



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

Uso sustentable de las cenizas volantes para la fabricación de
hormigón y reducción de emisiones de CO₂

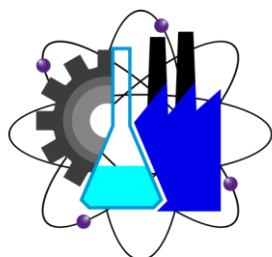
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA

JACQUELINE ALONDRA XICOTÉNCATL VALLE

DIRECTOR DE TESIS

DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ



Cuernavaca, Morelos, 2024

Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

Agradecimientos

A mis padres por impulsar mi carrera profesional, creer en mí, apoyarme y darme soporte en mis momentos difíciles, así como festejar y admirar mis logros.

A mi madre, especialmente por ver en mí más capacidad de lo que yo misma lograba reconocer.

A mi padre, por enfocar su esfuerzo y trabajo en mi superación personal y preparación profesional.

A mi hermana, por ser la persona más incondicional.

A mis amigos, que hicieron mi camino por la universidad más ameno y feliz.

A mi profesor, Roberto, que siempre vio en mí una oportunidad.

A Pedro, por llegar a mi vida y alentarme a apreciar mis logros.

Resumen Ejecutivo

La ceniza volante puede ser empleada en el concreto y otros sistemas basados en el cemento, principalmente debido a las propiedades puzolánicas y cementosas. Propiedades que contribuyen a una ganancia de resistencia mecánica con lo cual se mejora el performance del concreto fresco y seco. El uso de la ceniza volante conlleva a resultados más económicos en cuanto a la construcción con concreto.

Este trabajo muestra un panorama del origen y las propiedades de la ceniza volante, así como sus efectos en las propiedades del concreto de cemento hidráulico, y la selección adecuada y uso de las cenizas volantes en la producción del concreto de cemento hidráulico y otros productos de concreto. Información y recomendaciones concernientes a la selección y uso de cenizas volantes clase C y clase F que generalmente cumplen con los requerimientos que exigen las normas ASTM C 618.

Entre los tópicos abordados se incluye una descripción detallada de la composición de la ceniza volante, los efectos físicos y químicos de la ceniza volante sobre las propiedades del concreto, el impacto ambiental debido al uso de la ceniza volante y las consecuencias de no utilizarlas adecuadamente, así como un acercamiento al comportamiento petrológico, y recomendaciones en cuanto al proceder del control de calidad. También, se presentan documentos relevantes y estándares referidos al uso de la ceniza volante en productos de concreto.

Índice

	Página
1. Antecedentes.....	11
1.1 Contexto global.....	11
1.1.1 Los residuos del carbón.....	11
1.1.2 El uso de los PCCs.....	12
1.2 El contexto Mexicano.....	12
1.2.1 Generación eléctrica, el caso Mexicano.....	13
1.2.1.1 Centrales Termoeléctricas.....	14
1.2.2 Balances nacionales de energía.....	15
1.2.3 Perspectivas para el sector eléctrico nacional (generación).....	16
1.2.4 Consumo de combustibles del sector eléctrico nacional.....	16
1.2.5 Perspectivas para el sector eléctrico nacional (consumo).....	17
1.3 Principales yacimientos de carbón mineral en México.....	18
1.3.1 Región carbonífera de Coahuila.....	19
1.3.2 Región carbonífera de Colombia –San Ignacio, estados de Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León.....	20
1.3.3 Región carbonífera de San Marcial –Santa clara, Sonora.....	20
1.3.4 Cuenca de Cabullona, Sonora.....	21
1.3.5 Cuencas en Chihuahua.....	21
1.3.6 Otras posibles cuencas carboníferas.....	21
1.4 Principales usos de los PCCs.....	21
1.4.1 Clasificación de los PCCs.....	22
1.4.2 La utilización de las cenizas volantes y de fondo.....	23
2. Objetivos.....	26
3. Justificación.....	26
4. El carbón: Petrología y clasificación.....	25
4.1 Origen de los yacimientos de carbón.....	25

