El sistema de fabricación que empleó Vicat fue el de vía húmeda y con él marcó el inicio del actual proceso de fabricación. Este gran científico en 1853 empieza a estudiar la acción destructiva del agua de mar sobre el mortero y hormigón. La elaboración de este cemento consistía en hornear una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura, hasta eliminar el bióxido de carbono; la temperatura de horneado era mucho más baja que la necesaria para la formación de *clínker*, material principal con el que ahora se elabora el cemento.

Posteriormente, Isaac Johnson en el año 1845 mejoró el proceso de producción incrementando la temperatura de calcinación, por lo que se le conoce como el padre moderno del cemento portland. En Francia, en 1887 fue desarrollado el primer cemento blanco y en Estados Unidos, en 1903 fue perfeccionado, logrando un portland blanco de mayor calidad.

El prototipo del cemento moderno obtenido por Johnson fue el resultado de la quema de mezcla de arcilla y caliza hasta lograr la formación de clínker, con lo cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto fuertemente cementoso. En 1838, Brunel empleó por primera vez un cemento procedente de la fábrica de Aspdin en el que se había logrado una parcial sinterización por elección de una temperatura adecuada de cocción. Este cemento se aplicó en la construcción de un túnel bajo el río Támesis en Londres.

El intenso desarrollo de la construcción de ferrocarriles, puentes, puertos, diques, etc., en la segunda mitad del siglo XIX, da una importancia enorme al cemento y las fábricas de este, especialmente las de cemento natural, empiezan a extenderse por doquier. Las investigaciones llevadas a cabo por los padres del cemento Michaelis y Le Chatelier, en 1870 y 1880, fueron fundamentales y muy meritorias para el desarrollo de este material.

En ellas se apoya toda la investigación actual que emplea técnicas de análisis muy sofisticadas y rápidas. La producción de cemento está relacionada directamente con el desarrollo de los países, ya que es uno de los materiales que en mayor o menor grado ha contribuido al crecimiento de las ciudades, vías de comunicación y los lugares donde se vive y trabaja.

3.2. Industria del cemento del siglo XX

Es a partir de 1900 cuando los cementos portland se imponen en las obras de ingeniería y cuando empieza un descenso veloz del consumo de cementos naturales.

Fue en este período cuando Latinoamérica empezó a adentrarse en el ámbito de la industria cementera, llegando algunos países a convertirse en grandes productores y consumidores de este material hoy en día. Esta situación será abordada más explícitamente, posteriormente.

El cemento portland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo. Se puede decir que el cemento es el alma del hormigón, yendo destinada, prácticamente, toda su producción a enlazar piedras sueltas para crear el material pétreo que se conoce como hormigón.

En la década de los 30 la industria cementera mundial iba viento en popa, después de la primera guerra mundial. Pero la gran depresión de 1929, trajo sus secuelas rápidamente, haciendo que la producción y la demanda de cemento a nivel global cayeran estrepitosamente. Para 1932, la producción era la mitad de lo que fue en 1930. En 1933 la industria cementera siguió decreciendo, no de igual forma el valor económico, ya que en este año el precio aumentó. A finales de la década la producción y venta comenzó a aumentar, hasta lograr y rebasar los valores de la década de los años 20. En 1937, hubo crecimiento en la construcción de comercio y vivienda; por lo tanto la demanda fue incrementando.

En los años 40 ocurren acontecimientos importantes como la Segunda Guerra Mundial y la Guerra Fría. En 1941 ocurrió un ascenso considerable en la demanda y producción del cemento a nivel mundial, aumentando el número de plantas de producción tanto del cemento puzolánico como del natural. Debido a la guerra, lugares como Estados Unidos y Europa, realizaron muchas construcciones bélicas que fueron disminuyendo para finales de 1942 e inicios de 1943.

En 1945 empezó la guerra fría, afectando áreas como la política, la ideológica y la económica. Sin embargo, en ese año, la industria cementera experimentó una recuperación y continuó aumentando en demanda y producción hasta el final de la década e inicio de los años 50 y algunos cementos como los naturales, empezaron a disminuir en su producción. De allí en adelante, hasta terminar el siglo XX, la demanda, importación, exportación y venta de cemento fue creciendo imparablemente.

3.3. Inicios de la industria del cemento en Latinoamérica en el siglo XX

El verdadero arranque del proceso de industrialización en América Latina tuvo lugar en el decenio de 1930, cuando los países de la región dejaron de ser economías abocadas a la exportación y dependientes de los mercados internacionales.

3.3.1. Primeras décadas

En primer lugar, el crecimiento de este sector requirió, y a la vez incentivó, la mejora y modernización de las infraestructuras de transportes y comunicaciones, de lo cual se derivaron efectos espectaculares de integración de mercado. Por otro lado, la expansión de las actividades exportadoras implicó crecientes ingresos para capas relativamente amplias de la población, con lo que se elevó la demanda de consumo.

La creciente demanda nacional de bienes manufacturados estimuló la aparición y desarrollo de industrias productoras en los propios países.

Además, la exportación de ciertas materias primas y alimentos, como los minerales, el azúcar y la carne, indujo a la creación de industrias transformadoras, ya que existían ventajas en procesar ese tipo de bienes en los lugares en que se producían.

Estados Unidos puede servir de ejemplo de la emergencia de la industria del cemento. Todavía en 1895, la fabricación de cemento portland representaba apenas el 10 por ciento del cemento producido en el país. En el último lustro del siglo se produjo el salto: “en 1900 la producción de portland dobló los registros de cinco años atrás y se equiparó con la de los cementos naturales. En el siguiente decenio el ascenso fue meteórico: el cemento portland sustituyó por completo al cemento natural.”⁴

En los primeros años del siglo XX crecieron muy fuertemente las exportaciones a Latinoamérica, de Alemania, Bélgica y Gran Bretaña. Se multiplicaron de cuatro a seis veces. Las de Francia, y más aún Estados Unidos, experimentaron incrementos mucho mayores. Se puede afirmar que, para las fábricas del Viejo Continente, la demanda latinoamericana era de la misma magnitud que la del resto del mundo, independientemente de la construcción del canal de Panamá que aumentó la demanda de dicho material.

La situación había cambiado en los años veinte. Los grandes productores (exportadores) europeos siguieron suertes diversas. La situación de la industria a nivel internacional en 1929, permite vislumbrar cuál era la causa de ese estancamiento. Europa y Estados Unidos habían conseguido casi doblar los niveles productivos prebélicos. Habían emergido nuevos productores por doquier, en Asia, Oceanía, incluso en África, y también en América.

⁴ TAFUNELL, Xavier. En los orígenes de la ISI: la industria del cemento en Latinoamérica, 1900-1930. p. 6.

En definitiva, la demanda de cemento por parte de América Latina fue atendida por un grupo numeroso y cambiante de países que habían desarrollado un potente y eficiente sector productor, aunque no siempre hubieran logrado alcanzar un elevado grado de industrialización.

En los albores del siglo, Argentina y Brasil absorbían con creces más de la mitad del cemento importado por la región. Añadiendo el tercer gran importador (México) daban cuenta del 70 por ciento; con el cuarto y el quinto –Chile y Cuba– totalizaban más del 90 por ciento. El peso relativo de los dos primeros se acrecentó aún más en los años precedentes a la Guerra Mundial, hasta alcanzar el máximo de dos tercios, mientras que se mantuvo sin mayores cambios el de los dos últimos. En este período, únicamente México perdió gran importancia como importador. A Cuba le ocurrió lo mismo un poco más tarde.

Las importaciones de aquellos que partían de niveles muy bajos aumentaron sustancialmente al final de los 30' más que el conjunto de la región, como fue el caso de Colombia, República Dominicana, Bolivia, El Salvador, Venezuela, Nicaragua, Honduras, Ecuador, Haití, Costa Rica, Guatemala y Perú (por orden de mayor a menor crecimiento). Aparentemente, esto refleja un patrón de crecimiento positivo y esperanzador, en el que las economías más atrasadas tendieron a converger con las más avanzadas.

Argentina a duras penas alcanzó en la segunda mitad de los veinte a importar los volúmenes de los años previos al conflicto. Uruguay se quedó muy por debajo. Lo mismo le ocurrió a Cuba, que mantuvo el impulso ascendente hasta que acabó la contienda.

Brasil y Chile siguieron un camino algo distinto, pues de 1925 a 1929, sus importaciones superaron netamente los niveles de 1910 a 1913, si bien en términos relativos el diferencial fue muy inferior al registrado por la docena de naciones señaladas anteriormente que formaban el grupo de pequeños importadores. El caso extremo es el de México, cuyas compras exteriores se hundieron con la revolución y la guerra civil, y no se recuperaron hasta en la década de 1920.

Aunque en ningún otro país los volúmenes de importación de 1925 a 1929 fueron inferiores a los de comienzos del siglo, lo cierto es que en lo que respecta a las economías latinoamericanas más desarrolladas, la dinámica fuertemente expansiva de las importaciones, vivida durante la primera década de la centuria, se quebró con la guerra mundial y no se enderezó tras su finalización.

Es manifiesto que en el decenio precedente a la guerra mundial, América Latina acrecentó de manera imparable el consumo, vía importaciones, de cemento. En el lapso de una década (1903-1913) se multiplicaron nada menos que por 6. El estallido de la guerra hizo caer a la mitad las cantidades ingresadas. En su transcurso, la contracción prosiguió continuamente, de tal forma que en el último año de la hostilidad, los volúmenes importados se retrotrajeron a los niveles de quince años atrás.

Pero lo más subrayable no es este fenómeno, común a las actividades relacionadas con el comercio internacional, sino la lentitud de la recuperación posbélica. Tuvieron que pasar diez años para que se recobraran y superasen las magnitudes de las importaciones totales y por habitante de 1913.

3.3.2. La emergencia de la industria cementera

Los orígenes de la industria del cemento en América Latina se remontan a 1872, cuando se estableció en Rosario (Argentina), una pequeña fábrica que producía cemento romano para el mercado local. Esta iniciativa tuvo una cortísima existencia, como otras surgidas al cabo de poco tiempo en el mismo país, a causa de que los costes de producción doblaban los precios del cemento importado. Hubo que esperar hasta 1895 para asistir al nacimiento de la moderna industria del cemento en Latinoamérica, basada, naturalmente, en la fabricación del cemento portland. Nació en La Habana (Cuba), por obra de dos comerciantes españoles. Fueron unos inicios poco prometedores.

La fábrica estaba dotada de un equipo modesto, su capacidad productiva ascendía tan solo a 20 toneladas diarias y dejó de operar en 1910. Pero por entonces ya habían entrado en funcionamiento diversas nuevas plantas con mayores potencialidades en distintos países.

Brasil fue el segundo país donde comenzó a producirse cemento portland, en 1897, en Rodovalho (estado de Sao Paulo). Pero, al igual que sucedió en Argentina unos años atrás, esta primera iniciativa y las que siguieron inmediatamente después en territorio brasileño, protagonizadas por inversores italianos, franceses y alemanes, tuvieron muy escaso éxito. Operaron de manera discontinua y cerraron al poco tiempo, o bien mantuvieron paralizada la producción durante largos períodos.

Con el nuevo siglo se levantaron plantas cementeras en Cuba (1901 y 1912), Guatemala (1901), México (1906 y 1909), Argentina (1908), Chile (1908), Colombia (1909 y 1913), Venezuela (1909) y, finalmente, Uruguay (1912), las cuales estarían destinadas a tener, en general, una larga y fecunda vida.

Al principio, la tecnología utilizada por los países mencionados anteriormente era muy rudimentaria, los hornos trabajaban bajo procesos secos, que a pesar de ser más económicos y ahorradores de energía producían cemento de menor calidad y con material ajeno que lo volvía menos limpio. Por esta razón antes de la Primera Guerra Mundial, las atrasadas técnicas de producción no eran atractivas para ser financiadas por capitales extranjeros.

Luego del fin de la guerra, la situación de dichas pequeñas industrias cambió radicalmente, pues los grandes productores europeos habían quedado bajo una irregular producción, la oferta disminuyó y esto permitió a los mercados latinoamericanos introducirse con menos dificultad. Comenzaron a utilizar hornos de vía húmeda, por lo que el cemento se convirtió de mejor calidad. La lista de productores creció sustancialmente: Cuba (1918), Argentina (1919), Perú (1922), Ecuador (1923), México (1923), Argentina (1928 y 1929), Brasil (1926) y Bolivia (1928). Hubo también algunos intentos que se saldaron en fracaso, como en Paraguay (1926).

Todas estas industrias fueron financiadas y dotadas por maquinaria extranjera, especialmente de la firma estadounidense Lone Star Cement. De esta manera se fueron convirtiendo en empresas autosostenibles a medida que su demanda nacional iba creciendo y abriéndose campo.

Así pues, una docena de países latinoamericanos consiguieron levantar, antes de la Gran Depresión, una industria cementera nacional. Los restantes no estuvieron en condiciones de hacerlo hasta mucho después, a raíz de los cambios provocados por la Segunda Guerra Mundial. Nicaragua y República Dominicana, que implantaron sus industrias en 1942 y 1947, respectivamente; mientras que en la segunda situación figuran El Salvador (1953), Haití (1954), Panamá y Paraguay (1957), Honduras (1959) y, finalmente, Costa Rica (1964).

Los años que precedieron a la contienda mundial se caracterizaron por el liderazgo de la industria mexicana, que lo arrebató a su homóloga cubana, precursora en Latinoamérica. El tercer puesto se lo disputaban cerradamente la planta cementera chilena y la uruguaya. El resto de fabricantes de la región tenían una escala de producción muy inferior.

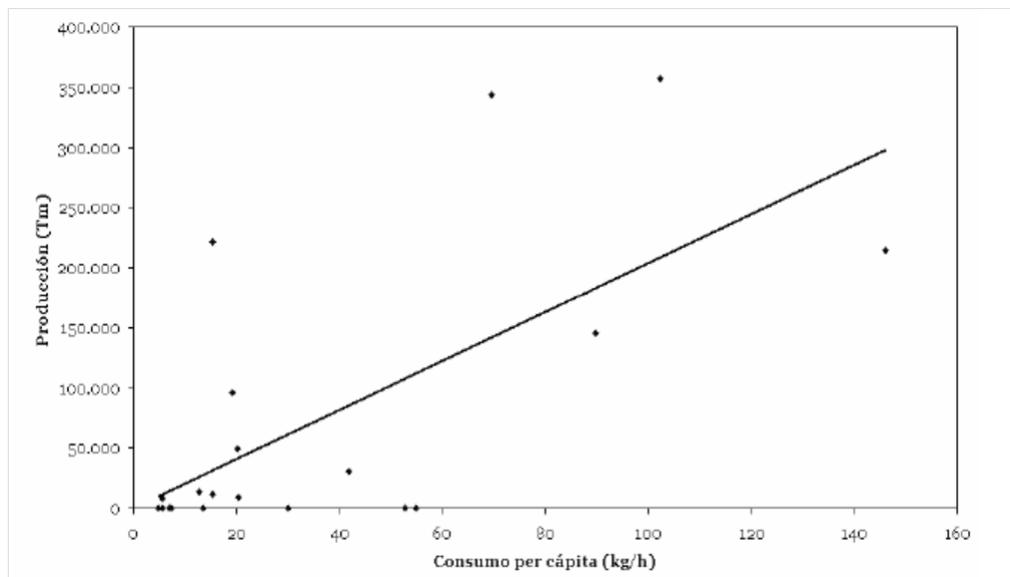
Hubo países que al volverse productores, las exportaciones de cemento no disminuyeron; esto se dio debido a la creciente demanda del producto, como el caso de México.

3.3.3. Consumo del cemento

Así como el aumento de la producción en los diferentes países se dio a escalas distintas, a causa de varios factores como la demanda, fuentes de materia prima, tamaño de la población, entre otras; de la misma manera el consumo fue siendo diferente en cada país, basado en factores como el nivel de consumo del producto que constituye un buen indicador de la inversión en el sector de la construcción, en general, y de la inversión en capital social fijo, en particular.

La figura 6 muestra la relación entre el consumo y la producción de cemento. Se puede observar que la relación es directamente proporcional una de la otra, es decir que entre más demanda se exigía en ese período más oferta brindaba el mercado. Se mantuvo un equilibrio entre la compra y venta del cemento para esa época.

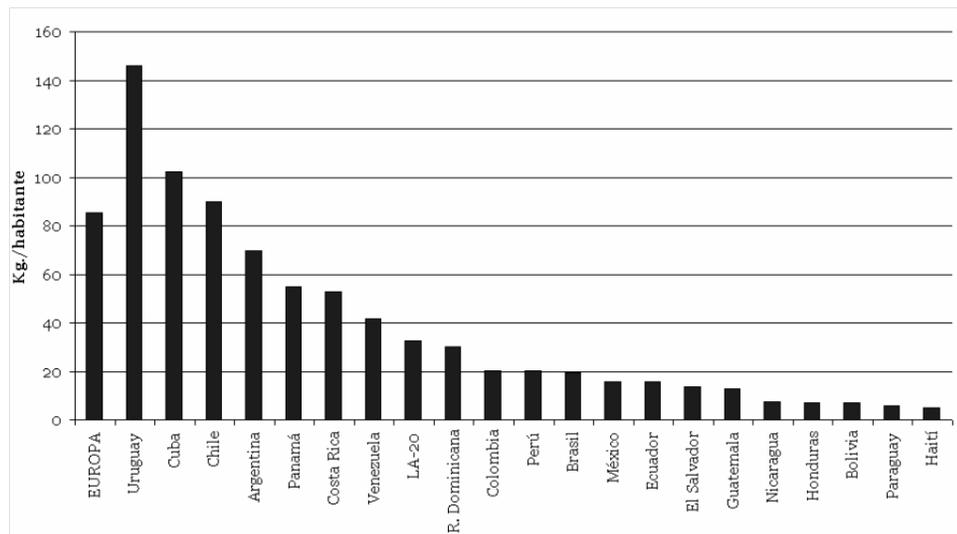
Figura 6. Consumo vrs producción 1900-1930



Fuente: TAFUNELL, Xavier. En los orígenes de la ISI: la industria del cemento en Latinoamérica, 1900-1930. p. 6.

La figura 7 muestra la gráfica del consumo por país en 1929, año de mayor demanda del recurso, se puede observar a simple vista que los países con más movimiento son los suramericanos, sin dejar de mencionar a Cuba, igualando y superando a la región europea, especialmente Uruguay, Chile y Argentina, debido a su crecimiento en infraestructura y su fructífera producción. La región centroamericana fue la de menor demanda, a causa de atrasos tecnológicos y poco avance en métodos constructivos.

Figura 7. Consumo de cemento per cápita en 1929

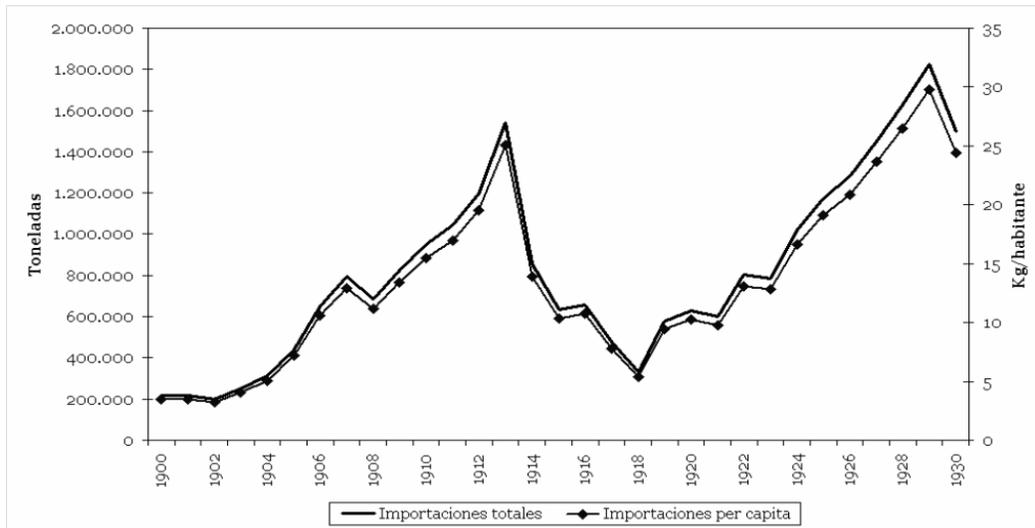


Fuente: TAFUNELL, Xavier. En los orígenes de la ISI: la industria del cemento en Latinoamérica, 1900-1930. p. 61.