4.2 Tipos de carbón.....	26
4.2.1 Petrografía orgánica: Macerales.....	26
4.2.2 Petrografía inorgánica: Minerales en el carbón.....	27
4.3 Clasificación del carbón.....	28
4.3.1 Características del carbón para su utilización.....	29
4.3.2 Sistema de clasificación ASTM.....	30
4.4 Análisis básico del carbón.....	31
5. Combustión: Reacciones y productos.....	34
5.1 Sistema de combustión.....	34
5.2 Minerales en los PCCs.....	35
5.2.1 Transformación del material mineral de los PCCs.....	37
5.3 Reacciones asociadas a la combustión.....	39
5.3.1 Reacciones minerales asociadas a la combustión.....	40
5.3.2 Procesos de escorificación e incrustación.....	43
5.3.3 Tendencia de los elementos traza en la combustión y formación de cenizas.....	46
5.4 Generalidad.....	49
6. Impacto ambiental.....	50
6.1 Efectos ambientales de los PCCs.....	50
6.1.1 El suelo.....	50
6.1.1.1 Elementos potencialmente tóxicos (propiedades de los metales, metaloides y no metales).....	51
6.2 Efectos de los elementos potencialmente tóxicos sobre algunas funciones biológicas.....	52
6.3 Cuidados ambientales y a la salud asociados con los usos del concreto.....	54
6.4 Efectos en las propiedades microbiológicas del suelo.....	54
7. Fabricación de concreto a partir del empleo de las cenizas volantes.....	55
7.1 El cemento Portland.....	55
7.1.1 Cemento y contaminación.....	55

7.2 Materiales alternativos.....	55
7.2.1 Materiales Puzolánicos.....	55
7.2.2 Materiales hidráulicos.....	56
7.3 Contexto Mexicano.....	56
7.4 Aplicación de las cenizas volantes para la producción de hormigones.....	57
7.5 Cenizas volantes. Introducción.....	58
7.5.1 Composición química de las cenizas volantes.....	59
7.5.2 Constitución de las cenizas volantes.....	61
7.5.3 Propiedades físicas de las cenizas volantes.....	61
7.6 Las cenizas volantes y la hidratación del cemento.....	63
7.6.1 Propiedades del hormigón fresco.....	64
7.7 Fabricación de los hormigones con cenizas volantes.....	66
7.7.1 Dosificación de hormigones con cenizas.....	66
7.8 Propiedades del hormigón endurecido.....	68
7.8.1 Resistencias mecánicas.....	68
7.8.2 Permeabilidad.....	69
7.8.3 Resistencia al ataque por sulfatos.....	70
7.8.4 Protección de armaduras.....	70
7.8.5 Las cenizas volantes y la geología del hormigón.....	71
7.8.6 Las cenizas volantes y la retracción.....	71
7.8.7 Las cenizas y la durabilidad.....	71
7.9 Las cenizas volantes y los aditivos para el hormigón.....	72
7.10 Cenizas volantes y los hormigones con cenizas volantes en la normativa internacional.....	72
7.11 Puesta en obra y curado del hormigón.....	73
7.11.1 Construcción de presas.....	74
7. 12 Huella de carbono	95
7.13 Perspectivas.....	102
8. Conclusiones.....	103
9. Recomendaciones.....	104

10. Bibliografía.....	105
-----------------------	-----

LISTA DE TABLAS

	Página
1. Factores de emisión de las carboeléctricas mexicanas.....	14
2. Principales centrales termoeléctricas en México.....	14
3. Características de las carboeléctricas en México (2002).....	15
4. Consumo de combustibles en el sector eléctrico nacional y el índice de volatilidad para cada combustible.....	16
5. Ejemplos de re-usos de los PCCs de la combustión de lignito y carbón duro....	23
6. Proceso de carbonización.....	26
7. Distribución de elementos traza, corteza terrestre/carbón.....	28
8. Sistema de clasificación del carbón ASTM.....	31
9. Composición química típica de las cenizas volantes.....	36
10. Principales minerales asociados con la utilización del carbón a altas temperaturas.....	40
11. Principales características de los metales y no metales.....	52
12. Composición química de las cenizas volantes de 180 cenizas distintas, de 8 países distintos de los 3 principales continentes productores de carbón.....	59
13. Especificaciones de la ASTM para el empleo de las cenizas según su tipo o clase, la cual se basa en la suma de los componentes S+A+F, porcentaje mínimo que representan...	61
14. Límites establecidos en la normativa de hormigones sobre la relación agua/cemento y el contenido mínimo de cemento por m ³ de hormigón, según el tipo de ambiente de construcción.....	67
15. Energía y emisiones de CO ₂ para tabletas prefabricadas de mortero de cemento Portland.....	99
16. Energía y emisiones de CO ₂ para tabletas prefabricadas de mortero de ceniza volante activada alcalinamente.....	100

	Página
1. Combustibles para el crecimiento eléctrico 2000-2025.....	11
2. Top de los usos de los PCCs, 2003.....	12
3. Proyección del consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica 2006-2016.....	17
4. Carboeléctricas proyectadas para el 2016.....	18
5. Localización de los principales yacimientos de carbón en México.....	19
6. Producción y uso de los PCCs (1966-2005).....	22
7. Ciclo del carbón.....	25
8. Clasificación del carbón mineral.....	29
9. Bases de análisis para los componentes del carbón.....	32
10. Valores caloríficos por clase de carbón.....	32
11. Variación del valor calorífico y clase, dependiendo del carbón fijado.....	33
12. Proceso de combustión de una carboeléctrica.....	35
13. Transformación del material mineral en el carbón a ceniza.....	38
14. Posibles formaciones inorgánicas durante la combustión.....	39
15. Abundancia relativa de los minerales y materiales amorfos.....	42
16. Abundancia relativa de minerales y material amorfo.....	43
17. Procesos asociados a la reacción de material mineral en sistemas de combustión de carbón pulverizado.....	44
18. Sección transversal de una caldera de carbón pulverizado.....	45
19. Imágenes de escorias incrustadas en la caldera.....	46
20. Partición de los elementos traza basados en la volatilidad.....	49
21. Localización de los metales, no metales y metaloides en la Tabla periódica...	51
22. Metales clasificados como clase A (duros), clase B (suaves) y frontera (metales intermedios).....	53

23. Influencia del contenido de partículas gruesas de las cenizas volantes en la cantidad de agua necesaria para obtener la misma docilidad.....	65
24. Influencia de la relación agua/material cementicio y de la cantidad de cenizas en la resistencia del hormigón a compresión.....	69
25. Influencia del curado en la permeabilidad del hormigón.....	70

1. Antecedentes

1.1 Contexto Global

Las estimaciones para el panorama mundial indican que durante los próximos años los combustibles de mayor demanda para la generación eléctrica serán el Carbón y el Gas natural, mientras que el sistema actual basado en los combustibles derivados del petróleo está en un detrimento claramente observado en la economía mundial.

Por otro lado se espera que para el año 2025 la demanda mundial de energía eléctrica se duplique, sosteniendo así una tasa anual de crecimiento de un 2.3%. Y suponiendo que se conserve la tendencia actual de consumo de combustibles para generarla, se prevé que los combustibles fósiles proporcionarán el 69% de la energía eléctrica (Figura 1)