La figura 8 muestra las importaciones totales y por país hechas por las ciudades latinoamericanas en el período que antecede a la Segunda Guerra Mundial (1900 a 1930).

Como se observa, la mayor demanda del cemento se dio en los años 1913 y 1920, debido a que en esta época la mayoría de los países de la región construyeron infraestructura para transporte y comunicación y exigían proveerse del material.

Figura 8. **Gráfico de importación de cemento de Latinoamérica 1900-1930**



Fuente: TAFUNELL, Xavier. En los orígenes de la ISI: La industria del cemento en Latinoamérica, 1900-1930. p. 58.

La tabla VII presenta los datos de la producción de cemento entre los años 1900-1930, para tener una idea del comportamiento que tuvo en esas tres décadas donde se dio el surgimiento de la industria de la región latinoamericana

3.3.4. **Década de los 70 y 80**

El desarrollo tecnológico de la industria del cemento en la región ha sido objeto de mayor atención desde finales de los años 70 e inicio de los años 80. En relación con la productividad, cabe afirmar que la cantidad de cemento que se puede elaborar con determinada disponibilidad de trabajo, maquinaria y otros recursos productivos, depende del estudio de desarrollo tecnológico de esta rama industrial.

El avance tecnológico en el sector exige determinados rendimientos de los factores productivos, los que a su vez dependen de la competencia técnica con que se manejen las plantas productoras de cemento.

Tabla VII. **Producción de cemento en toneladas 1900-1930**

		1900/1904	1905/1909	1910/1913	1914/1919	1920/1924	1925/1929
Argentina		0	4.000	3.725	9.817	94.920	214.860
Bolivia	Umbral superior	0	0	0	0	0	7.632
	Umbral inferior						1.696
Brasil		0	0	0	0	0	63.044
Colombia	Umbral superior		6.300	5.975	8.100		
	Umbral inferior	0	1.400	2.300	1.800	6.000	7.860
Cuba	Umbral superior	43.200	59.400	55.350	49.900		
	Umbral inferior	9.600	13.200	12.300	21.217	98.600	254.820
Chile	Umbral superior		36.000	36.000			
	Umbral inferior	0	8.000	8.000	55.275	64.489	101.344
Ecuador	Umbral superior					18.000	16.654
	Umbral inferior	0	0	0	0	4.000	8.254
Guatemala	Umbral superior	2.700	5.400	5.400	6.900	15.840	21.366
	Umbral inferior	600	1.200	1.200	1.533	3.520	6.806
México		0	35.000	45.000	27.500	72.398	174.660
Perú		0	0	0	0	4.120	37.507
Uruguay	Umbral superior			45.000	39.167		
	Umbral inferior	0	0	10.000	10.000	42.400	143.200
Venezuela	Umbral superior		7.200	10.450	16.200	19.460	28.669
	Umbral inferior	0	1.600	4.311	3.600	7.140	14.109
Total Latinoamérica	Umbral superior	45.360	111.500	184.400	212.859	423.779	1.054.428
	Umbral inferior	10.080	47.800	79.925	130.742	393.539	1.014.534

Fuente: TAFUNELL, Xavier. En los orígenes de la ISI: La industria del cemento en Latinoamérica, 1900-1930. p. 56.

Para estas épocas mucha de la tecnología utilizada era ya importada, con el objetivo de conseguir una óptima combinación técnica que sea compatible con su base tecnológica, su mercado y estrategia de crecimiento. Existían entre Latinoamérica y el Caribe, unas 170 plantas productoras de cemento. La producción alcanzó en 1977 las 58 millones de toneladas y aumentó a 75 millones de toneladas en 1981, lo que representa una tasa media de crecimiento anual de 6.6% en este período.

Casi el 70% de esta producción, durante todo el lapso mencionado, corresponde solo a tres países: Argentina, Brasil y México. Otras proporciones de importancia las dieron Colombia, Cuba, Chile, Ecuador, Perú y Venezuela, cuyas producciones, en general, aumentan sostenidamente en esos años. En la tabla VIII se presenta la producción de cemento en la región para este corto período de tiempo.

Sin embargo, la tendencia se interrumpe en 1982 en los 22 países considerados, principalmente como un efecto de la situación recesiva de las economías: la disminución es general, a excepción de Colombia, Ecuador, México, Perú y Venezuela. En el período de 1979-1982, cabe destacar los mayores crecimientos de México (8.1%), Perú (5.4%) y Venezuela (7.8%). La industria de cemento estaba en su mayor parte en poder de propietarios nacionales independientes y poco a poco las empresas transnacionales comenzaron a adentrarse en las economías.

Tabla VIII. **América Latina y el Caribe, producción 1977-1982, en miles de toneladas**

País	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Argentina	5 929,9	6 144,0	6 612,0	7 128,0	6 912,0	5 818,2
Bolivia	267,1	257,2	250,7	318,2	369,5	341,1
Brasil	20 545,1	22 348,4	23 683,2	27 194,0	26 052,0	25 434,0
Colombia	3 297,5	4 152,5	4 256,7	4 355,8	4 459,4	4 720,8
Costa Rica	406,0	490,0	528,0	554,0	500,0	---
Cuba	2 656,0	2 712,0	2 612,8	2 830,8	3 292,2	3 163,0
Chile	1 140,0	1 203,0	1 357,0	1 583,0	1 862,8	1 131,5
Ecuador	645,0	1 057,9	1 075,8	1 112,4	1 369,4	2 004,0
El Salvador	376,0	532,4	587,5	502,6	500,0	---
Guatemala	491,0	515,0	574,0	569,0	568,0	---
Haití	268,0	253,5	233,6	243,3	240,7	206,0
Honduras	183,9	274,3	288,4	307,2	310,9	---
Jamaica	333,2	293,6	225,4	144,0	156,0	--
Jamaica	333,2	293,6	225,4	144,0	156,0	--
México	13 097,0	13 922,0	15 144,0	16 398,0	18 173,0	19 361,0
Nicaragua	226,0	196,0	86,0	154,0	100,0	---
Panamá	271,0	300,0	466,0	499,0	599,0	---
Paraguay	199,7	166,0	154,5	176,7	156,1	111,2
Perú	1 970,0	2 047,1	2 427,5	2 758,0	2 552,0	2 567,0
República Dominicana	874,9	866,8	886,0	1 014,9	951,9	948,5
Trinidad y Tobago	214,7	223,5	217,7	186,2	139,3	189,2
Uruguay						
Venezuela						
Total	682,5	686,6	702,3	700,5	611,0	551,0
	3 742,0	4 107,0	3 973,0	4 843,5	4 876,0	5 432,0
	57 816,5	62 747,8	66 342,1	73 573,0	74 751,2	---

Fuente: CEPAL. La industria del cemento en la región latinoamericana y del Caribe: evolución, situación actual y perspectiva del ahorro tecnológico, 1985. p. 3.

Desde 1974, el ahorro de combustibles fue un tema destacado, debido al alza de precios del petróleo. Para 1979 el 90% de la capacidad instalada de la industria latinoamericana del cemento utilizaba combustibles como el *fuel-oil* y el gas natural y derivado del petróleo. Las excepciones eran países como Chile y Colombia, que ya estaban sustituyendo este tipo de combustible por carbón, con el que cuentan en abundancia. Brasil, por su parte, actualmente desarrolla un programa nacional de sustitución de hidrocarburos por carbón en la industria del cemento. Otro tema destacado fue la computarización de las plantas.

4. LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN LA ACTUALIDAD

Hoy en día, todos los tipos de concreto fabricados con cemento portland pueden ser utilizados para cualquier aplicación. La infinidad de características con las que cuentan los cementos actuales permite escoger el que mejor se adecue a las necesidades. A través del tiempo se ha podido demostrar las increíbles propiedades, su gran durabilidad y resistencia, con las grandes edificaciones, las obras públicas o los conjuntos artísticos.

4.1. Industria del cemento del siglo XXI

Si bien el desarrollo de la producción de cementos con base en el portland mantuvo a lo largo de todo el siglo XX un sostenido incremento de la resistencia mecánica, con vistas a satisfacer la demanda de obras complejas e inimaginables, que han requerido de hormigones de cada vez más evolucionados y perfeccionados.

La industria cementera mundial está buscando vías experimentales que permitan desarrollar cementos que precisen menor energía en su formación, degraden menos los entornos y emitan menos gases contaminantes a la atmósfera.

Esta línea, en España y Europa, coincide plenamente con el concepto de sostenibilidad y alcanzar el cumplimiento del Protocolo de Kioto.

El empleo de diferentes residuos y subproductos industriales como materiales alternativos en la fabricación de cemento, se ha revelado como un medio muy efectivo para alcanzar, en gran parte, esa sostenibilidad. Estos materiales alternativos pueden ser incorporados en el proceso de fabricación de cemento, por la sustitución parcial de los combustibles convencionales y/o de las materias primas del crudo y por la incorporación de adiciones activas al cemento y/o clínker.

El costo del cemento en porcentajes es aproximadamente 29% de la energía, el 27% de materias primas, mano de obra del 32% y 12% depreciación. Los costos de transporte son muy altos, comparados con los costos de producción. Sin embargo, el cemento puede ser enviado por vía marítima económica y por vía navegable a grandes distancias, que se extiende en gran medida la competitividad radio de plantas de cemento con el acceso a las vías de navegación fluvial. Por lo tanto, la ubicación de una planta de cemento y el costo de transportar este, tiene que ver directamente con la competitividad de la planta y los precios que pueden cobrar.

Como consecuencia de una mínima relativamente baja de plantas eficientes, el transporte y los costos de producción de cemento está muy fragmentado. Se estima que hay alrededor de 1500 plantas integradas de producción de cemento en el mundo. A pesar de esto, la industria ha visto el surgimiento de fuertes jugadores globales como un Lafarge o CEMEX; la participación de las cuatro mayores empresas solo representan el 23% del total de la demanda. El cemento se distribuye en bolsas o se entrega a los sitios de construcción a través de camiones de mezcla listas.

Las tres grandes cementeras del mundo son Cemex, de México; Holcim, de Suiza y la francesa Lafarge.

Aunque muchos autores escépticos predicen que la industria del cemento va en decrecimiento debido a las diferentes opciones de materiales presentes en el mercado y su continua perfección, la crisis económica mundial, entre otros obstáculos más, existen muchos autores más que opinan y aseguran que estos problemas son pasajeros, que la crisis económica está cesando y la demanda de cemento ha aumentado en países como Chile y Haití, luego de los terremotos sucedidos en el 2010, como sucedió en México con el terremoto del 1985. Es decir que los efectos de los desastres naturales traerán mucha demanda del producto de ahora en adelante.

4.1.1. Europa

La determinación cuantitativa de los componentes empleados en la fabricación de un cemento, a veces, puede ser un trabajo muy complicado, ya que cada vez, con más frecuencia, se utilizan mezclas de adiciones de diferentes procedencias y composiciones. Este problema se complicó aún más con la entrada en vigor de la norma europea UNE-EN 197-1:2000 “Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes”, que introdujo nuevas adiciones con relación a la norma UNE 80.301:1996 “Cementos comunes: Composición, especificaciones y criterios de Conformidad”. Por otro lado, la tendencia actual en el mercado europeo es la de incorporar una mayor cantidad de adiciones a los cementos.

La industria europea del cemento tiene una presencia verdaderamente global con una cuota de mercado del 95% en Europa y 70% en América del Norte, con una fuerte presencia en América del Sur y un crecimiento en Asia.

La industria se caracteriza por la energía de alta intensidad, que en particular depende del nivel de tecnología planteada, costo de capital de alto y relativamente baja intensidad de trabajo (80 000 empleados).

Para el año 2006, la industria europea del cemento produjo 314 millones de toneladas, lo que representó el 12,4% de la producción mundial. La industria está establecida y funcionando bien, el sector de la construcción en Europa está experimentando el crecimiento para lograr un futuro positivo para dicha industria. Sin embargo, existen factores pesimistas, ya que las importaciones a la UE están creciendo, provenientes de China, principalmente.

Es evidente, por tanto, que el aumento de las importaciones presenta un riesgo ambiental, así como una amenaza para la competitividad de la industria en Europa.

Por otra parte, la Comunidad Económica Europea (CEE) comenzó el estudio de la normalización del cemento en 1969, encargando dicho estudio al Comité Europeo de Normalización (CEN) en 1973, a través del Mandato M114, quien delegó el trabajo al Comité Técnico 51 (TC 51): "Cemento y Cales de Construcción". El CEN/TC51 decidió al comienzo de los años 80 tener en consideración, tan solo a los cementos tradicionalmente utilizados para elaborar hormigón en masa y armado, los cuales hayan sido producidos y utilizados en la mayoría de los países de Europa Occidental para su inclusión en un proyecto de Norma Europea Experimental.

4.1.2. Asia

Para el año 2013 los productores asiáticos representarán tres cuartas partes de la producción mundial de cemento y con China la producción en exceso de 47% de la producción mundial.

Desde 1985, China ha sido el mayor productor y consumidor de cemento del mundo. La producción en el 2002 alcanzó los 725 millones de toneladas. La industria del cemento en China ha de afrontar la tarea de una severa reestructuración. Hasta el 2002 la capacidad de fabricación de todas las líneas de producción del proceso NSP (*New Suspensión Preheater*) representaba el 17% de la producción total, sustituyendo así unas posibilidades de fabricación que han quedado obsoletas gracias a un avanzado sistema NSP que jugará un importante papel en la industria en los próximos diez o quince años.

Los “*Portland Cements*” (también conocidos como cementos de silicato en China) representan los principales productos de cemento en el país y ocupan el 97% del mercado. “Existen 101 estándares diferentes de cementos en China, entre los que se incluyen 13 tipos nacionales obligatorios, 27 estándares nacionales recomendados, 7 tipos industriales obligatorios y 54 industriales recomendados. Los estándares de “Portland Cements” son del tipo nacional obligatorio”. (*Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009*).

Existe una serie de problemas que se han de resolver y mejorar como la fabricación de hornos secaderos con ventiladores, la producción a pequeña escala, los equipos anticuados y la contaminación medioambiental.

Las plantas NSP de Jidong, Zhujiang, etc, han importado todo el equipamiento del extranjero.

La India es el siguiente país con mayor producción en Asia y el mundo. La industria en ese país inició en 1914 con una planta que producía 1000 toneladas anuales. Para 1980 la producción se incrementó a 27 millones de toneladas anuales. Para la década de los noventa se incrementó la producción a 49 millones. Aquí se marcó un impulso muy fuerte en el desarrollo del mercado de cemento.

En este tiempo hubo libre comercio, lo que permitió que la industria creciera. Para el año 2000 la producción había aumentado a 104 millones de toneladas.

Algo muy importante fue el hecho de que “desde 1989 se liberó por completo el control de la comercialización del cemento y se realizó directamente por las empresas productoras, dejando fuera la intervención del cemento. Esto trajo como resultado un mayor crecimiento”.⁵

Luego en 1991 se estableció la industria del cemento como prioridad para la economía de la India y permitió el 51% de la inversión extranjera en dicha industria. En la actualidad, como ya se dijo anteriormente, India es el segundo productor en el mundo.

4.1.3. América con énfasis en Latinoamérica

Se explorará la situación de la producción y consumo de los países del continente americano por región, enfocándose en los latinoamericanos, de los cuales Guatemala forma parte.

⁵ BABU KUMARÁN, Ganesh; MARTÍNEZ GONZÁLEZ, Saúl. Evolución reciente de la industria de cemento: un estudio comparativo entre México y la India. p. 169.

4.1.3.1. América anglosajona

En Norteamérica, Estados Unidos es quien lleva la cabeza de la en la industria del cemento, llegando en el 2006 a producir 98,2 millones de toneladas métricas. Los precios del cemento aumentaron significativamente en muchos distritos y como resultado, el valor total de las ventas de cemento a los clientes domésticos finales incrementaron.

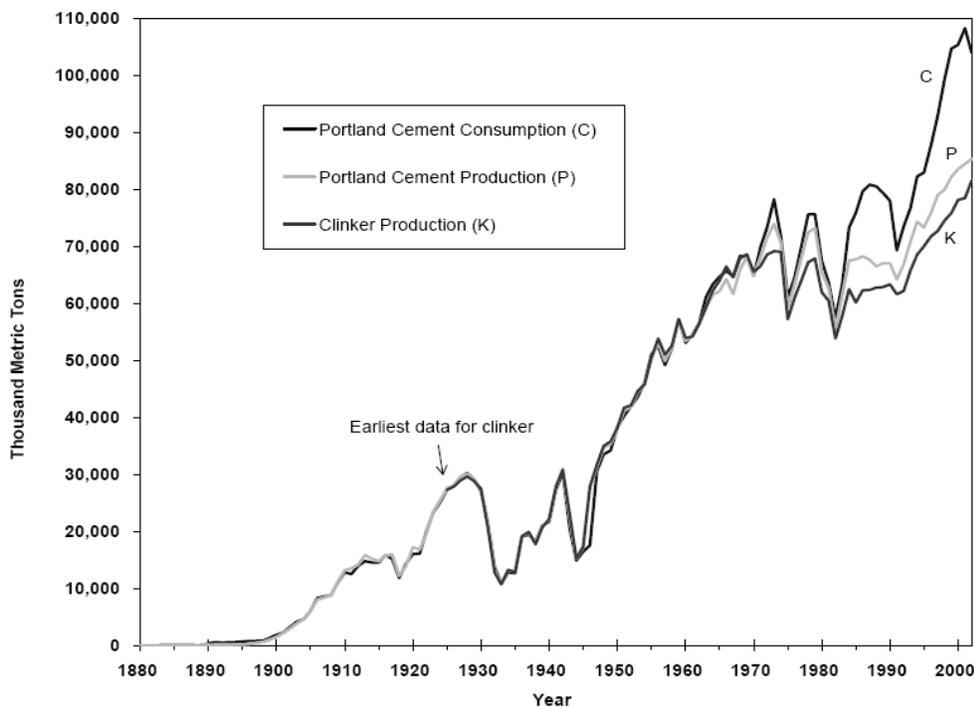
Las principales compañías productoras en Norteamérica registradas para el año 2006 en orden descendente fueron las siguientes: Holcim (US) Inc.; CEMEX, Inc.; Lafarge North América, Inc.; Buzzi Unicem USA, Inc. (incluyendo Alamo Cement Co.); Lehigh Cement Co.; Ash Grove Cement Co.; Essroc Cement Corp.; Texas Industries Inc. (TXI); California Portland Cement Co.; y St. Marys Cement, Inc. The U.S.

Canadá para el 2001, comenzaba a aumentar su producción en un 38%, al igual que su consumo. El carbón es el combustible predominante empleado en Canadá y EU; ambos países usan también grandes cantidades de coque, y Canadá emplea montos considerables de gas natural.