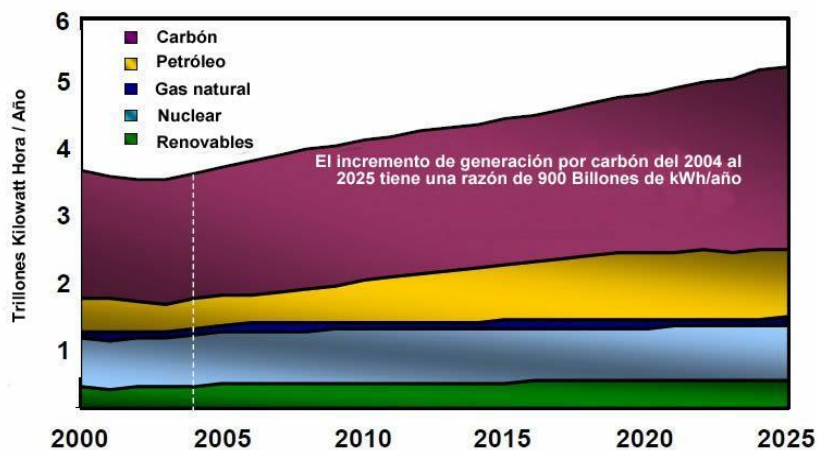


Figura 1. Combustibles para el crecimiento eléctrico 2000 - 2025

1.1.1 Los residuos del Carbón

De la combustión del carbón se obtienen distintos tipos de residuos, siendo los más importantes las cenizas volantes, las cuales están constituidas por partículas ligeras suspendidas en el aire que resultan de la quema del carbón pulverizado, estas cenizas constituyen de un 70 a 85% de las cenizas totales producidas, de ahí la importancia que se le dará en este trabajo.

Cada año se producen más de 49 millones de toneladas de Productos de la Combustión del Carbón (PCCs) en los Estados Unidos, de los cuales cerca del 59% son confinados en vertederos.

1.1.2 El uso de los PCCs

En la siguiente Figura (Figura 2) se muestra el Top de los usos de los PCCs en los Estados Unidos de América

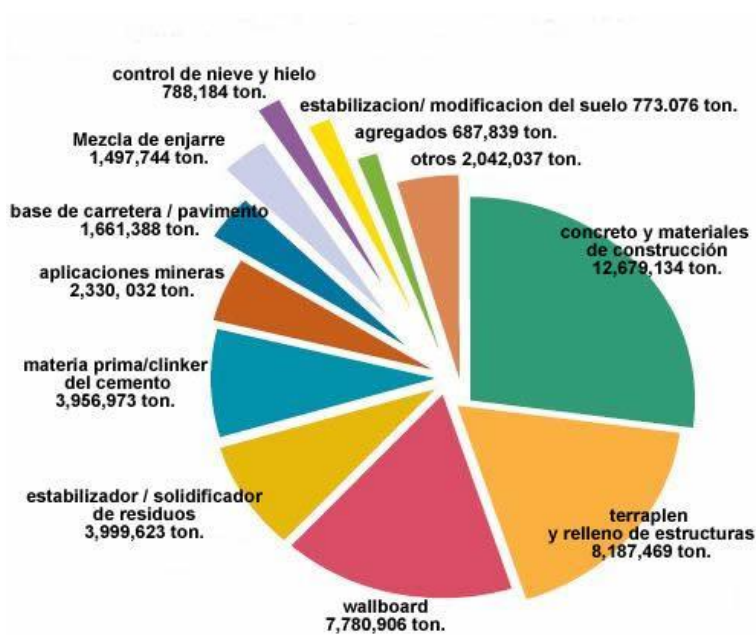


Figura 2. Top de los usos de los PCCs.

1.2 El Contexto Mexicano

México es considerado como uno de los líderes en cuanto a producción y exportación de energía (Secretaría de Energía – SENER 2023). Al igual que algunos países desarrollados y en desarrollo, la mayoría de la capacidad instalada en México está basada en el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, existe un perfil que diferencia a nuestro país de algunos países en desarrollo, por ejemplo la capacidad instalada en la India o China es dominada principalmente por carboeléctricas, mientras que en México del total de generación, gran parte es dominado por la quema de gas natural.

En el caso mexicano, la producción nacional de carbón, en 2019, fue de 6.1 millones de toneladas. El consumo del carbón resulta atractivo si se considera que las centrales carboeléctricas constituyen una tecnología madura, y que además existen grandes reservas de este energético a nivel mundial y se trata de un combustible estable en sus cotizaciones.

El aumento de 5.7% en la producción de carbón mineral a nivel mundial se presentó durante el 2021, superando así su nivel previo a la pandemia de 2019 en un 1%. En nuestro país, valió para que éste incrementara su participación a 2.2% del total de la producción de energía primaria.