El hecho de que Estados Unidos sea el mayor productor de la zona se debe a que luego de entrar en vigencia el TLC (Tratado de Libre Comercio) con América latina, especialmente México, trasladaron muchas de sus plantas a esta región, visualizando mejores ventas por la capacidad económica y constructiva de dicho país.

En la figura 9 se puede observar que los tres comportamientos van en aumento, es decir que cada uno depende de los otros dos. En los primeros años casi se tenía el mismo comportamiento, mientras que en los últimos años, la producción de clínker es mucho más grande que el comportamiento de la producción y del consumo. Hasta se podría decir que en la actualidad se produce más de lo que se consume.

Figura 9. Consumo y producción



Fuente: MURILLO MAIKUT, Stephanie M. Cement <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1152/2005-1152.pdf>. Consulta: agosto 2010.

4.1.3.2. Latinoamérica

“La industria del cemento y otros concretos a base de cemento es uno de los negocios más rentables en el mundo, especialmente en Latinoamérica, donde las ventas se duplican cada 10 años como consecuencia de las altas tasas de crecimiento demográfico”.⁶

América Latina se ha convertido en una región con gran potencial en infraestructura y construcción, por lo que se convierte en una zona atractiva para los grandes productores de cemento alrededor del mundo. Aún así, ese potencial no ha sido explotado y Latinoamérica presenta un déficit en este ámbito que debe superar para competir contra regiones de igual desarrollo.

La evolución del cemento está enfocada en las consecuencias ambientales que su fabricación ha traído, especialmente en los países con grandes producciones del material, pero esto no significa que sea el único problema a resolver. Los niveles económicos han afectado el consumo de cemento, pues en un estado de extrema pobreza o de gran atraso se han empleado materias naturales de tipo vegetal o mineral más baratas y accesibles que el cemento.

Especialmente en países como los latinoamericanos, el problema principal no se concentra en la disminución de las emisiones de CO₂ sino en la disminución de los costos de ventas, pues al convertirse en el material universal en la construcción, sus precios se elevaron y en la actualidad la financiación de una edificación es muy costosa y países en vías de desarrollo buscan la utilización de materiales de bajo costo y en consecuencia, de baja calidad.

⁶ ROMERO, Antonio; GONZÁLEZ, Carlos E. Condiciones generales de competencia en Guatemala. p. 34.

Se ha logrado establecer el uso de aglomerante puzolana cal y la pintura cementosa; estos, una vez implementados a nivel industrial podrían sustituir a sus similares tradicionales produciendo un efecto económico importante, utilizándolo de esta manera en la construcción de nuevos proyectos habitacionales.

Ante la gran demanda energética necesaria para la producción del cemento portland y la imperiosa necesidad de desarrollar programas de construcción de viviendas suburbanas y rurales, se enfrenta a la tarea de la búsqueda de un aglomerante de bajo costo y de fácil producción, destinado fundamentalmente a la producción de trabajos de albañilería y otros usos de bajo requerimiento en cuanto a resistencia mecánica.

Este aglomerante, como su nombre lo indica, está constituido por una mezcla íntima y homogénea de puzolana más cal (viva o hidratada) pulverizados hasta finura similar a la del cemento portland y, el mejor modo de lograrlo es la molienda conjunta y adecuadamente dosificada (70- 80% de puzolana y 30-20% de cal), aunque se puede lograr por molienda separada y ulterior mezclado, pero existen riesgos de no alcanzar una buena homogeneización.

La pintura cementosa es producida en forma de polvo seco, está constituida por una base cementosa, que al ser mezclada con agua, permite obtener un revestimiento con propiedades impermeabilizantes que decora todo tipo de superficie de hormigón, mortero, piedra, ladrillo y block, pudiendo usarse tanto en interiores como en exteriores.

Adentrándose a conocer los principales países productores de Latinoamérica, se tiene que mencionar a Brasil. La principal empresa cementera en Brasil es Cimento Itaú. Pertenece al grupo brasileño Votorantim, uno de los grupos privados más grandes del país con activos por 3.6 billones de dólares. Esta empresa, junto con sus subsidiarias, controla el 40 por ciento del mercado de cemento en Brasil y posee una capacidad de producción de 16.4 millones de toneladas. Adicionalmente, se caracteriza por tener flujo de caja que sobrepasa los 200 millones de dólares, que le permite mantener un bajo nivel de apalancamiento.

La situación de Perú, es similar a la de Brasil en cuanto a que presenta un déficit de vivienda e infraestructura. Si a esto se adiciona que el crecimiento del PIB en los últimos años ha sido de los más altos del mundo (en 1995, 7.5 por ciento y en 1996 se estima será del 6,0 por ciento), el terreno está abonado para que la industria cementera incremente sus ventas y sus utilidades durante los próximos años.

En Perú la demanda de cemento para el sector de la construcción de vivienda representa el 80 por ciento de la demanda total, por lo cual es en el área de vivienda en donde se espera el mayor beneficio para las empresas cementeras. Las empresas con mayor capacidad de producción en el Perú son Cementos Lima y Cementos Norte Pucallpa.

En el caso de Cementos Lima, el objetivo de las inversiones será duplicar su capacidad; la facilidad para exportar cemento e importar clínker, gracias al puerto que poseen, es su principal fortaleza. Por su parte, en Norte Pucallpa, los recursos se destinarán a un aumento parcial de la capacidad de producción.

En Perú, en tanto, el mercado del cemento se verá beneficiado por la situación chilena, luego del terremoto. Las acciones de cemento Melón ya han subido casi 16%, acciones cuyo 84% es controlado por Grupo Brescia, de origen peruano.

Mientras que Brasil, primer consumidor de la región, busca sus propias opciones de producción. Por ello, la siderúrgica brasileña CSN quiere expandirse a la industria del cemento y ya planea construir dos plantas de ese producto en el país para aumentar la capacidad de producción anual en más de cinco veces.

La industria de cemento en México se caracteriza por ser de las más eficientes del mundo, gracias a: las inversiones continuas en tecnología y equipamiento de punta; capacidad técnica de su personal y la seguridad de sus procesos, equipos y operaciones. Esto permite que México se encuentre entre los 15 principales productores de cemento en el mundo.

La industria del cemento en México es un usuario intensivo del transporte de mercancías, en todas sus modalidades. Este transporte se caracteriza por su compleja logística y conectividad (multimodal). Esto se debe principalmente a:

- Área geográfica: 2 millones de km²
- Litorales: 11,122 kilómetros
- Población de 107 millones de habitantes
- Sistemas de montañas a lo largo del territorio
- Poblaciones de baja densidad dispersas
- Carreteras insuficientes, y en algunos casos, en condiciones precarias
- Un sistema de ferrocarril insuficiente.

A esto hay que sumarle que generalmente el transporte de cemento es multimodal (varios medios de transporte), lo que implica que además de su complejidad mencionada hay que sumarle la necesidad de una eficiente conectividad.

Aquí la industria se enfrenta a diversos problemas de infraestructura: por ejemplo las empresas cementeras deben contar con una terminal portuaria para despachar el cemento y tener barcos con las especificaciones necesarias para transportarlo. Se estima que el costo de producción es similar al de transporte.

México se destaca por su tecnología y su capacidad exportadora, mientras que Colombia se caracteriza por la estabilidad y el crecimiento sostenido del sector. En ambos países existe un déficit en infraestructura y vivienda, que refleja el gran potencial que tiene el sector cementero.

De acuerdo con la División Técnica de Corredores Asociados S.A., la entrada de Cemex a Colombia habría tenido beneficios para la industria de la construcción, la industria cementera y concretamente para Cementos Paz del Río; ya que para el sector cementero la entrada de una empresa como Cemex, con tecnología tan avanzada, generaría mayor competencia, obligando a las cementeras locales a incrementar tanto la calidad del producto como la eficiencia en la producción, e incluso podría haber inducido una reducción de precios.

Por su parte, los beneficios para Cementos Paz del Río habrían sido múltiples, por la transferencia de tecnología y el respaldo económico.

En los últimos 10 años la industria del cemento en Colombia, ha presentado comportamientos volátiles, e inesperados, registrando crecimientos considerables a finales de los noventa, después fluctuando hacia una crisis en 2005, y en adelante un crecimiento persistente hasta hoy. Los insumos más determinantes de la industria son gas, carbón, ACPM, energía eléctrica, capital de trabajo, repuestos, y flete (transporte de materia prima y producto terminado).

El constante incremento en los precios del petróleo está afectando los insumos primordiales para la producción de cemento, tales como el ACPM, carbón y el flete, haciendo que los costos incrementen y así un constante incremento de precios del producto. De acuerdo con el informe de la Industria del cemento en Colombia de 2005, esta es una situación netamente coyuntural, que depende del índice WTI, y de los grandes demandantes del crudo como China e India. Los repuestos de la operación también constan de una importancia considerable, ya que son piezas de gran tamaño, valor, y críticas para la producción.

En los últimos años, la entrada de *drywall* ha crecido considerablemente. Lo que muestra que el mercado se está volviendo más dinámico y competido; al punto que recientemente se inauguró la primera planta para la producción de *drywall* en el país, poniendo así presión en la demanda del cemento. Adicional a este, el mercado siderúrgico en el país está mejorando considerablemente.

Por el lado del asfalto, este siempre ha tenido más demanda que el cemento en el mercado local, ya que la construcción de vías con concreto tiene un costo mucho mayor y su tiempo de construcción tarda mucho más.

Si dichos productos no tuvieran entrada al país, la demanda del cemento fuera más alta. Pero aún así existe crecimiento en la demanda del cemento dada por el buen comportamiento del sector de la construcción, que también está impulsando el crecimiento de la demanda de arcilla para la fabricación de bloques de ladrillo, y la demanda de hierro, entre otras. Esto se da en muchos países y no solo en la zona colombiana.

Las diferencias de sector en cada país radican en el peso relativo de la demanda de cemento para infraestructura y para vivienda, en la capacidad instalada del conjunto de empresas productoras, en la facilidad para realizar exportaciones que les eviten depender del mercado doméstico, en el apalancamiento financiero y en la tecnología.

4.2. Principales productores y consumidores de cemento en el mundo

De acuerdo con la información recabada en la U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, la producción de cemento en los últimos 5 años ha sido la que se muestra en la tabla IX. Como puede observarse, los países latinoamericanos cuya producción es significativa son Brasil y México, los cuales representan aproximadamente el 1.80% y el 1.05% de la producción mundial, respectivamente, en 2010.

Mientras que China equivale aproximadamente al 55% de la producción. Estos datos permiten comprobar que es este país quien lleva la cabeza en la fabricación de dicho recurso. A continuación se ampliarán un poco más las situaciones de las diversas regiones.

Tabla IX. **Producción mundial en millones de toneladas**

	2006	2007	2008	2009	2010
USA	99 700	96 500	87 600	64 900	63 500
Brasil	39 500	46 400	51 900	51 700	59 000
China	1 200 000	1 350 000	1 390 000	1 629 000	1 800 000
Egipto	29 000	38 400	40 000	46 500	48 000
Francia	21 000	22 300	21 700	---	---
Alemania	33 400	33 400	33 600	30 400	31 000
India	155 000	170 000	177 000	205 000	220 000
Indonesia	34 000	36 000	37 000	40 000	42 000
Irán	33 000	36 000	44 400	50 000	55 000
Italia	43 200	47 500	43 000	36 300	35 000
Japón	69 900	67 700	62 800	54 800	56 000
República de Corea	55 000	57 000	53 900	50 100	46 000
México	40 600	40 700	47 600	35 200	34 000
Pakistán		26 000	39 000	32 000	30 000
Rusia	54 700	59 900	53 600	44 300	49 000
Arabia Saudita	27 100	30 400	31 800	40 000	45 000
España	54 000	54 500	42 100	50 000	50 000
Tailandia	39 400	35 700	35 600	31 200	31 000
Turquía	47 500	49 500	51 400	54 000	60 000
Vietnam	32 000	36 400	37 000	47 900	50 000
Otras Ciudades	442 000	437 000	459 000	466 000	520 000
Mundial	2 550 000	2 770 000	2 840 000	3 060 000	3 300 000

Fuente: elaboración propia

4.2.1. Europa

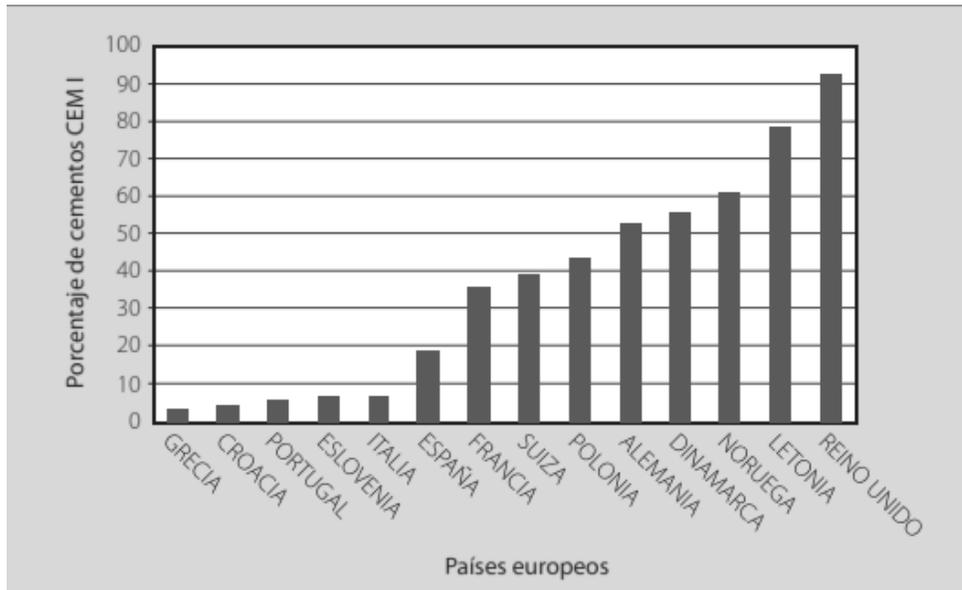
En orden de participación de mercado, la primera industria productora es la francesa Lafarge, que espera que la demanda global crezca hasta 5% los próximos años, tras haber reportado ganancias para el 2009 por debajo de las expectativas. La firma vio perjudicada sus utilidades debido a la desaceleración en EEUU y Europa, lo que empujó a una baja en los proyectos de construcción y como consecuencia, a una caída en la demanda de cemento, pese a que la actividad de la industria permaneció fuerte en los países emergentes, refiriéndose a Brasil y Chile, interesantes compradores de la región, según Standards & Poor.

En segundo lugar, se ubica la industria suiza Holcim Apasco, otra que vio disminuidos sus ingresos debido a la baja en el sector de la construcción. Su beneficio neto cayó 17.5% en el año 2009. Este año los dardos de Holcim apuntarán a Asia, lugar donde espera registrar avances.

Como se muestra en la figura 10, se puede observar el porcentaje de producción de cemento Tipo I (cemento portland) para el año 2005 de los países miembros de la Asociación Europea de Fabricantes de Cemento (Cembureau) donde Inglaterra lleva la cabeza con más del 90% de cemento producido en esa área.

Países como Letonia y Noruega no se quedan atrás, produciendo entre el 60% y el 80% del cemento. Entre los menores productores se pueden encontrar países como Grecia, Croacia, Portugal, Eslovenia e Italia, que no aportan más del 10%.

Figura 10. **Productores de cemento de la Cembureau 2005**

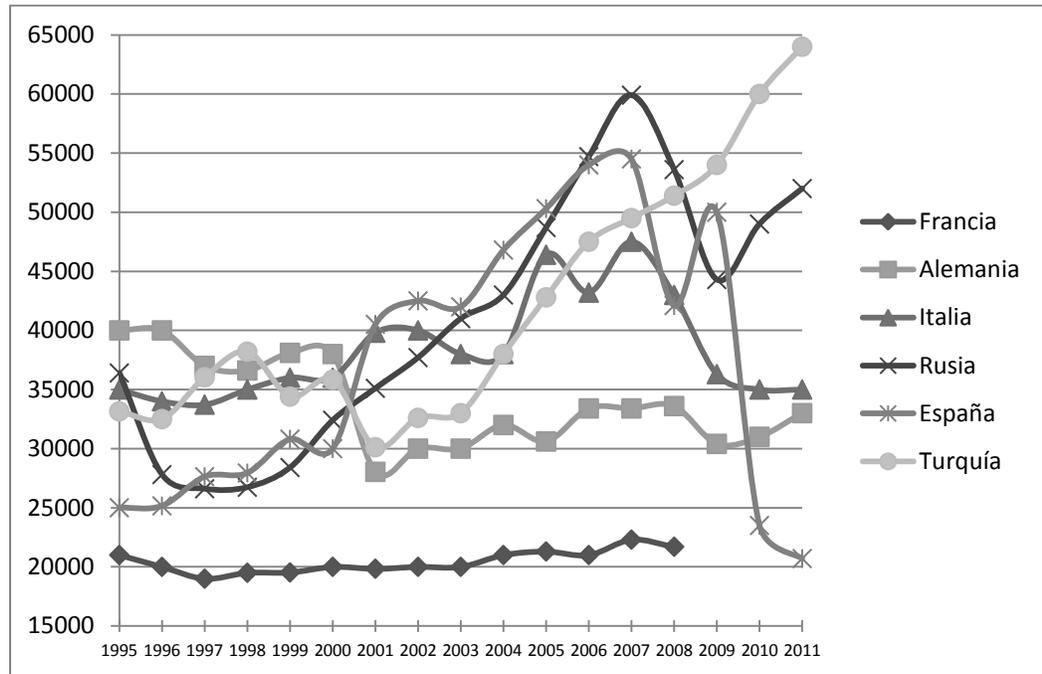


Fuente: SANJUAN BARBUDO, Miguel Ángel. Determinación de los componentes del cemento. 2010. p. 14.

Como se muestra la figura anterior, para el 2005, la mayoría de los países europeos tenían una producción encaminada a aumentar. El comportamiento de la producción de cemento en millones de toneladas de los países europeos más sobresalientes en esta industria en los últimos 16 años, se puede observar en la figura 11.

Gracias a la información recabada por USGS (U.S. Geological Survey) se pueden analizar detenidamente países como Rusia, España e Italia, observando que han disminuido su producción en los últimos 4 años, aproximadamente; pues la demanda de infraestructura ha decaído, a causa de la crisis mundial que inició en el 2008, trayendo consigo aumento de los precios de la materia prima, inflación, crisis hipotecarias, entre otros problemas, siendo los primeros afectados los países europeos y Estados Unidos.

Figura 11. Producción de países europeos sobresalientes, al 2011



Fuente: elaboración propia.

A esto se le suma el hecho de ser países desarrollados, ya que la etapa de crecimiento demográfica está cesando; por consiguiente, la demanda en el ámbito constructivo toma el mismo rumbo. Francia tiene el mismo comportamiento, hasta el punto de desaparecer en el 2009 de las listas de mayores productores mundiales. Alemania levantó su producción en el último año registrado, lo que refleja un mejor manejo de la crisis, pero se puede atrever a decir que su producción va en disminución con el mismo patrón.

El único país donde se demanda producción y esta va en aumento considerable en comparación de los demás, es Turquía. Este país ha sabido explotar su ventaja geográfica al ser un país transcontinental que une Asia y Europa.

La historia lo enmarca como un país comerciante y a la vez conflictivo, pero después de la Segunda Guerra Mundial, su situación política fue estabilizada y su economía ha ido en aumento, manifestado en su evolución industrial, en este caso la cementera. Se consideró como parte del continente europeo por sus enlaces y tratados de comercio con este.

4.2.1. América

La industria cementera latinoamericana participa con el 7,0 por ciento del cemento producido a nivel mundial. Dentro de la región, el sector cemento y construcción participa con el 5.5 por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) y con el 6.5 por ciento de la capitalización bursátil. México, Colombia y Brasil son los principales productores del área; por su parte Brasil posee la mayor capacidad instalada.

Las principales empresas cementeras con operaciones en México son Cemex, Holcim Apasco, Lafarge y Cementos Cruz Azul. Cabe destacar que la CANACEM agrupa a las 6 principales cementeras del país: aparte de las ya mencionadas, a Grupo Cementos Chihuahua y Cementos Moctezuma.

Cemex, es la cementera que ocupa el tercer lugar a nivel mundial. No es de extrañar que tras 100 años de operación, Cemex busque ser a corto plazo la segunda cementera del mundo. Su capacidad de producción anual, cercana a las 98,2 millones de toneladas métricas, la ubica como la más grande de la región, con operaciones en 23 países y relaciones comerciales con más de 60 naciones.

Así, Cemex espera para los próximos años tres cosas importantes: primero, dejar atrás la baja de casi 40% en las ventas de 2009; liquidar su deuda y fortalecer su posición de efectivo y, finalmente, resolver la situación en Venezuela donde el gobierno agiliza un plan de estatización.

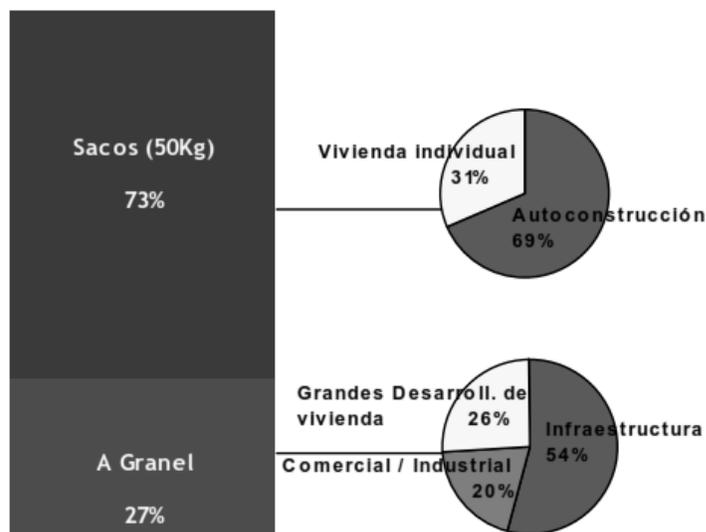
Cemex es la principal compañía cementera en México, seguida por Apasco. La primera ha aplicado una estrategia de expansión internacional que le ha dado muy buenos resultados, pues le ha permitido compensar con exportaciones las menores ventas en el mercado doméstico, su principal filial es Tolmex. Realiza operaciones en 22 países y tiene acceso a los mercados de más de 54 países. También tiene subsidiarias que participan en la industria turística.

La figura 12 muestra la segmentación del consumo en México. Como se puede ver, la mayor parte del consumo (73%) corresponde al sector de la autoconstrucción y vivienda particular. El resto (27%) corresponde al sector de infraestructura, los grandes desarrolladores de vivienda y la construcción comercial e industrial. Cabe destacar que en el caso de los mercados desarrollados el consumo es justamente al revés de como se da en México: por ejemplo, en EUA la composición del consumo es: 90% a granel y 10% en sacos.

En el caso de Colombia, dentro de las principales compañías, al año 1996 se encontraban las del Sindicato Antioqueño, cuya posesión la constituye la Compañía de Cemento Argos. Esta empresa tiene inversiones en varios sectores de la economía, pero mayoritariamente en el sector cementero.

A través de sus empresas en Colombia (Cementos Caribe, Cementos del Valle, Río Claro, Tolcemento, Colclinker y Cementos El Cairo) esta empresa controlaba el 58 por ciento de la producción de cemento en Colombia.

Figura 12. **Consumo en México**



Fuente: HEREDIA M., Rodrigo, GONZÁLEZ T, Carlos. Sector Cemento, Mira lejos y piensa en grande, 2007. p.1.

Por su parte, Cementos Paz del Río presenta hasta la fecha la ventaja de estar muy cerca de Bogotá, el principal mercado del país y pretende incrementar su capacidad instalada para alcanzar una mayor participación. Cementos Diamantes era otra de las más importantes compañías cementeras. Manejaba el 24 por ciento del mercado al año 1996 y poseía una de las mejores tecnologías del país. A esa fecha poseía cinco plantas, muy bien distribuidas geográficamente en Apulo, Bucaramanga, Cúcuta e Ibagué.

Brasil encabeza la lista de los países de más consumo de cemento en América. Pero a partir de 1999 han incursionado al mercado cuatro nuevas empresas, Cementos Andino S.A., Concrecem S.A. (recientemente adquiridas por el Grupo Argos), Cementos Oriente S.A., Cementos Tequendama S.A. y otras más que están constituidas legalmente pero no han comenzado a operar. En la actualidad, existen tres claros jugadores en la industria, estos son tres grupos económicos de talla mundial, que han venido incursionando en el mercado por medio de la adquisición de las plantas anteriormente mencionadas.

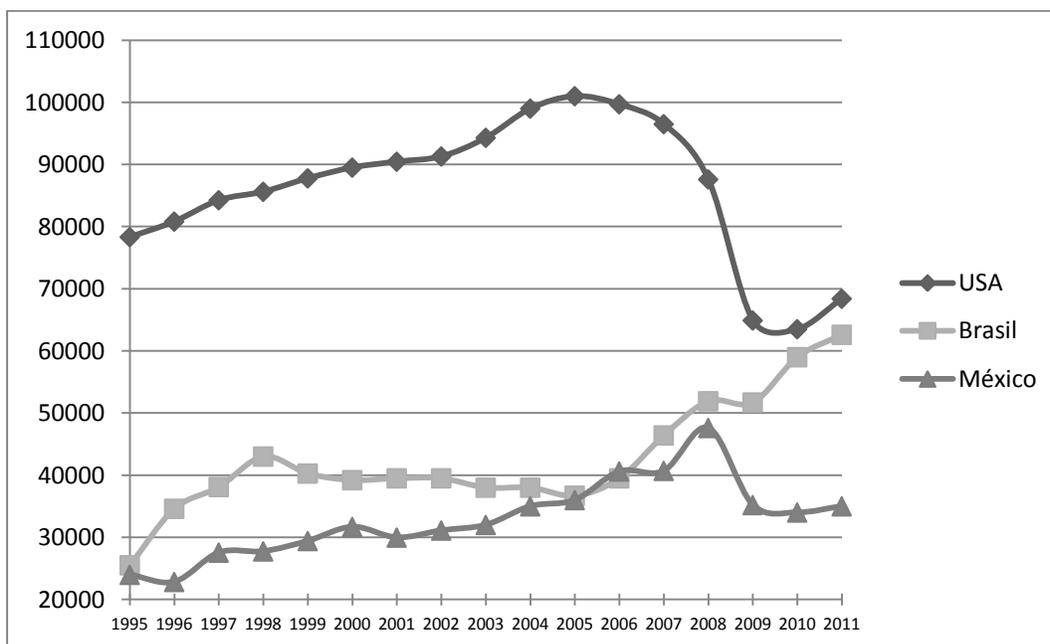
Estos son, CEMEX (el cual adquirió Cementos Diamante y Samper), Grupo ARGOS (su grupo consta de Cementos Argos, Cementos El Cairo, Cementos Caribe, Cementos Paz del Río, Cementos Nare, Cementos Río claro, Tocemento, Cementos Andino, Concrecem y Cementos del valle), y El Grupo HOLCIM (propietario de Cementos Boyacá).

En América los países que han logrado entrar al ranking de productores mundiales, como ya se mencionó, son Estados Unidos, incluyendo a los latinoamericanos Brasil y México.

En la gráfica 13 se muestran los comportamientos de dichos países en el sector de producción de cemento desde el año 1995 al 2010, (Van Oss, 1995-2011), puede verse que la producción en Estados Unidos comenzó a decrecer en el 2006, pues la demanda de infraestructura había llegado a su punto máximo, pero luego vino un declive impresionante debido a la crisis económica mundial en el 2008, originada en este país que hasta la actualidad no ha podido superar del todo.

La misma situación ocurrió con la producción en México, cuyo crecimiento iba viento en popa, hasta que fue alcanzado por la crisis y sin poder recuperarse, a pesar de ser un país en vías de desarrollo, cuya demanda del producto es apreciable.

Figura 13. **Producción de países americanos sobresalientes, al 2011**



Fuente: elaboración propia.

La situación de Brasil es totalmente diferente. Luego de ser una de las economías más bajas a nivel mundial, este país ha encontrado la fórmula perfecta para superar las adversidades económicas. La crisis ni siquiera afectó el crecimiento de la industria cementera, al contrario, su producción al 2010 casi alcanza a la estadounidense y está encaminada a seguir creciendo. Brasil es la mayor economía en Latinoamérica y la segunda en América.

Es conocido por los economistas como un “país emergente” por la industrialización lograda. Si se hace una analogía por continente, el comportamiento de la producción en Brasil es muy parecido al de Turquía.

4.2.2. Asia

En esta región del mundo se encuentran los dos productores más grandes del mundo, China e India, que ocupan el primero y segundo lugar, respectivamente.

En la figura 14 se observan las producciones de cemento en millones de toneladas métricas y la capacidad de producción de clínker; ya a finales del año 2010 y 2011 de varios países del mundo, en el cual se puede recalcar que a la fecha, los países asiáticos, especialmente China y la India, vienen siendo la cabeza de las producciones de este recurso.

Los hindúes tienen un nivel de producción actual de 142 millones de toneladas, que representan más del 6% de producción mundial, que es mayor a 2000 millones de toneladas anuales, aproximadamente.

El consumo de cemento per cápita en la India es de solo 120 kg/per cápita, siendo uno de los más bajos, si se considera que el promedio mundial es de aproximadamente 267 kg/per cápita; el de China es de 450 kg/per cápita, y Japón con 631 kg/cápita.

Figura 14. Producción y capacidad mundial 2010-2011

	Cement production		Clinker capacity ^e	
	2010	2011 ^e	2010	2011
United States (includes Puerto Rico)	67,200	68,400	⁶ 111,000	⁶ 108,000
Brazil	59,100	62,600	50,000	53,000
China	1,880,000	2,000,000	1,500,000	1,600,000
Egypt	48,000	45,000	46,000	46,000
Germany	29,900	33,000	31,000	31,000
India	210,000	210,000	240,000	250,000
Indonesia	22,000	22,000	42,000	42,000
Iran	50,000	52,000	57,000	59,000
Italy	36,300	35,000	46,000	46,000
Japan	51,500	47,000	63,000	60,000
Korea, Republic of	47,200	46,000	50,000	50,000
Mexico	34,500	35,000	42,000	42,000
Pakistan	30,000	30,000	42,000	42,000
Russia	50,400	52,000	65,000	65,000
Saudi Arabia	42,300	44,000	50,000	50,000
Spain	23,500	20,700	42,000	42,000
Thailand	36,500	36,000	50,000	50,000
Turkey	62,700	64,000	64,000	66,000
Vietnam	50,000	50,000	55,000	55,000
Other countries (rounded)	480,000	480,000	460,000	460,000
World total (rounded)	^e 3,310,000	3,400,000	3,100,000	3,200,000

Fuente: VAN OSS, Hendrik G. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. 2012.

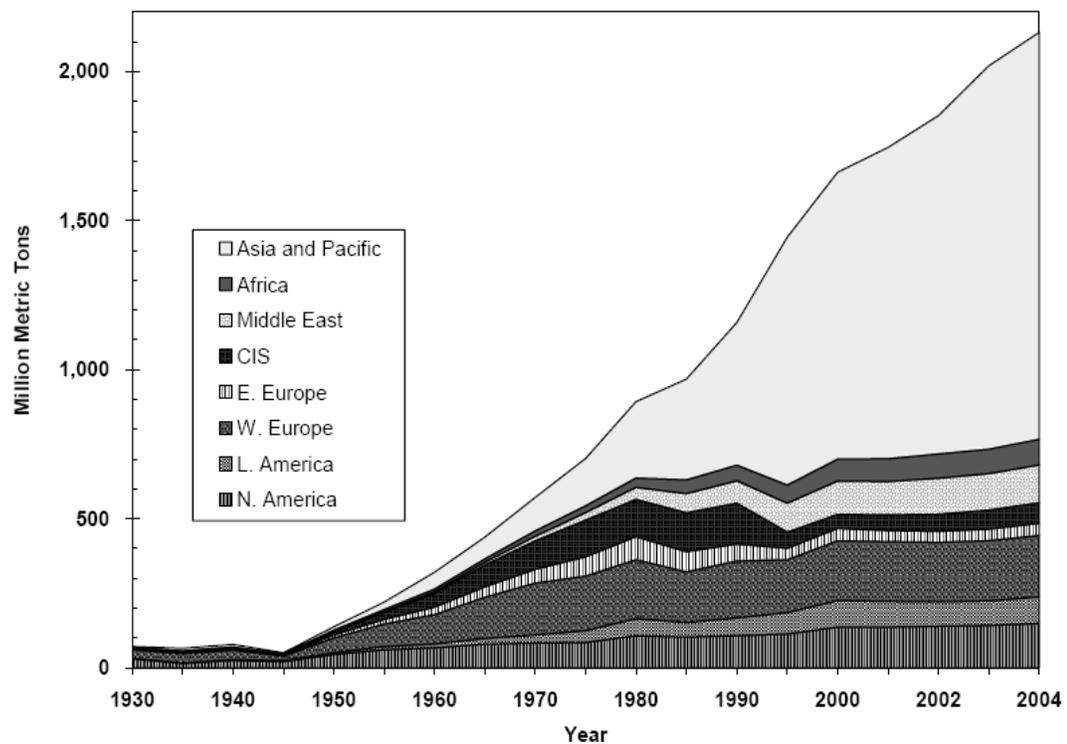
p.5.

La industria china de cemento, que produjo 1.388 millones de toneladas métricas de cemento en 2008, representa casi la mitad de la producción mundial de cemento. Casi el 40% de la producción de cemento de China es de plantas con horno vertical relativamente obsoletos, mientras que el resto de las plantas son más modernas con hornos rotatorios de cemento, incluyendo una nueva suspensión de precalentamiento y horno precalcinador. La provincia de Shandong es la mayor productora de cemento con 10% de la producción total de cemento de China en 2008.

El uso de plantas de energía se comparó con las mejores prácticas tanto nacionales (China) como internacional, con la evaluación comparativa y herramienta de ahorro de energía para el cemento.

Este ejercicio de evaluación comparativa indica que sería posible un promedio técnico potencial de ahorro de energía primaria del 12%, si las plantas encuestadas funcionan a los niveles nacionales de buenas prácticas, en materia de uso de energía por tonelada de cemento producida.

Figura 15. Producción de cemento por región



Fuente: MURILLO MAIKUT, Stephanie M. Cement

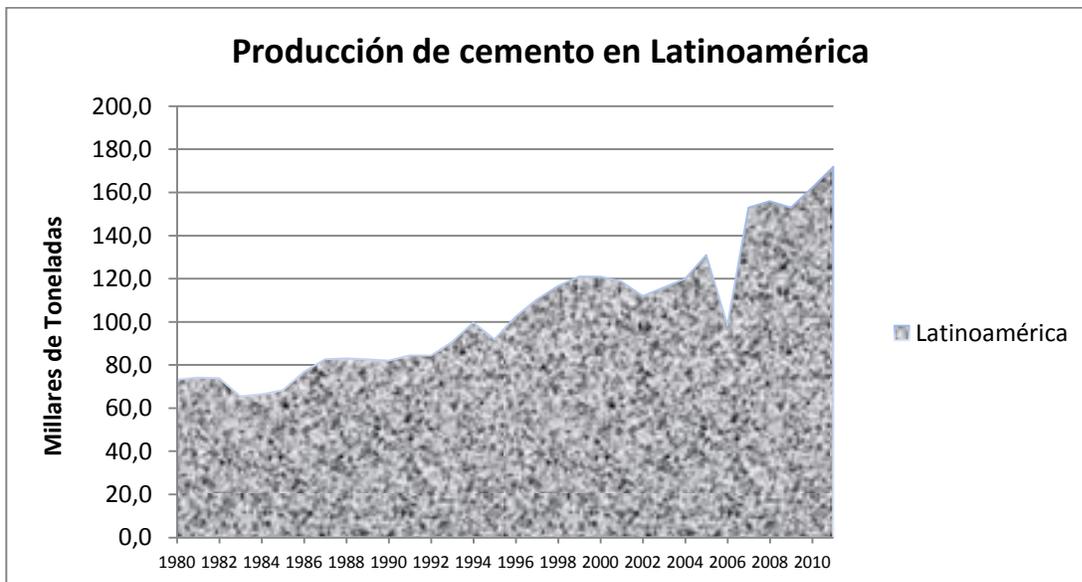
<http://pubs.usgs.gov/of/2005/1152/2005-1152.pdf>. Consulta: agosto 2010

Debido a que la mayoría de las fábricas de cemento en China tienen sistemas obsoletos de producción, los costos de energía son considerablemente altos, por lo que se han hechos estudios de la disminución de costos a largo plazo que mejorarían las tecnologías de producción, tanto en el ahorro de energía como en las disminuciones de las emisiones de CO₂.

En la figura 15 se observa la producción de las diferentes áreas geográficas del mundo en millones de toneladas métricas hasta el año 2004, donde la producción latinoamericana no alcanzaba los 300 millones.

Los datos obtenidos de los resúmenes regionales anuales de la USGS para Latinoamérica y Canadá, permiten visualizar el comportamiento de la producción en esta región con mayor claridad. En la figura 16 se observa el historial de producción desde 1980 hasta el 2011, aproximadamente 20 años, donde el crecimiento es apreciable a través del tiempo. Los países con producción significativa para la región en orden alfabético son: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, República Dominicana, Ecuador, El Salvador, La Guayana Francesa, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Surinam, Trinidad y Tobago, Uruguay y Venezuela.

Figura 16. **Producción de cemento en Latinoamérica**

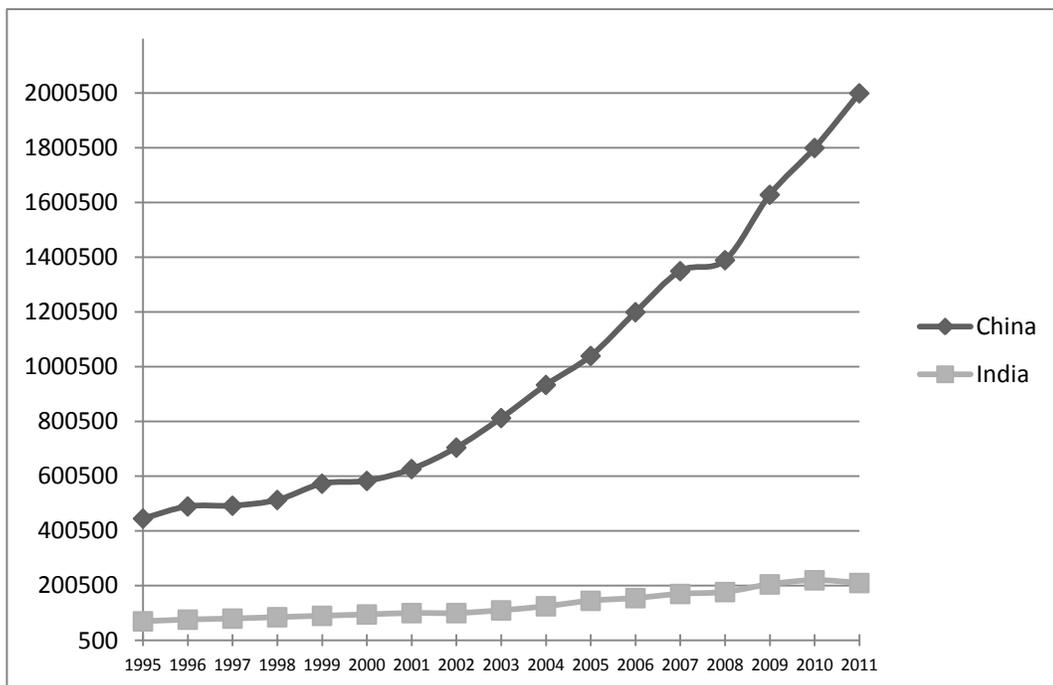


Fuente: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/country/latin.html>. Consulta: febrero 2012

Observando la figura 17 puede darse la impresión que la producción en millones de toneladas en India, es casi despreciable comparada con la China.