Los tipos de carbón que atienden a dos tipos: Siderúrgico: carbón con bajo contenido de cenizas, característica que favorece que éste sea transformado en coque de carbón, y

Térmico: carbón con alto contenido de cenizas y finos, de flama larga y adecuado para su empleo en la generación eléctrica.

1.2.1 Generación eléctrica, el caso Mexicano.

De las tres termoeléctricas que queman carbón para la producción de energía, solo dos de ellas se abastecen de yacimientos nacionales. La planta J. López Portillo (Rio Escondido) la cual cuenta con una capacidad instalada de 1200 MWe, utiliza únicamente carbón nacional, con un contenido bajo a moderado de azufre y con un contenido alto de cenizas. Las composiciones tanto para el carbón nacional como para el importado fueron reportadas por Rangel (2002). Miller et al. (1996) encontró que el contenido de azufre en el carbón mexicano se encuentra en un rango que va de 1.3 a 2.5 porcentual. Por otro lado, los cálculos efectuados por la CFE señalan un contenido de azufre de 1% en peso, lo cual es muy bajo.

Otra de las carboeléctricas es Carbón II (Nava, Coahuila), la cual se encuentra en el norte del país y utiliza un 90% de carbón nacional e importa el restante 10%. La planta P. Elias Calles (Petacalco, Guerrero) opera tanto con carbón como con combustóleo. Todo el carbón que se quema en esta planta es importado, el cual tiene un 0.7% de azufre en peso, mientras que el combustóleo reporta un contenido de azufre de 3.6%.

La Tabla 1 muestra los factores de emisión de las Carboeléctricas Mexicanas, donde según vemos que las emisiones dependen tanto del tipo de carbón, y la configuración de

caldera. Puede verse como las emisiones de NOx se ven modificadas según la configuración de la caldera.

Tabla 1. Factores de emisión de las carboeléctricas Mexicanas.

Tipo de carbón	Tipo de combustión	Configuración de caldera	CO ₂ ¹ t t ⁻¹	Hg ² Kg t ⁻¹	NOx Kg t ⁻¹	SO ₂ ³ Kg t ⁻¹
Bituminoso	Externa	Wet Bottom, Wall	1.465402	8.30E-05	15.50	19*S%
Bituminoso pulverizado	Externa	Dry Bottom, Wall	1.465402	8.30E-05	11.00	19*S%
Bituminoso pulverizado	Externa	Wet Bottom, Tangential	1.465402	8.30E-05	7.00	19*S%
Bituminoso pulverizado	Externa	Dry Bottom Tangential	1.465402	8.30E-05	7.50	19*S%

1. SENER (2003) 2. Acosta (2001) 3. S% porcentaje en peso

1.2.1.1 Centrales termoeléctricas

Es importante hacer notar que en nuestro país las centrales carboeléctricas se ubican en el estado de Coahuila y Guerrero, ya que es donde se encuentran yacimientos de carbón, como se verá más adelante.

En la Tabla 2 se puede observar las principales centrales carboeléctricas en México, así como el combustible que las alimenta y la capacidad efectiva instalada. En la Tabla 3 se da más detalle sobre las características de las carboeléctricas del país.

Tabla 2. Principales centrales termoeléctricas en México

Nombre y ubicación	Combustible	Capacidad efectiva instalada MW
P. Elías Calles (Petacalco, Guerrero)	Carbón	2,100
Carbón II (Nava, Coahuila)	Carbón	1,400
J. López Portillo (Rio Escondido) (Nava, Coahuila)	Carbón	1,200

Tabla 3. Características de las Carboeléctricas en México.