Aunque no sea así, es aceptable la primera impresión, pero la realidad es que la industria cementera proveniente de China es el monstruo mundial, fabricando más del 50% del cemento utilizado en el globo terrestre. Ambas industrias van en crecimiento acelerado, especialmente China, que desde 1995 su producción ha sido más del doble al 2011. Solo con observar su comportamiento en esta industria, se puede estar de acuerdo con muchos autores que afirman que este país será la próxima potencia económica mundial.

Figura 17. **Producción de países asiáticos sobresalientes, al 2011 (I)**

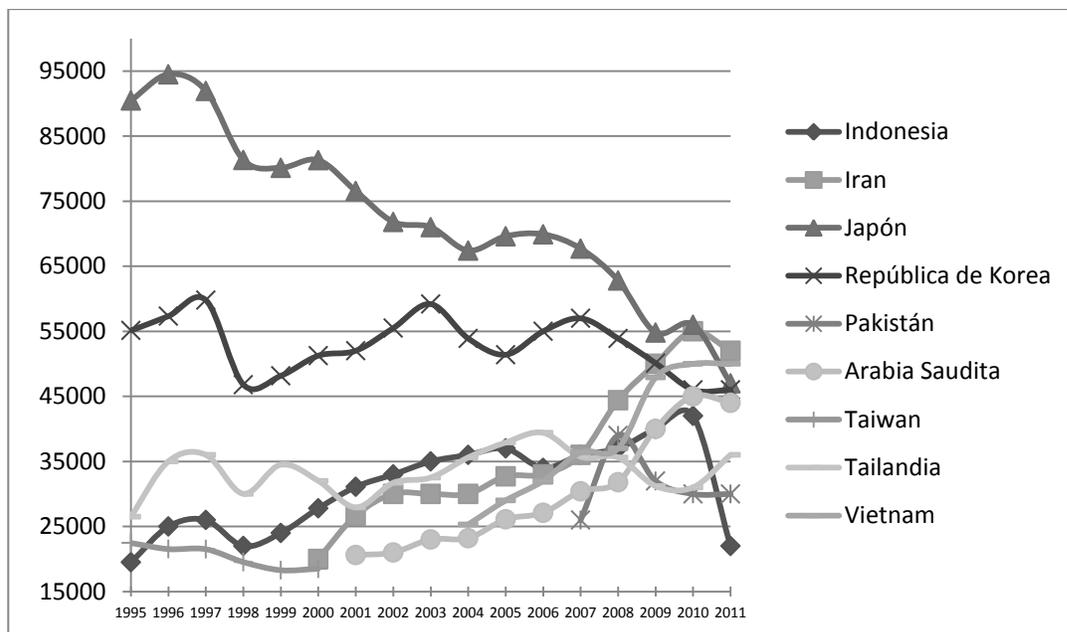


Fuente: elaboración propia.

El resto de países asiáticos con producciones considerables de cementos se observa en la figura 18. Los países como Japón, República de Corea y Tailandia, han tenido fluctuaciones de producción y en los últimos años han decrecido, por la misma situación de ser países desarrollados, refiriéndose a Japón y Corea, cuya demanda de infraestructura está cesando.

En el caso de Tailandia a causa, quizá del tsunami del 2004, hubo mayor producción en los siguientes 2 años; para luego decrecer probablemente por problemas políticos como un golpe de estado en el 2006. Pakistán entró entre los mayores productores en el 2007, pero su producción está en descenso. Taiwán desapareció de la lista desde el año 2001 y no volvió a recuperarse.

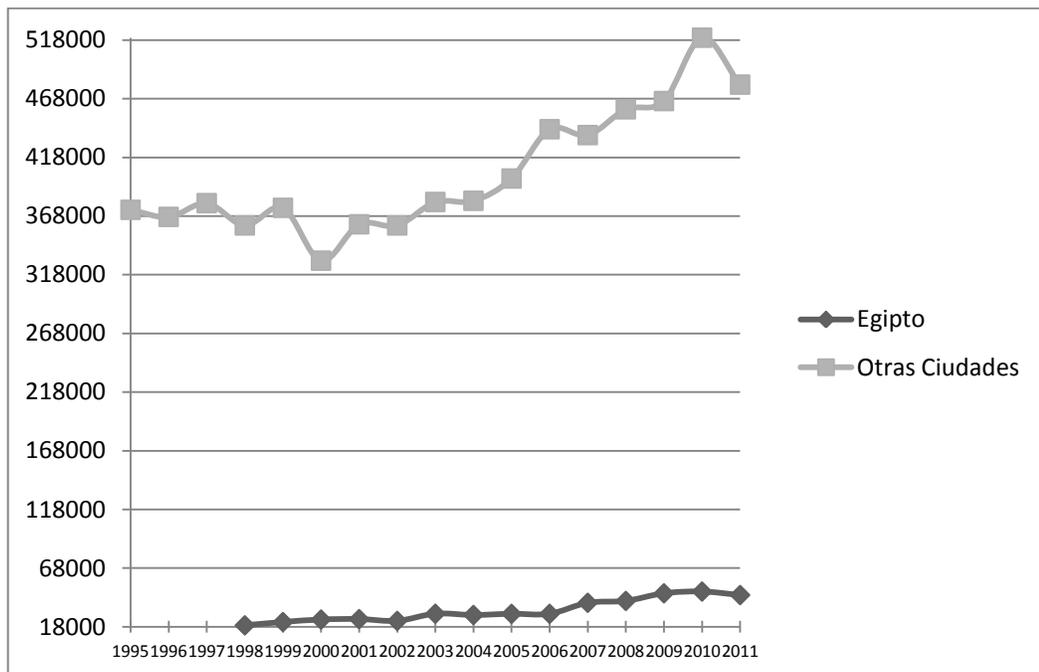
Figura 18. **Producción de países asiáticos sobresalientes, al 2011 (II)**



Fuente: elaboración propia.

En el caso de Indonesia, Irán, Arabia Saudita y Vietnam, su crecimiento es ascensional, reflejando que son países con economías emergentes con mucha demanda en infraestructura, con futuros prometedores en esta industria. En el continente africano, el único país que entra en el *ranking* de producción de cementos es Egipto, con aproximadamente el 1,5% de la producción mundial para el 2010, la cual continúa ascendiendo considerablemente. En la figura 19 también aparecen las producciones del resto de ciudades que contribuyen a esta industria, dentro de la cual se encuentran los países latinoamericanos no mencionados, incluyendo Centroamérica.

Figura 19. **Producción africana y el resto de ciudades para el 2011**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Situación de Guatemala y el resto de Centro América

La producción en Guatemala ha existido desde 1899 por la empresa Cementos Novela, S. A., la cual se transformó a partir de los años setenta en Cementos Progreso, S. A., totalmente de capital nacional hasta finales de la década de 1990. Esta empresa es la más grande de las 11 cementeras que operan en Centroamérica; en 1999 su volumen era de 3 millones de toneladas, pero su capacidad era mucho mayor pues operaba con casi 40% de capacidad. (Romero, Antonio; González, Carlos E., 2006 pág. 33). Hasta el año 2003, como muestra la tabla X, Guatemala era el mayor productor de cemento en la región.

Tabla X. **Producción de cemento en Centro América**

País	1999	2000	2001	2002	2003
El Salvador	1 031	1 063	1 174	1 323	1 391
Guatemala	1 885	...	1 974	2 061	2 039
Honduras	1 211	1 254	1 317	1 224	1 268
Nicaragua	501,6	539,8	552,7	359,3	485,3
Panamá	996,4	849,2	863,5	911,5	948,3

Fuente: ROMERO, Antonio; GONZÁLEZ, Carlos E. Condiciones generales de competencias en Guatemala. p. 33.

En el año 2000, el grupo suizo Holcim, adquirió el 20% del capital accionario de Cementos Progreso, S. A. El grupo tiene una fuerte presencia en los mercados de más de 70 países en todos los continentes.

En el ámbito mundial, Holcim tiene como principales competidores a la empresa francesa Lafarge y Cementos Mexicanos (CEMEX), siendo la primera la más grande productora del mundo, en tanto que Holcim y CEMEX han competido por el segundo lugar.

La multinacional Holcim desde los años 60 del siglo pasado ya era la principal accionista de la cementera APASCO de México. La fusión Holcim-Apasco constituye la segunda cementera más grande de México. En el año 2000 Holcim y Holcim-Apasco crearon la empresa Holcim Centroamérica (Holcemca), con participación en el capital social de un 44% de la primera y del 56% de Holcim-Apasco. Holcemca tiene presencia en todos los países del istmo, ya sea como propietaria de empresas, o como accionista o empresa asociada a las cementeras nacionales que operan en Guatemala, Costa Rica, Honduras, Nicaragua y El Salvador.

En el caso de Cementos Progreso de Guatemala, Holcemca adquirió, como ya se mencionó, el 20% de las acciones. En el resto de países centroamericanos Holcim-Apasco cuenta en Costa Rica con el 65% de las acciones de INCSA; en el Salvador con el 20% del capital accionario de CESSA; en Nicaragua es propietaria de la cementera CEMENIC, en tanto que en Panamá adquirió en el año 2000 el 100% de las acciones de Cemento Panamá, S. A.

Por su parte, la empresa CEMEX realiza operaciones de producción y distribución de cemento y otros materiales de concreto en Costa Rica, Nicaragua y Panamá.

En el primero de estos tres países este gigante del cemento en el mercado mundial compró Cementos del Pacífico S. A. en 1999, cinco años después de que esta fue privatizada. En el año 2001, Cemex se convirtió en propietaria de la cementera CANAL de Nicaragua; en Panamá CEMEX adquirió en 1994 la empresa Cemento Bayano, luego de que esta fuera privatizada en 1991.

La corporación francesa Lafarge, está asociada a la industria cementera hondureña (INCEHSA), desde que esta empresa fuera privatizada en los primeros años de la década de 1990. Analizando la situación descrita, se puede concluir que las grandes industrias transnacionales Lafarge, Holcim y Cemex, intervienen de uno u otro modo en la producción de cemento en la región centroamericana, las cuales ejercen presión como competencia en el mercado del istmo.

Cabe también señalar que la presencia de Lafarge en Honduras hace de esta multinacional un competidor potencial para el monopolio que históricamente ha constituido la empresa Cementos Progreso, S. A. en el mercado guatemalteco. Ello, al igual que la creciente producción exportada desde México por Holcim-Apasco, explicaría en parte el hecho de que el precio del cemento en el mercado de Guatemala sea el más bajo de Centroamérica.

Por otra parte, Guatemala y el resto de países centroamericanos producen y distribuyen fundamentalmente el cemento tipo portland. Esta clase de cemento responde a estándares internacionales en materia de calidad y es uniforme en el Istmo Centroamericano. La producción de otros tipos de cemento es poco significativa. Al respecto, las importaciones y exportaciones que realizan los países centroamericanos son cuantitativamente marginales en cuanto al total de flujos comerciales que los mismos tienen al interior del Istmo y con el resto del mundo.

Respecto de los precios del producto en Guatemala el mercado de cemento estuvo regulado hasta el año 2000 a través del acuerdo gubernativo N° 517-90, el cual establecía el precio de venta del cemento portland. Desde el 2006 se liberó el precio de este tipo de cemento al haberse derogado dicho acuerdo.

Es importante mencionar que el precio del cemento producido en Guatemala es el más bajo de los países centroamericanos, pero al mismo tiempo es uno de los más altos del mundo. (Romero, Antonio; González, Carlos E., 2006 pág. 36)

Tabla XI. **Exportaciones e importaciones de cemento Portland**

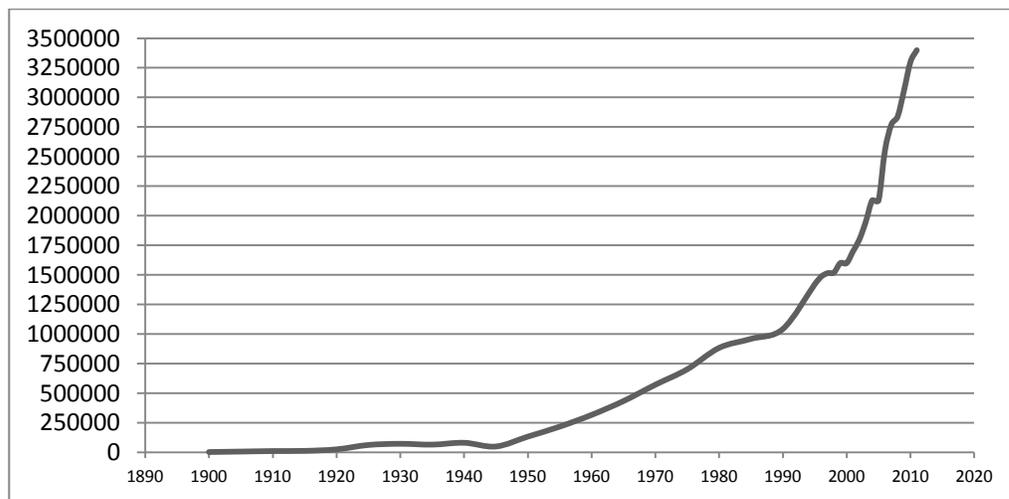
C1<1zemento	Importaciones			Exportaciones			Principales países de origen de las importaciones
	Valor (dólares)	Volumen (toneladas)	Proporción ^a (%)	Valor (dólares)	Volumen (toneladas)	Proporción ^a (%)	
Guatemala	24 897 782,00	323 504,98	0,37	705 154,00	2 983,26	0,03	República Dominicana, 48,4%; Costa Rica, 46,03%; México, 4,1%
El Salvador	7 274 021,00	81 421,69	0,17	3 414 003,00	69 188,02	0,27	Costa Rica, 52,7%; Nicaragua, 29,8%; México, 7,85%
Nicaragua	4 968 503,00	105 136,61	0,26	1 426 282,00	26 893,12	0,24	Costa Rica, 94,9%; México, 2,3%
Honduras	4 777 721,00	53 792,97	0,14	1 454 074,00	24 090,11	0,15	Japón, 36,59%; El Salvador, 30,8%; Guatemala, 11,56%
Costa Rica	770 272,00	4 573,25	0,01	12 523 460,00	341 307,46	0,22	México, 28,28%; Bélgica, 27,7%; Estados Unidos, 22,4%

Fuente: Fuente: ROMERO, Antonio; GONZÁLEZ, Carlos E. Condiciones generales de competencias en Guatemala. p. 33.

Desde esa óptica es notable constatar en primer lugar que, el valor de las importaciones de cemento en el caso de Guatemala fue en el año 2003 equivalente a solo el 0,37% del total de importaciones de bienes, al tiempo que las exportaciones de este producto fueron menores al 0,1% de la totalidad de ventas externas de bienes realizadas por el país en ese año. En segundo lugar, hay que destacar que el 48,4% de las importaciones de Guatemala provinieron en el año mencionado de República Dominicana y el 4% restante de las importaciones se originaron de México. Ver tabla XI.

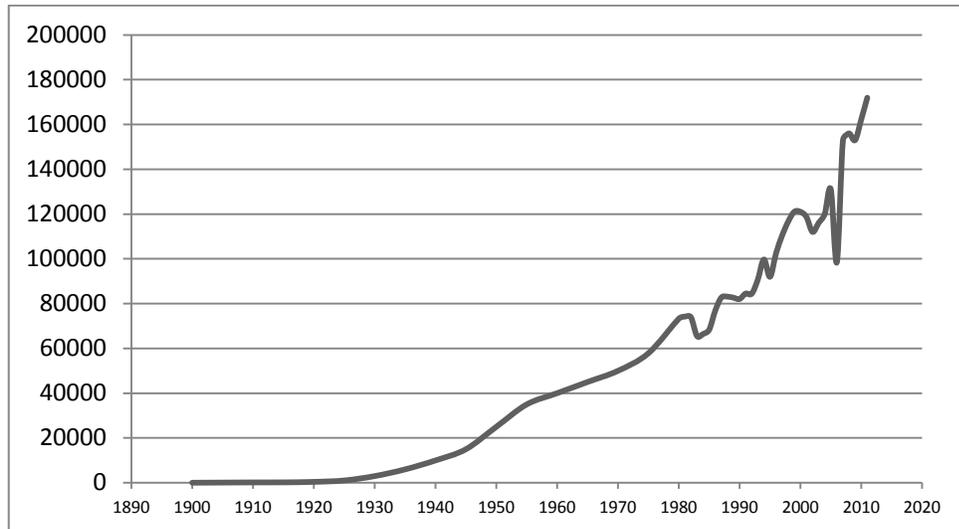
Las siguientes ilustraciones muestran claramente la evolución que desde 1900 hasta la actualidad ha tenido la producción de la industria del cemento en Guatemala, América Latina y a nivel mundial.

Figura 20. **Producción mundial 1900-2011**



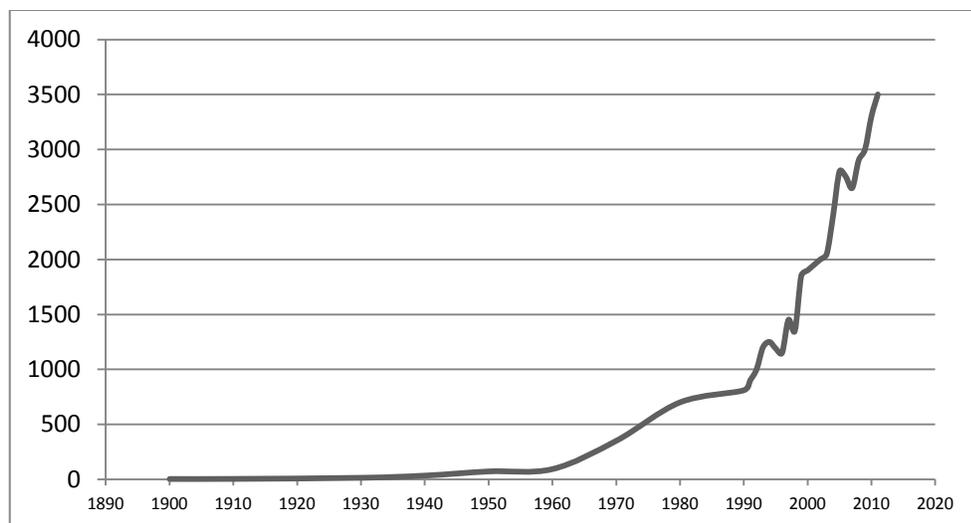
Fuente: <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/>. Consulta: febrero 2012.

Figura 21. **Producción latinoamericana 1900-2011**



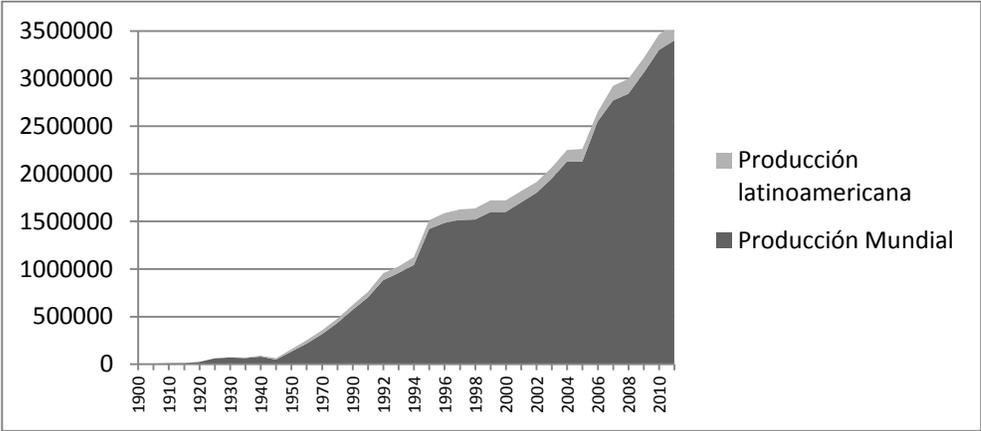
Fuente: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/country/latin.html>. Consulta: febrero 2012

Figura 22. **Producción guatemalteca**



Fuente: TAFUNELL (2003), Cementos progreso (2000), CEPAL (2005), Schatan y Avalos (2003) y Cementos Progreso (2010)

Figura 23. **Relación producción mundial y latinoamericana 1900-2011**



Fuente: elaboración propia.

5. ESTUDIOS RECIENTES EN MEJORA DEL CEMENTO DEL FUTURO

En todos los campos de la ingeniería la tecnología y la búsqueda de nuevas soluciones es el principal objetivo. Nuevas ideas que incentivan a la investigación y a la experimentación han tocado a la puerta.

Respecto del cemento, muchos han sido los intentos por encontrar uno que cumpla con la mayoría de los propósitos mecánicos, ambientales, económicos, de producción, entre otros.

El uso de materiales alternativos en la industria cementera reduce las emisiones globales de CO₂ y no tiene un impacto negativo en el proceso de fabricación, ni en las emisiones o la calidad técnica del producto final.

El coprocesado en la industria cementera se realiza de una manera confiable sin afectar a la seguridad y salud de las personas.

Por esta razón, se hace una breve descripción de los últimos estudios hechos para encontrar ese cemento ideal que logre sobrepasar todas las expectativas planteadas.

5.1. Actividad hidráulica de un cemento belítico obtenido a partir de cenizas volantes tipo C: influencia del aditivo y tipo de curado

Los cementos belíticos son aquellos que han sido modificados para la reducción de los consumos energéticos en la industria del cemento, prolongando en la medida de lo posible, las fuentes de materias primas calizas; necesidades a las que puede darse respuesta mediante la producción de cementos de alto contenido de silicato dicálcico. Para esta situación la fabricación de cemento fue modificada con cenizas volantes tipo C, para ser convertido en un cemento belítico. El proceso de fabricación incluye un pretratamiento hidrotermal, donde se obtienen los geles puzolánicos hidratados precursores del cemento.

En la segunda etapa, los geles se deshidratan mediante un calentamiento controlado dando lugar al CBCV (Cemento belítico de cenizas volátiles). La adición de cenizas tipo C, disminuye aún más o elimina por completo cantidades extras de cal viva. La utilización de las cenizas volantes en la Industria de la construcción alcanza actualmente un 47% del total de su producción. Esta utilización significa: preservar los recursos naturales, dar un valor añadido a los materiales, mayor durabilidad al hormigón y añadir un etiquetado verde al mundo de la construcción.

Para otros autores que han experimentado con las cenizas volantes concluyen que son útiles en las características físicas y químicas como reducción del calor de hidratación, mejorar la trabajabilidad, conseguir resistencias elevadas a largo plazo, reducción de la permeabilidad y la reducción del contenido de cemento para reducir el costo.

Los gobiernos de muchas regiones están apoyando la idea de la utilización, cada vez más, de materiales secundarios como materia prima para la fabricación y producción de cemento, ya que permite ahorro energético, preservación de las materias primas naturales y reducción de las emisiones de bióxido de carbono al ambiente y los cementos belíticos contribuyen a esa reducción, debido al menor contenido de CaO (óxido de calcio, cal viva) requerido para la formación de la belita en comparación con el cemento portland tradicional.

Las cenizas volantes son generadas por la combustión del carbón para producir energía térmica. Existen dos clases, las F y las C y se diferencian entre sí por la composición del material. Las cenizas volantes de clase F que son las más abundantes, tienen menos de un 15% de cal y contienen un porcentaje alto de la combinación de sílice, alúmina y óxido de hierro (superior al 70%), mientras que las C, las de interés, tiene un porcentaje alto de cal, muchas veces superior al 30%, cuya razón se disminuye la adición de CaO.

De acuerdo con los ensayos realizados el clínker óptimo de cemento belítico se consiguió con una temperatura del tratamiento hidrotérmico de la ceniza de 200 °C, donde las fases precursoras obtenidas, tanto en agua como en medio básico, NaOH (Hidróxido de Sodio), fueron: katoita gel, junto con calcita y anhidrita. También se llegó a la conclusión que la hidratación es más rápida cuando el curado es a 40 °C, duplicando prácticamente los valores del grado de hidratación cuando el curado se realiza a temperatura ambiente.

En propiedades mecánicas, como era de esperar, el aditivo reductor de la demanda de agua produce un aumento de la resistencia a compresión, principalmente a primeras edades, cuando el curado es normal.

Cuando no se utilizan aditivos, la porosidad total disminuye con el tiempo. La presencia del aditivo hace disminuir tanto la porosidad total como el diámetro medio de poro, aun después de 7 días de hidratación.

5.2. Cementos compuestos elaborados con puzolana natural y escoria granulada de alto horno

La puzolana natural es el nombre que recibe la ceniza volcánica, que proviene de la población de Puzzuoli, en las faldas del Vesubio, donde ya era explotada, como se mencionó en el primer capítulo, en tiempos de los romanos. Con la evolución de nuevos productos, estas puzolanas están siendo sustituidas por puzolanas artificiales como escorias, humo de sílice, metacaolines y cenizas volantes.

Sin embargo, para muchos investigadores estos sustitutos de la puzolana no presentan la misma superficie de reacción que las de origen natural, ya que la puzolana de origen volcánico presenta una mayor cantidad de poros originados por los gases de la erupción, no presentando actualmente propiedades óptimas iguales.

De acuerdo con investigaciones, cuando el contenido de adiciones es alto, la utilización de puzolana y escoria en este tipo de cementos presenta la peculiaridad de disminuir la resistencia inicial del cemento resultante. Sin embargo, si algunas o ambas adiciones se activan, este problema puede minimizarse.

Así, se pueden obtener adecuadas resistencias iniciales con la activación física, por el aumento en la finura de la adición, la activación térmica, por el incremento en la temperatura de curado, y la activación química, por la incorporación de hidróxidos alcalinos a la mezcla.

Estos resultados indicaron que los cementos ternarios presentan un mejor comportamiento resistente que los cementos binarios. Las máximas resistencias a compresión en las primeras edades (2 y 7 días) se alcanzan con hasta 13% de puzolana natural y 5% de escoria, mientras que a edades más avanzadas se trasladan a mayores contenidos de puzolana y escoria.

Se experimentó con la finura de la puzolana, de tal manera que esta no modificara el consumo de agua del mortero y se eligió moler en mayor medida la puzolana que la escoria, puesto que la primera presenta un mayor grado de molturabilidad y, en consecuencia, el proceso de molienda es más económico.

En función de lo que se determinó, la resistencia inicial del mortero con cemento compuesto (puzolana natural más escoria) será función principalmente del contenido de puzolana natural; mientras que la resistencia final será función de la cantidad incorporada de ambas adiciones. Es decir, que la pérdida de resistencia inicial comúnmente ocasionada por la incorporación de puzolana o escoria en finuras convencionales puede ser subsanada a partir de la activación física de alguna de ellas y en este caso en particular de la puzolana natural.

En conclusión, la activación física de la puzolana natural mejora la resistencia a edades tempranas del cemento ternario, mientras que la acción conjunta de ambas adiciones contribuye con la resistencia a edades más avanzadas; esto hace que el cemento ternario presente un adecuado desarrollo resistente.

La utilización de cementos compuestos conteniendo una adecuada combinación de cemento portland y dos adiciones, produce un empleo más racional de los recursos naturales, sin comprometer la resistencia a compresión o flexión del mortero.

5.3. Propiedades y durabilidad de los cementos adicionados con metacaolín

El metacaolín se ha estado investigando como material puzolánico en los últimos años en todo el mundo, debido a su composición química, $Al_2Si_2O_7$, y a su estructura cristalina amorfa. El metacaolín es un material cementante que no es un subproducto industrial ni existe en forma natural, sino que se obtiene mediante el tratamiento térmico del caolín, un mineral que existe en la naturaleza. Se fabrica específicamente para mezclas cementantes de composición variable. El caolín consta de capas alternativas de sílice y alúmina.

“Esta estructura cristalina laminar, eléctricamente neutra y común a los minerales arcillosos, da lugar a partículas muy finas y permite que estas se desplacen fácilmente las unas sobre las otras”.⁷

Están conformadas por partículas finamente divididas y de pobre cristalinidad, que al entrar en contacto con un medio húmedo y temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación del cemento, formando silicatos dicálcicos y aluminatos dicálcicos hidratados, encargados de la mayor parte de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las pastas, morteros y los hormigones.

⁷ SALAH, A. Abo-El-Enein; ABBAS, Rafik; EZZAT, El-Sayed. Propiedades y durabilidad de los cementos adicionados con metacaolín. p. 133.

A esta estructura debe sus propiedades físicas más características: la suavidad, el tacto jabonoso y la facilidad de exfoliación. La caolinita, denominación mineralógica del silicato de aluminio hidratado, que es el principal componente del caolín (40-70%).

Investigaciones como las de Salah y Rafik (2010) han sugerido que “la adición de metacaolín a los cementos puzolánicos ordinarios (OPC) entre 25% y 30% de la mezcla, permite la fabricación de cementos resistentes a compresión”. (p.134)

Mientras que autores como Restrepo G., Restrepo B. Y Tobón (2006) aseguran que “los porcentajes de adición van dentro del rango del 15% al 50%, a temperatura adecuada para la calcinación del caolín de 700 °C”. (p.34)

Adicionalmente se indica, que al realizar reemplazos de cemento por metacaolín, con porcentajes entre el 30% y 40%, se logra remover completamente el hidróxido de calcio; sin embargo, la resistencia a la compresión en estas mezclas con reemplazos por encima del 20%, se disminuyen drásticamente.

Todos estos estudios van a parar al mismo punto: la preocupación por el impacto en el medio ambiente de las emisiones de CO₂ asociadas a la fabricación de cemento, junto con el elevado coste de dicho proceso. Se ha mostrado que no solo es importante la temperatura sino el tiempo de estadía, condiciones del horno, tamaño de partícula y pureza del caolín. Una observación importante hecha por varios autores es que a temperaturas mayores de 950°C decae la actividad puzolánica del metacaolín.

Este tratamiento térmico (calcinación) descompone la estructura del caolín de forma que las capas de alúmina y sílice pierden su orden estructural de largo alcance, conduciendo a la formación del metacaolín (MK). Este material puzolánico amorfo presenta propiedades hidráulicas latentes que permiten su utilización como adición al cemento.

Las fases de hidratación del metacaolín, resultantes de su reacción con productos de la hidratación del cemento, están relacionadas con la relación MK/cal, la temperatura y la presencia de distintos activadores. Se incorporan materiales sustitutivos sólidos finamente molidos que reemplazan parte del cemento empleado en la elaboración del hormigón y que reaccionan químicamente con el cemento durante el proceso de hidratación, modificando la microestructura de la pasta.

Además de su impacto favorable sobre el medio ambiente, estos materiales cementantes pueden mejorar la trabajabilidad, las propiedades mecánicas y la durabilidad, además pueden presentar reactividad puzolánica, reactividad hidráulica latente o una combinación de ambas.

De acuerdo con esos mismos resultados, la sustitución del 30% del cemento puzolánico ordinario (OPC) por metacaolín, tiene un efecto negativo en el comportamiento de las pastas endurecidas expuestas al sulfato de magnesio en una disolución al 5%.

Por lo expuesto anteriormente, se debe prestar atención a su uso en hormigón expuesto a ambientes, con una alta concentración de sulfatos de magnesio. Por el contrario, estas mezclas de cemento presentan una buena resistencia frente a disoluciones de sulfato de sodio. Mientras que pastas de cemento puzolánico presentan una alta resistencia al ion cloruro.

La actividad puzolánica del metacaolín se evidencia cuando se obtiene un material con una serie de ventajas sobre los cementos portland sin adiciones, tales como:

- Incremento de las propiedades mecánicas especialmente a edades tempranas.
- Incremento de la resistencia al ataque de sulfatos, excepto los de magnesio, antes mencionados.
- Incremento de la resistencia a la reacción álcali sílice (ASR) y del refinamiento de poros.
- Decrecimiento de la permeabilidad y de la corrosión del refuerzo.
- Disminución en la evolución del calor de hidratación.

5.4. Durabilidad de pastas de cemento api clase b expuestas disoluciones acuosas de iones cloruro, sulfato y magnesio

Diferentes asociaciones definen las propiedades de los cementos. Las más comunes son las de uso en construcción, ASTM, y las API, que regulan el uso del cemento en la industria petrolera. Estas normas clasifican a los cementos en tipo A, B, C, D, E, F, G, H y J.

El tipo B, es apropiado para ser utilizado desde la superficie hasta 600 pies de profundidad cuando las condiciones requieren moderada o alta resistencia a los sulfatos. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos. La durabilidad de un cemento es su capacidad de resistencia a lo largo del tiempo frente a una variada gama de acciones, químicas o no, de carácter agresivo.

En la práctica, los principales procesos químicos que pueden conducir a un deterioro del cemento, son la reacción de sales magnésicas y cloruros, disueltos en aguas de formación con el cemento endurecido, el ataque de sulfatos a las fases aluminoférricas de dicho material o la carbonatación de compuestos cálcicos.

Entre los iones agresivos presentes en las aguas de formación que pueden estar en contacto con el cemento API clase B destacan los denominados iones fundamentales (sulfato, cloruro o magnesio) y gases como el dióxido de carbono.

De los componentes del cemento, particularmente susceptibles a ser atacados son algunas de las fases presentes en el clínker: el aluminato tricálcico (C_3Al) y el ferroaluminato tetracálcico (C_4AlF) pueden reaccionar con el ión sulfato, formando ettringita expansiva que causa la fisuración del material y potencia la acción agresiva del ión cloruro, al facilitar la difusión de cloruros a través del cemento API clase B.

En contraposición, los silicatos anhidros bicálcico (C_2Si) y tricálcico (C_3Si) se hidratan originando portlandita que, a su vez, provoca que el pH del cemento sea superior a 12.5, evitando fenómenos de corrosión.

Varias investigaciones muestran que la portlandita es una de las fases cristalinas que aumenta en contenido con el transcurso del tiempo, tal y como indica el incremento de la intensidad de sus reflexiones; si bien la presencia del ion magnesio en disolución hace que dicho aumento sea menos significativo.

El efecto salinante y la presencia de iones magnesio en disoluciones de los iones cloruro y/o sulfato, en contacto con el cemento API utilizado, potencian, significativamente, la solubilización del calcio presente en dicho material.

Los ataques químicos de los iones sulfato y cloruro sobre la pasta, se ven favorecidos por la presencia del ión magnesio en la disolución, cuya capacidad de secuestrar aniones hidróxido causa un aumento de la solubilidad de la portlandita y, como consecuencia, facilita la formación de compuestos expansivos como la ettringita.

5.5. Cemento obtenido a partir de residuos sólidos

Una de las soluciones más ventajosas, implantada hace más de 30 años para la gestión de los residuos sólidos domésticos generados en las ciudades, es sin duda la incineración con y sin recuperación de energía. En los últimos estudios se ha analizado la viabilidad del uso de las cenizas y escorias procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos, como materia prima secundaria para la obtención de fases cementantes.

La utilización de residuos sólidos como combustibles alternativos, también llamada coprocesado, disminuye la utilización energética de los combustibles fósiles o tradicionales y, al mismo tiempo, reduce sus emisiones. Por otra parte, también su uso como materia prima alternativa tiene un gran número de beneficios, entre los que se pueden destacar la menor necesidad de explotación de las canteras y una mejora medioambiental de tales actividades. La sustitución del clínker en la producción del cemento, es otro ejemplo de la contribución positiva del uso de residuos en la fabricación del cemento.

Se ha estudiado la transformación de los residuos sin un tratamiento previo, en función de la temperatura de calentamiento, así también la influencia del lavado de los residuos con alto contenido en NaCl y KCl en la formación de fases obtenidas a las diferentes temperaturas de calcinación. Existen inconvenientes en la utilización de estos residuos, ya que tienen que ser tratados previamente a su incorporación por su alto contenido en cloruros. Sin embargo, existen numerosas investigaciones sobre el potencial de dichos residuos en el ámbito de la construcción: como áridos, bloques de mampostería, carreteras, etc.

Además de los cloruros estos residuos contienen elementos como Ca, Si, Al, y S, y pueden ser empleados como materia prima para la fabricación de cementos especiales tipo sulfobelíticos, de alinita, de fases con propiedades hidráulicas como el cloroaluminato cálcico y reemplazando parcialmente las materias primas naturales del cemento Portland, después de su desalinización.

No todos los residuos sólidos son adecuados para ser utilizados como combustible o materia prima alternativa; claros ejemplos son los residuos hospitalarios y sanitarios, baterías y residuos municipales no tratados.

Los materiales alternativos usados por la industria cementera provienen exclusivamente de residuos seleccionados, bajo adecuado control de calidad, ya que normalmente, estos necesitan un pretratamiento, por ejemplo: secado, triturado, mezclado, molienda y homogeneización. Por lo tanto, este pretratamiento es una parte integral de la operación de recuperación.

En países como España, donde se han implementado este tipo de ideas, a menudo los residuos son preparados por proveedores externos y expertos en tratamiento de residuos, antes de ser utilizados como combustible alternativo.

La energía que proporciona el coprocesado se utiliza completamente en el proceso de fabricación del clínker. El contenido calorífico puede variar dependiendo del residuo utilizado. Sin embargo, no es solo el poder calorífico el que cuenta, sino también el contenido mineral del residuo (ceniza), que puede ser utilizado como materia prima alternativa en la producción del clínker.

De los 60 millones de toneladas de materias primas que se consumieron en el año 2007 para fabricar cemento en España, 5,7 millones procedían de residuos o subproductos industriales, con lo que se evitó el vertido de unos 90 estadios de fútbol llenos de residuos. En 2006, aproximadamente el 5% de las materias primas utilizadas en la producción de clínker en Europa fueron materias primas alternativas: un total de 14,5 millones de toneladas.

La Guía para la Selección y el Uso de Combustibles y Materias Primas adecuadas en el proceso de producción del cemento fue realizada por la entidad Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento (CSI), quien proporciona un manual práctico para los productores de cemento. Además, existe legislación dentro de la Unión Europea que regula el uso de combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera europea.

En conclusión, los residuos sólidos previamente tratados, pueden ser utilizados como sustituto de los combustibles fósiles en el proceso de fabricación del cemento o como materia prima secundaria, sustituyendo en cierto porcentaje a las puzolanas naturales, principales emisoras de CO₂ en el proceso de clinkerización, disminuyendo los contaminantes, la explotación en canteras y reutilizando desechos, que anteriormente, eran desperdiciados.

5.6. Hidratación del cemento de aluminato de calcio en condiciones de muy elevada alcalinidad

Los cementos portland deben sus propiedades hidráulicas a los silicatos de calcio y al aluminato tricálcico, mientras que el cemento de aluminato de calcio las debe al aluminato monocálcico. El contenido de Al_2O_3 de este último cemento, según UNE-EN 14647, debe estar comprendido entre el 36 y el 55%.

Así, mientras tiene un tiempo de fraguado prácticamente análogo al del cemento portland, su endurecimiento es mucho más rápido; por lo cual, sus morteros y hormigones presentan al cabo de pocas horas una resistencia del mismo orden que la obtenida a 28 días con cemento portland.

Con el tiempo, sus resistencias disminuyen al tener lugar el proceso de conversión, ya que la hidratación del cemento de aluminato de calcio a temperatura ambiente produce aluminatos de calcio hidratados hexagonales. Esta conversión ocasiona al hormigón de cemento de aluminato de calcio, un aumento de porosidad y por tanto una disminución de resistencia. La conversión puede transcurrir en pocos minutos o necesitar años, dependiendo principalmente de la temperatura.

El cemento de aluminato de calcio resiste notablemente mejor que los cementos portland la acción de aguas puras, agua de mar, aguas sulfatadas y terrenos yesíferos, así como la acción de sales de magnesio y ácidos diluidos. Sin embargo sus hormigones son menos resistentes a la acción de los hidróxidos alcalinos.

Se sabe que en medios fuertemente alcalinos se retrasan los procesos de rápido endurecimiento del cemento de aluminato de calcio con agua. No obstante a los 28 días se obtienen valores de resistencia a compresión ≥ 80 MPa.

La razón por la que se propone la incorporación de cemento de aluminato de calcio al proceso de elaboración de hormigones alcalinos es que muchos materiales potencialmente susceptibles de ser activados alcalinamente, carecen de aluminio suficiente en sus composiciones para generar un producto con suficientes prestaciones mecánicas, por lo que sería necesario añadirse para así poder conformar el esqueleto prezeolítico que confieren dichas resistencias mecánicas a los cementos alcalinos.

El cemento hidratado con agua, desarrolla desde las primeras edades unas resistencias mecánicas a compresión muy elevadas. Sin embargo, esta resistencia no sigue aumentando con la edad de curado. A 28 días se obtienen valores similares a los de 2 días, mientras que a 180 días, estos valores incluso disminuyen ligeramente.

Estudios previos han mostrado que el principal producto de reacción de la activación alcalina de las cenizas volantes procedentes de las centrales termoeléctricas es un gel de aluminosilicato sódico. En estudios realizados por Pastor, Fernández, Vázquez y Palomo (2009) se indicó que las muestras hidratadas en condiciones alcalinas, “la resistencia a compresión a 2 días de todas, es muy inferior a la de la muestra de referencia, situándose en valores próximos a 10 MPa. Sin embargo, estos valores crecen con el tiempo de curado, especialmente con disoluciones muy concentradas en álcalis.” (p. 140)

Otro hecho importante a destacar en este estudio es la influencia de la concentración de álcalis. Muestran que el aumento de la resistencia tiene lugar hasta que la concentración de álcalis alcanza un valor alrededor de 8M, por encima del cual si se sigue aumentando la concentración de la disolución de NaOH, el desarrollo resistente desciende.

En lo que respecta a la resistencia a la flexión, también el cemento de aluminato de calcio activado con NaOH, es el que da lugar a las resistencias más altas. A la edad de 180 días, muestra muy elevado valor de resistencias mecánicas a flexión; valor que dobla el obtenido a 28 días.

Se concluyó entonces que al aumentar el tiempo de curado va aumentando la cantidad de calcio que reacciona, formándose una mayor cantidad de aluminato cúbico y probablemente con una mayor cristalinidad.

Ello justificaría que a los 28 días de curado, los cementos hidratados alcalinamente aumenten considerablemente su resistencia mecánica (tanto a flexión como a compresión), ya que al hidratar alcalinamente el cemento de aluminato de calcio, en medios fuertemente concentrados, se modifica la naturaleza de los productos de reacción formados y consecuentemente el comportamiento mecánico en lo que respecta a la hidratación normal de CAC con agua.

5.7. Hidratación y microestructura de cemento portland sustituido parcialmente con sílice ultrafina

La utilización de desechos geotérmicos que son subproductos de la generación de electricidad en plantas que utilizan energía geotérmica en las pastas de cemento, ha sido fuente de investigaciones en los últimos tiempos, de la misma manera que otras adiciones.

Este desecho está compuesto principalmente de sílice amorfa de tamaño nanométrico, con cloruros de sodio y potasio.

Se investigaron cementos con niveles de sustitución de 0, 10 y 20%, curados a 20 y 60 °C. En estudios de investigadores Gómez y Escalante (2009) se encontró una disminución en la porosidad y un intenso consumo de hidróxido de calcio por la reacción puzolánica. “Sin embargo, para pastas con 20% de desecho geotérmico, se observó agrietamiento con la presencia de gel de reacción álcali sílice y ettringita; fue más acentuado a 60 °C y no se observó para pastas de cemento puro y con 210% de desecho”. (p.14)

Se ha encontrado que el reemplazo del CPO (cemento portland ordinario) por varios materiales ricos en sílice, tales como humo de sílice, ceniza de la cáscara de arroz o sílice amorfa de Hil-Sil, mejoran las propiedades de los morteros y hormigones. El efecto combinado de microllenado (reduciendo la porosidad) y el comportamiento puzolánico (reacción con el Ca(OH)_2 generado por la hidratación del cemento) proporcionan esas ventajas.

Se sabe también que muchos materiales alternativos, como los mencionados, aceleran la hidratación del cemento; ya que las partículas de estos materiales actúan como sitios de nucleación para la precipitación de los productos de hidratación del cemento Portland, tales como el gel C-S-H (*Calcium Silicate Hydrate*), mejorando las propiedades del cemento.

En los resultados de investigaciones al agregarle los residuos geotérmicos la hidratación del cemento se aceleró en presencia del desecho geotérmico, de acuerdo con los resultados de difracción de rayos X cuantitativa. En general puede decirse que la presencia del desecho influyó significativamente en la hidratación y la microestructura del cemento Portland.

5.8. Optimización de la resistencia a compresión de lechadas de cemento reforzadas con adiciones

Como se mencionó en el primer capítulo, la diferencia entre una adición y un aditivo es su origen, una es mineral y el otro es químico, respectivamente. El humo de sílice, las cenizas volantes y la bentonita entonces, son adiciones, mientras que el látex es un aditivo. Con el fin de reducir costes o mejorar algunas de las propiedades de las mezclas utilizadas en el cemento inyectado, se incorporan al cemento materiales como las cenizas volantes (CV), el humo de sílice (HS), la bentonita (B) o el látex.

Con la incorporación del látex, la lechada presenta mejoras de adherencia, impermeabilidad y resistencia a la flexotracción. Las CV son un subproducto industrial que resulta de la combustión del carbón pulverizado en las centrales térmicas. Su inclusión reduce los costes, disminuye la exudación y aumenta la densidad, mejorando tanto la impermeabilidad como la durabilidad de las lechadas.

La B es una arcilla típica que se genera por la alteración de la ceniza volcánica. Reduce la exudación y mejora tanto las propiedades reológicas como la estabilidad de las lechadas.

El HS es un polvo fino que se consigue como subproducto de la fabricación de metales o aleaciones de silicio. Su gran finura y alto contenido de silicio hacen que el HS sea una excelente puzolana. Disminuye la porosidad y la permeabilidad y aumenta la resistencia mecánica. Tan y Zaimoglu han investigado la influencia en los tiempos de fraguado de las lechadas de cemento con la incorporación de las CV, el HS y la B.

De acuerdo con muchos de los resultados experimentales, el contenido tanto de cenizas volantes como de humo de sílice, desempeña un papel significativo en la resistencia a compresión. Estos elementos son los principales aditivos que se le hacen a las mezclas de cemento, por ser las más conocidas y utilizadas, e influyen en mayor proporción en las propiedades mecánicas

El aumento del contenido de las CV (cenizas volantes) va acompañado de una disminución notable de la resistencia a compresión. Este aditivo puede emplearse para mejorar las propiedades reológicas y la estabilidad de las lechadas; su incorporación en estas supone, además, una manera de valorizar este residuo. Al aumentar el contenido del HS (humo de sílice), crece la resistencia a compresión. El humo de sílice puede usarse para mejorar la resistencia a compresión de las lechadas de cemento y para asegurar la eficacia del cemento inyectado.

5.9. Predicción de las propiedades mecánicas del cemento en la micro-escala

Para poder predecir y entender el comportamiento del cemento como tal, al ser alterado con ciertas adiciones y aditivos, frente a diferentes circunstancias, es necesario saber lo que ocurre con la estructura molecular de este, desde el momento de entrar en contacto con el nuevo elemento o compuesto, así como conocer las propiedades mecánicas de este.

Entre algunos ejemplos de materiales con base en el cemento, están la pasta de cemento, los morteros y el hormigón.

Las propiedades mecánicas pueden predecirse si se conoce la micro-estructura y las propiedades mecánicas locales. En total se pueden identificar cinco fases diferentes, incluyendo una vacía y cuatro sólidas: cemento sin hidratar, producto interno, producto externo, y una fase mixta.

La fase mixta es una combinación de cemento sin hidratar, producto interno y producto externo. De hecho, el procedimiento debería funcionar para escalas mayores, es decir para morteros y hormigones.

Con este tipo de sistemas, la resistencia local a compresión es infinita, lo que significa que un elemento de red nunca puede fallar bajo compresión. Durante el análisis de fractura se monitorizan las fuerzas, el número de elementos rotos y el factor de escala.

Los resultados pueden dividirse en dos grupos, uno para la simulación de las propiedades mecánicas y otro para la predicción de la propagación de microrroturas.

Las propiedades mecánicas vienen dadas en términos de la curva de carga-desplazamiento y a partir de este se puede obtener la resistencia a fractura y el módulo de elasticidad del material; mientras que la propagación de microrroturas se describe mediante un método basado en elementos.

5.10. Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento portland: caracterización activación alcalina

Siempre con el mismo objetivo de la búsqueda de elementos que puedan sustituir total o parcialmente los combustibles y las materias primas en la fabricación del cemento, para disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera y la explotación de las canteras, se ha percibido la utilización de materiales como los cerámicos, que tienen características adecuadas para una utilización en dicha fabricación. Estos materiales pueden ser obtenidos de los residuos provenientes de la construcción, teniendo doble finalidad, ya que se podrían reciclar y reutilizar, actividades amigables para el ambiente.

Todos los residuos cocidos como tejas, ladrillos, azulejos, etc. tienen una composición química y mineralógica adecuada para su posible empleo como materia prima alternativa de un crudo preparado, para la fabricación de clínker de cemento portland. Estas investigaciones aún no tienen una base sólida en la experiencia, pero se ha demostrado en muchos estudios que los residuos cocidos estudiados no son tóxicos ni radioactivos.

Como se podía esperar, estos residuos tienen capacidad puzolánica, algunos de ellos desde los primeros 8 días de reacción. El contenido en fase amorfa y la naturaleza del activador no parecen ser factores que influyan en dicho proceso de activación. El estudio de caracterización realizado sobre las pastas activadas, ha demostrado que las fases feldespáticas son las más susceptibles de disolución y reacción con las disoluciones alcalinas.

En un futuro no muy lejano, se podrían usar dichos materiales en la fabricación del cemento, sustituyendo parcialmente las puzolanas de origen natural, para obtener un material menos colaborador al calentamiento global.

5.11. Uso de la escoria de cobre en el proceso de fabricación de clínker para cemento portland

Ya se habló anteriormente de la escoria de alto horno, proveniente de la quema de combustibles fósiles y sus contribuciones al cemento elaborado con ellas. Ahora se abordará el tema de la escoria de cobre. En la actualidad se utilizan diversos procesos metalúrgicos para la obtención y recuperación de metales y en cada uno de ellos se producen residuos inevitables como la formación de escorias, tratándose de que tengan el menor contenido de metal posible y que sus residuos finales tengan un valor posterior para otros procesos industriales.

Escoria es una fase que contiene sustancias inútiles de un mineral, que se encuentran presentes en proceso metalúrgico que involucre fundiciones. Por lo general, las escorias de cobre son óxidos de hierro silicatos SiO_2 , aunque existen otros elementos que no superan el 20%, por lo que no se toman en cuenta.

Respecto de las impurezas, estas ejercen un papel negativo en sus propiedades como su conductividad eléctrica y térmica, su color, dureza y demás; se pueden clasificar en tres grupos de fácil eliminación (Zn, Fe, O y S), de impurezas que se eliminan parcialmente (As, Sb, Bi y Ni), e impurezas que no se eliminan (Au, Ag).

En acuerdo con las características químicas y mineralógicas de la escoria de cobre, este residuo sólido industrial puede ser utilizado en el proceso de fabricación de clínker portland como sustituto parcial de los minerales de sílice y hematita, en la formación de mezclas crudas cuyos beneficios serían: disminución de los costos de producción de mezclas crudas y del consumo calorífico.

Estudios sobre reactividad y cinética de formación de clínker partiendo de mezclas crudas típicas para producir clínker portland, han demostrado que es posible utilizar de manera efectiva óxidos de zinc y de cobre como fundentes y/o mineralizantes, en donde las ventajas que se obtienen son: se reduce de la temperatura de formación de la fase líquida, se mejora la reactividad del clínker y se incrementa la resistencia a la compresión del cemento, sustitución parcial de los minerales de sílice y de hierro, disminución de la temperatura de clinkerización (ahorro de energía) y una alternativa ambientalmente segura para la disposición final de este residuo.

Para entender más claramente la importancia de las adiciones minerales es necesaria la explicación de las reacciones y los productos de la hidratación del cemento. La cinética de formación de clínker es una función del número de interacciones químicas que ocurran entre los componentes de la mezcla cruda y depende de la naturaleza de los mismos, preparación de la mezcla cruda y del tratamiento térmico.

El clinker portland está formado básicamente por cuatro fases principales: la alita (C_3S) es la fase más importante, belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferrita (C_4AF).

La formación de la alita (silicato tricálcico) a partir de la reacción entre la belita (silicato dicálcico) y el óxido de calcio (CaO) ocurre principalmente en presencia de la fase líquida, por lo que el proceso cinético está bajo la influencia de los fundentes y/o mineralizantes. Los óxidos de hierro (Fe_2O_3) y de aluminio (Al_2O_3) son los mineralizantes más efectivos.

Actualmente, es común utilizar minerales y compuestos químicos que contengan flúor y fósforo como fundentes y/o mineralizantes en los procesos de producción de clinker tipo portland. El hecho de que se encuentren presentes metales como zinc, cobre, titanio, molibdeno y plomo pueden hacer que mejore la reactividad de las mezclas crudas, debido a que estos metales pesados pueden actuar como mineralizantes y/o fundentes.

La utilización de residuos sólidos como sustitutos de materias primas convencionales en el proceso de fabricación de clinker para cemento portland puede estar limitado por: el contenido y composición química de los cuatro óxidos principales; contenido de elementos minoritarios tales como zinc, cobre, plomo, molibdeno, sodio, potasio, azufre, cloro, fluoruros y otros; composición mineralógica del residuo sólido industrial.

Entonces, al momento de la utilización de este tipo de escorias se debe tomar en cuenta la información anterior y su incorporación adecuada al proceso de fabricación de cemento, sin que esto afecte negativamente al medio ambiente, a la ignición de la mezcla cruda, a la calidad del clinker y del cemento.

6. IMPACTO AMBIENTAL A CAUSA DEL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

La industria del cemento ha venido combatiendo a través de su historia con el intento por reducir su huella ambiental. Inevitablemente esta industria depende del uso intensivo en energía, por lo que ha introducido las técnicas de procesamiento de cooperación para reemplazar la quema de combustibles fósiles tradicionales. Estas técnicas hacen uso de los elementos combustibles de los residuos producidos en otros sectores, incorporándolos en porcentajes adecuados para no dañar la localidad del producto y ayudar al impacto ambiental.

La industria del cemento produce 5% de las emisiones de dióxido de carbono (gas de efecto invernadero) generadas por el ser humano en todo el mundo. Por lo que sus objetivos a mediano y largo plazo son la reducción del dióxido de carbono. Además, emite contaminantes atmosféricos de criterio como óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono y material particulado, además de contaminantes tóxicos como ácido clorhídrico, tolueno, benceno y mercurio.

La fabricación de cemento portland requiere un importante consumo de energía térmica y eléctrica, ya que se precisan muy altas temperaturas para completar las reacciones químicas que conducen a la formación del clínker del mismo.

La fuente de energía predominante en este coprocesamiento es el petróleo coque (un subproducto del proceso de refinación de petróleo) y la industria de cemento del mundo utiliza hasta ahora el 70% del coque (producido principalmente en América del Norte y del Sur). Con el enfoque del uso de combustibles alternativos en un 17% del requerido y adicionando elementos diferentes a los de la fabricación convencional, se logró un ahorro de 4 millones de toneladas de carbón y la prevención de 9,7 millones de toneladas de las emisiones de CO₂ en Europa.

Debido al avance de la tecnología en maquinaria y elementos usados como materia prima en las fábricas, la energía específica requerida se ha visto sensiblemente reducida en los últimos años. Entre 1973 y 1988 la energía específica necesaria para producir clínker disminuyó desde 4.750 MJ/t de clínker a 3.750 MJ/t. Desde entonces, la energía específica no ha sufrido cambios, es decir que se ha mantenido más o menos constante.

Adicionalmente, la industria cementera es también una industria contaminante, ya que explota recursos naturales (canteras) y emite a la atmósfera una gran cantidad de gases contaminantes (CO₂, SO₂, NO_x). Las emisiones de CO₂ están asociadas a la descarbonatación de las calizas, ya que el carbono es el constituyente mayoritario del crudo de cemento (superando el 60% de la emisión total). Los restantes gases contaminantes son emitidos durante la combustión de los combustibles fósiles utilizados en las plantas cementeras.

Existe una gran problemática en el manejo de residuos industriales, ya que requiere una atención especial por las consecuencias ecológicas que trae consigo.

En la actualidad la variedad de residuos industriales existentes pueden ser incorporados como aditivos o sustitutos al cemento portland ordinario (CPO) en los materiales de construcción, dando lugar a los llamados cementos compuestos. El empleo de materiales de reemplazo de CPO permite una reducción en el costo energético y en la generación de CO₂ asociados a su uso y fabricación.

Un gran número de investigaciones relacionadas con el uso de varios materiales de reemplazo del CPO han demostrado que tal práctica mejora las propiedades de morteros y hormigones base CPO; el incremento en la durabilidad de estos últimos está relacionado con propiedades macroscópicas como resistencia a la compresión, y al ataque químico y estabilidad dimensional, las cuales dependen de la microestructura del cemento hidratado.

Actualmente, la industria del cemento emite entre 0,7 a 1,2 toneladas de CO₂ por tonelada de clínker de cemento, dependiendo del tipo de combustible empleado. En general, el uso de una tonelada de ceniza volante en los cementos de adiciones evita la emisión de una tonelada de CO₂. Quizá éste valor se escuche casi despreciable, pero en la cantidad de cemento producido anualmente, el ahorro en energía y disminución de emisiones por la utilización de cenizas volantes de cualquier tipo es muy representativo.

En el año 2003, el empleo de aproximadamente 13,8 millones de toneladas de cenizas en cementos de adición, como materia prima y adición al hormigón, ha supuesto la reducción de alrededor de 11 millones de toneladas de CO₂.

Además, cerca de 12 millones de toneladas de materias primas naturales se han salvado, ya que para la producción de 1 tonelada de cemento se emplean 1,6 toneladas de materias primas naturales.

Uno de estos materiales con potencial es el residuo de la producción de energía eléctrica mediante la extracción de calor del subsuelo, en las plantas geotérmicas a base de salmuera. Cuya investigación se explicó en el capítulo cinco con el uso de la sílice ultrafina.

La práctica de esta tecnología ha ido en incremento en los últimos años, debido a que es una fuente de energía limpia, generalmente renovable, y de menor costo, en comparación con otras formas de generación de energía. Además de que se le encuentra un uso adecuado a los residuos geotérmicos, evitando se queden depositados en los suelos y cuerpos de agua.

Sin embargo, una de las mayores desventajas de dicha tecnología es la generación y disposición de grandes cantidades de desechos, que ambientalmente son dañinos, ya que este desecho, denominado desecho geotérmico (DG), es obtenido de la mezcla de salmuera y vapor (presurizados, naturalmente), que pasa a través de diferentes etapas de extracción de calor. Conforme la temperatura se reduce de la mezcla se precipita sílice amorfa de tamaño nanométrico, junto con cloruros de sodio y potasio.

El precipitado causa problema en las tuberías, donde se deposita como una cascarilla que crece varias pulgadas por mes y debe ser removida periódicamente. Además de estas incrustaciones, un porcentaje de salmuera remanente se reinyecta al subsuelo y el resto se deposita en lagunas de evaporación que contienen miles de toneladas de este desecho geotérmico.

La planta geotérmica de Cerro Prieto en Baja California, México, genera aproximadamente 50.000 toneladas anuales de este desecho geotérmico, el cual no tiene hoy una aplicación. La explotación de tal cantidad de desecho geotérmico podría beneficiar alrededor de 0,5 millones de toneladas de CPO con un nivel de reemplazo del 10%, puede traducirse en una mejora potencial en la calidad de alrededor de 2 millones m³ de hormigón.

En Latinoamérica, el único sector del cemento certificado como “industria limpia” es en México, por la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) y se estima que desde su inicio, la Industria ha invertido más de \$1,500 millones en equipo ambiental.

Asimismo, desde algunos años se han estado aplicando tecnologías para la reducción de emisiones acorde al protocolo de Kioto, y se han suscrito convenios con la SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) para la disminución de residuos contaminantes y tiraderos de llantas (las cuales se corcusan y se utilizan como combustible para los hornos).

La manera más eficiente de controlar la contaminación emitida por la producción de cemento, es el monitoreo de los gases que se emanan durante un período de tiempo, vigilando así, cambios en las concentraciones de los contaminantes y conociendo de esta forma, cuáles son más o menos perjudiciales, en este caso para el ambiente. Especialmente los óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, material particular y el tan mencionado dióxido de carbono, los cuales son los principales compuestos que intervienen en el efecto invernadero que propicia el calentamiento global, así como la lluvia ácida que trae consecuencias en siembras, bosques, edificios, entre otros.

La Iniciativa para la Sustentabilidad del Cemento (CSI, siglas en inglés), es un programa en el que han estado trabajando Holcim y varias otras cementeras multinacionales, como Cemex Corp., de Houston Heidelberg Cement, de Heidelberg (Alemania), y Lafarge SA, de París (Francia), en donde la primera prioridad fue crear una herramienta uniforme para medir las emisiones del más común de los gases de efecto invernadero.

Holcim y otras empresas participantes han comenzado a avanzar en la segunda fase de la CSI, la cual consiste en establecer un proceso para obtener y comparar información sobre las emisiones de metales tóxicos de las plantas, incluidos el plomo y el mercurio que se liberan como subproductos del proceso de fabricación del cemento, cuyos efectos crónicos en la salud pueden causar muerte y daños irreversibles.

Se ha logrado establecer que las emisiones de los gases contaminantes en los países como México, Estados Unidos y Canadá, que han implementado el plan CSI, han disminuido en comparación con años anteriores. Estos controles se llevan por medio del RETC (Registro de emisiones y transferencia de contaminantes), que cada empresa controla.

Sin embargo no todas las emisiones son iguales, a pesar del ser el mismo proceso, esto se debe a la materia prima utilizada en cada región. Este monitoreo continuo, va a permitir adoptar o desechar nuevas tecnologías de acuerdo con la comparación de las concentraciones de contaminantes, pudiendo determinar nuevos compuestos y saber si son más o menos perjudiciales para el ambiente y la bienestar de las personas.

7. LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN EL FUTURO

Debido al cambio climático y todos los problemas ambientales que se han venido dando a través del tiempo a causa de la industrialización masiva en todos los procesos de producción y no solo en la cementera, la evolución de la industria del cemento se está encaminando, no solo a la búsqueda de perfeccionamiento de las características del producto, sino que también a la disminución de los gases emitidos, en especial el CO₂, que en cantidades abundantes y junto con la tala de árboles, ha logrado alterar el ciclo natural del carbono, perjudicando la capa de ozono y trayendo consecuencias graves para el clima y la humanidad en el futuro.

La búsqueda de nuevos productos, adiciones y aditivos para la elaboración del cementos más “saludables” para el ambiente, ha sido la prioridad de los fabricantes y ambientalistas desde el inicio del siglo XXI, pues a sabiendas de las consecuencias devastadoras que el efecto invernadero ha traído consigo y que seguirá trayendo al clima y a la humanidad, es primordial que la evolución del cemento se encamine a la disminución de la emisión del CO₂ más que a la evolución de las mismísimas propiedades del cemento, aunque sin dejarlas a un lado, es peor dar prioridad a lo primero.

El control de las emisiones de los gases al ambiente, será intervenido más rigurosamente en cualquier país productor de cemento, y habrá que crear legislaciones que estipulen e inspeccionen las emisiones, pues en la actualidad no existen más que guías, como las de la OMS y la EPA.

Esta será la única manera de concientizar y obligar de cierta forma a las grandes y pequeñas fábricas a reducir la contaminación, mejorando o evitando que empeore la calidad del aire y la situación de la atmósfera. Y esto tendrá que ser generalizado en cualquier tipo de industria: que su proceso de producción no genere gases contaminantes.

Una gestión adecuada de producción de cemento, no solo se basa en el mejoramiento de las condiciones ambientales y mecánicas, sino también influye en gran medida la parte económica. Pues una disminución en el consumo de combustibles fósiles genera una disminución en la energía necesaria y esta a su vez da paso a una disminución en los costos de producción.

Sin embargo, el costo del cemento en sí, está compuesto también por precios de transporte, almacenamiento y distribución del producto a diferentes localidades. Por lo que se buscarán nuevos medios para hacer que estos costos disminuyan, abriendo más fábricas en más lugares estratégicos para suplir la demanda, dependiendo siempre de la relación coste/beneficio.

Por otra parte, el ciclo de vida de cualquier producto siempre es el mismo: introducción, crecimiento, madurez, declinación y retiro. Por la situación en la actualidad del cemento, se atreve a decir que está viviendo la etapa de madurez, donde es el producto por excelencia; pero empiezan a ver indicios del inicio de la etapa de declinación del cemento como tal, es decir, como se conoce actualmente, ya que este evolucionará y se convertirá en nuevos subproductos con diferencias particulares al cemento puzolánico ordinario (CPO).

A pesar de que no se ha encontrado un material que supla y se asemeje a todas las características del cemento, hay varios materiales que cumplen con ciertas funciones, individualmente.

La búsqueda de ese material capaz de reemplazar lo que hasta ahora ha logrado el cemento, es un objetivo a largo plazo. Así como la industria fue cambiando de tecnologías y procesos de producción a lo largo de los años, desde su nacimiento hasta la actualidad, de la misma manera las materias primas serán cambiadas progresivamente hasta encontrar la composición adecuada, que quizá no tenga nada en común con la composición madre, pero que cumple con expectativas importantes como es disminución de consumo energético, máxima producción y mayor eficiencia al menor costo, colocando el sello verde al producto.

Latinoamérica es una región con inmenso potencial tanto productivo como de consumo, por ser un área en “vías de desarrollo”, lo cual hace que demande infraestructura en todo nivel. Además, la vulnerabilidad que los países latinoamericanos viven continuamente frente a desastres naturales los convierte en atractivos candidatos para que grandes industrias transnacionales como Cemex y Holcim, entre otras, apuesten por colocar sucursales, las cuales les traerán grandes beneficios.

La mayoría de los estudios realizados para mejorar las condiciones de la producción y materia prima del cemento, están siendo enfocadas y aplicadas en zonas con posibilidades económicas elevadas, como Japón y países Europeos. En Latinoamérica aún no se ha logrado implementar del todo estas ideas, a pesar de que ya es de conocimiento general los efectos negativos de esta industria.

Es un largo trecho por recorrer y los países de esta región aún no han alcanzado el avance de otros, al igual que en muchos aspectos. Se puede pensar que cuando Latinoamérica alcance la situación de países desarrollados, estos últimos ya habrán encontrado nuevas opciones de construcción, y de nuevo los países latinoamericanos tendrán nuevos objetivos que alcanzar y será como una historia que nunca termina.

CONCLUSIONES

1. El desarrollo de la industria del cemento alrededor del mundo, ha sido influenciada por acontecimientos ajenos, como las guerras, las crisis económicas y la crisis ambiental, los cuales han marcado significativamente los cambios, tanto en su demanda como en su producción.
2. Latinoamérica se ha convertido en una zona potencialmente atractiva para las grandes empresas fabricantes de cemento, debido a la demanda que los países de esta región han realizado en los últimos años. Esto es a causa del crecimiento acelerado en infraestructura, especialmente países como Brasil y México. Contrario a lo que ocurre en regiones como Norteamérica y Europa, en las cuales la demanda ha decaído desde la crisis económica mundial que inició en el 2008, afectando principalmente a estos países.
3. Debido a la situación ambiental que se ha venido dando en lo concerniente al efecto invernadero, la producción cementera, cuyo principal gas que emite es el dióxido de carbono, se proyecta en un futuro como una de las industrias que más investigaciones y avances tendrá en ese campo, situación que se observa en la actualidad con la implementación de nuevos materiales tanto en la producción del mismo como en su uso, obteniendo resultados positivos, pero sin encontrar aún el material ideal que emita la menor cantidad de contaminantes y que cumpla con todas las propiedades físicas, químicas y mecánicas del cemento actual.

4. El trabajo reúne los aspectos más importantes de la industria cementera logrando obtener una recopilación de información que permite al lector comprender cómo nació, se desarrolló y se mantiene este producto a través del tiempo; así como las mejoras y aspectos perjudiciales que lo han afectado.
5. Así como grandes civilizaciones como la maya, griega, romana, china, entre otras, aportaron conocimientos en construcción y uso de materiales cementantes los cuales fueron evolucionando hasta el concreto de hoy en día, de la misma manera el cemento de la actualidad irá cambiando hasta conseguir uno que cumpla con las necesidades, especialmente las económicas, sin obviar la posibilidad de ser reemplazado poco a poco por nuevos materiales.
6. Mientras los precios de producción, transporte y venta del cemento y sus derivados continúen aumentando y se siga invirtiendo en investigación de tecnologías alternativas, se atreve a predecir el descenso del cemento, obedeciendo el comportamiento del ciclo de vida de cualquier producto, el cual se empieza a notar en muchos países desarrollados.

RECOMENDACIONES

1. Si se desea aumentar el conocimiento acerca de la industria del cemento y de otros productos en Latinoamérica, se recomienda visitar la biblioteca virtual de la página oficial del Comisión Económica para América Latina (CEPAL).
2. La bibliografía reunida en este trabajo de graduación puede ser revisada y buscada para aumentar el conocimiento sobre otros aspectos de la industria cementera, ya que solo se tomaron los más relevantes de la misma, por lo extenso del tema.
3. Para poder entender las gráficas de la producción y demanda del cemento en los diferentes países sobresalientes, se recomienda una lectura previa al análisis hecho que corresponda a cada gráfica.
4. Si se quiere continuar conociendo en un futuro la situación de la producción de cemento, se recomienda leer los reportes anuales publicados en la página oficial de USGS.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABO-EL-ENEIN, Salah A.; ABBAS, Rafik; EZZAT, El-Sayed. *Propiedades y durabilidad de los cementos adicionados con metacaolín*. 299, Egipto: julio-septiembre 2010, *Materiales de Construcción*, Vol. 60. 35 p.
2. AGUILAR MORENO, Manuel. *Arquitectura Azteca*. [en línea]. FAMSI, 2008. México: [ref. noviembre de 2011]. Texto en pdf. Disponible en Web: <http://www.famsi.org/spanish/research/aguilard/index.html>.
3. BARBUDO, Miguel Ángel. *Determinación de los componentes del cemento*. Sanjuán, España: Cemento-Hormigón, abril de 2010. Vol. 937. 34 p.
4. BARLUENGA BADIOLA, Gonzalo. *"Materiales I". Tema 3: Cementos*. Jalisco, Guadalajara, México: Universidad de Alcalá, 2010. 17 p.
5. BONAVENTTI, V. L. G., et al. *Cementos compuestos elaborados con puzolana natural y escoria granulada de alto horno*. 2ª ed. Argentina: *Materiales de Construcción*, 2006. 36 p.
6. CEMBUREAU. 2007. *Producción sostenible del cemento. La recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera*. España: Oficemen, 2007. 16 p.

7. Cementos Lamona. Cementos. [en línea] 2007. [ref. 9 de agosto de 2010.]
Disponible en Web: <http://www.lemona.biz/EL%20CEMENTO-1/historia%20del%20CEMENTO.pdf>.
8. CEPAL. *La industria del cemento en la Región Latinoamericana y del Caribe: evolución, situación actual y perspectiva del ahorro tecnológico*. Naciones Unidas: CEPAL, 1985. 56 p.
9. GANESH BABU, Kumaran; MARTÍNEZ GONZÁLEZ, Saúl. *Estudio reciente de la industria del cemento: un estudio comparativo entre México e India*. Colima, México: PORTES, 2008. Vol. 2. 202 p.
10. GARCÍA MEDINA, L. E.; ORRANTIA BORUNDA, E.; AGUILAR ELGUÉZABAL, A. *Uso de la escoria de cobre en el proceso de fabricación de clínker para cemento Portland*. Chihuahua, México: 2006, Materiales de Construcción Vol. 56. 40 p.
11. GÓMEZ-ZAMORANO, L. Y. J. I. *Hidratación y microestructura de cemento Portland sustituido parcialmente con sílice ultrafina Escalante*. Saltillo y Monterrey. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2009. 16 p.
12. GOÑI, S.; GUERRERO, A.; MACÍAS, A. *Fases cementantes obtenidas a partir de residuos sólidos urbanos*. Madrid, España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), 2007. Materiales de Construcción. Vol. 57. 51 p.

13. GOÑI, S.; GUERRERO, A.; *Actividad hidráulica de un cemento belítico obtenido a partir de cenizas volantes tipo C: influencia del aditivo y tipo de curado*. España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), julio-septiembre 2006, *Materiales de Construcción*, Vol. 56. 77 p.
14. HUGHES, H. H.; BAGLEY, B. W. *Cement USGS. 1932-1939 Estados Unidos: Minerals Yearbook, 1939*. 575 p.
15. JACOTT, Marisa, et al. *El uso de la energía en la industria cementera de América del Norte: emisiones, generación de residuos y control de la contaminación*. México D.F: *Materiales de Construcción*, 2001. 30 p.
16. LASSERRE, Philippe. *The Global Cement Industry*. Estados Unidos de América: *Global Strategic Management Mini Cases Series*, 2007. 6 p.
17. LATORRE CAÑÓN, Andrés; DELRIEU ALCARAZ, Juan Carlos; RODRIGUEZ SANMIGUEL, Narciso. *Industria del Cemento en Colombia, determinantes y comportamiento de la demanda*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias Económicas, 2005. 53 p.
18. LOVERA DÁVILA, Daniel F.; ARIAS, Vladimir; CORONADO FALCÓN, Rosa. *La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales*. Lima, Perú: Universidad Mayor de San Marcos, 2004, *FIGMMG*, Vol. 7. 30 p.

19. MARTÍN, J. J., et al. *Durabilidad de pastas de cemento API clase B expuestas a disoluciones acuosas de iones cloruro, sulfato y magnesio*. octubre-diciembre 2008. Huelva, España; Sevilla, España; Caracas, Venezuela: Universidad de Sevilla, octubre-diciembre 2008, *Materiales de Construcción* Vol. 58. 26 p.
20. MASSANA GUITART, D. Jordi. *Durabilidad de morteros de cemento en contacto con Purines de Cerdo*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, 2010. 273 p.
21. MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. *Propiedades y comportamiento de cementos nacionales*. Cali, Colombia: Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. 2001. 9 p.
22. OCHOA, María Teresa; TOIRAC CORRAL, José. *Materiales de bajo costo para la construcción de viviendas económicas*. Santo Domingo, República Dominicana: Instituto Tecnológico de Santo Domingo, 2005. 231 p.
23. PASTOR, C. A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, T; VÁZQUEZ; PALOMO, A. *Hidratación del cemento de aluminato de calcio en condiciones de muy elevada alcalinidad*. Madrid, España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), 2009, *Materiales de Construcción* Vol. 59. 34 p.

24. PUERTAS, F. A. et al. *Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento Portland: Caracterización y Activación Alcalina*. Madrid, CSIC, 2006. 84 p.
25. RAMÍREZ, Horacio; PÉREZ, Ramiro; DÍAZ, Heriberto. *El cemento y el concreto de los Mayas*. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México, Ciencia Ergo Sum, 1999. Vol. 6. 11 p.
26. RESTREPO GUTIÉRREZ, Juan Camilo; RESTREPO BAENA, Oscar Jaime; TOBÓN, Jorge Iván. *Efectos de la adición de Metacaolín en el Cemento Portland*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2006. 11 p.
27. ROMERO, Antonio; GONZÁLEZ, Carlos E. *Condiciones generales de competencias en Guatemala*. México, D.F: CEPAL, 2006. 20 p.
28. RUNNER, D.G.; BALSER, Esther V. Período de 1940-1949. Cement. Estados Unidos: Bureau of Mines/Mineral Yearbook, 1940. 4 p.
29. TAFUNELL, Xavier. 2006. *En los orígenes de la ISI: la industria del cemento en Latinoamérica, 1900-1930*. Departamento de Economía y Empresa, Universidad Pompeu Fabra. España: 2006. 61 p.
30. TALERO, R. *Diferenciación cinética y morfológica de Ettringitas mediante Metacaolín, cementos Portland y el ensayo ASTM C 452-68*. Parte I. Octubre-noviembre 2008. *Materiales de Construcción*, Vol. 58. 56 p.
31. VAN OSS, Hendrik G. *Mineral Commodity Summaries*. 1995-2011. Estados Unidos: U.S. Geological Survey, 2 p.

32. _____. *Cement. Geological Survey Minerals Yearbook*. EE.UU: USGS, 2008, US 37 p.

33. ZAIMOGLU, Ö. Tan; SAHIN, A. *Optimización de la resistencia a compresión de lechadas de cemento reforzadas con aditivos*. octubre-diciembre 2007. 288, Konya y Erzurum, Turquía: Universidad de Selcuk, Konya;Universidad de Ataturk, Erzurum, 2007, *Materiales de Construcción*, Vol. 57. 98 p.