Nombre de la planta	Capacidad instalada (MW)	Generación (GWh)	Combustible utilizado			
			Combustóleo (km ³)	Carbón (kt)	Diesel (km ³)	
Petalcalco	2100	13,879.47	957.53	3,631.24	6.65	
Rio escondido	1200	7,515.56	0	4,201.94	45.15	
Carbón II	1400	8,636.35	0	4,345.71	36.56	
Tipo de carbón y factores de emisión de CO ₂						
Nombre de la planta	Tipo de carbón	%C en peso (fixed)	VM(%)	C (%)	Factor de emisión (tt ⁻¹)	
					CFE	CEC
Petalcalco	Importado	51	31.5	66.75	1.465	2.448
Rio escondido	Nacional	30	30	42.6	1.465	1.562
Carbón II	Importado y nacional	31.2	31.2	44.1	1.465	1.617
Emisiones de CO ₂ totales y por unidades						
Nombre de la planta	Generación total (GWh)	Emisiones de CO ₂ (kt)		kg/MWh		
		CFE	CEC	CFE	CEC	
Petalcalco	13,879.47	8,245.7	11,813	594	851	
Rio escondido	7,515.56	6,276.1	6,684	835	889	
Carbón II	8,636.35	6,463.9	7,124	748	825	

1.2.2 Balance Nacional de Energía

Según el Balance de electricidad servicio público 2020 en México se utilizaron 192.29 Petajoules de carbón.

Por otro lado, en el Balance Nacional la energía producida por la quema de carbón presentó un incremento del 5.7% para abastecimiento industrial, sector que hasta hoy es el principal consumidor de este combustible.

Es importante observar que en la rama del cemento se consumieron en el 2016, 144.260 PJ, esto debido a que esta industria es la principal consumidora de carbón como fuente de energía en el país, y además que resulta de gran interés por las aplicaciones que pudieran tener las cenizas provenientes de sus procesos de generación.

El consumo de energía de la industria cementera totalizó en 144.3 PJ en 2016, monto superior al 0.6% respecto al 2015. La participación en el consumo total industrial se ubicó en 11.3%. en el que el carbón mineral presentó 4.1% de dicha producción.

1.2.3 Perspectivas para el sector eléctrico nacional (generación)

Los requerimientos de capacidad adicional para el país en base a proyectos con esquemas financieros por definirse en la tecnología de carboeléctricas serían Topolobampo I y II en el estado de Sinaloa, con 766 MW para el año 2020, y para ese mismo año se esperó que la Carboeléctrica del pacífico III tenga una capacidad adicional de suministro para 2.5 millones de mexicanos.

1.2.4 Consumo de combustibles del sector eléctrico nacional

Según la estructura de la producción de energía primaria del 2016, el 90% de la producción eléctrica era aportada por hidrocarburos, 4.6% por electricidad, 3.2% biomasa y solo un 2.2% por carbón. Sin embargo, esto ha ido cambiando por efectos del calentamiento global, el precio de los energéticos, su demanda y reservas disponibles económicamente viables. Para tener una idea de la “volatilidad” de cada energético, basta con mirar la Tabla 4.

Tabla 4. Consumo de combustibles en el sector eléctrico nacional y el índice de volatilidad para cada combustible.

Años	Combustóleo (miles de barriles)	Diesel (miles de barriles)	Carbón (miles de toneladas)	Gas natural (millones de pies ³)
1999	133,900	2,851	9,468	269,388
2000	144,017	4,087	9,630	322,058
2001	138,072	2,845	11,398	366,791
2002	118,818	2,262	12,179	350,657
2003	102,637	4,151	13,881	335,592
2004	95,919	2,362	11,489	310,857
2005	94,255	2,185	14,917	281,928
2006	75,668	2,354	14,697	307,520
2007	71,998	1,356	14,762	321,113
2008	54,897	1,391	7,399	264,660
Enero	5,580	70	1,090	29,901
Febrero	5,334	145	832	28,679
Marzo	5,651	130	691	30,266
Abril	6,072	99	733	29,338
Mayo	7,319	146	867	28,028
Junio	8,433	195	774	32,494
Julio	6,498	200	811	31,850
Agosto	5,703	229	803	28,390
septiembre	4,307	177	799	25,714

Como información pertinente a este trabajo, cabe señalar que en la industria del cemento el consumo de carbón se ha incrementado cuantiosamente en un periodo de nueve años, de pasar prácticamente de nada a finales del siglo pasado a 83.47 PJ en 2022 de acuerdo al Balance Nacional de Energía 2022.

1.2.5 Perspectivas para el sector eléctrico nacional (consumo)

La Figura 3 presenta las cantidades porcentuales del consumo durante el 2022 de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica.

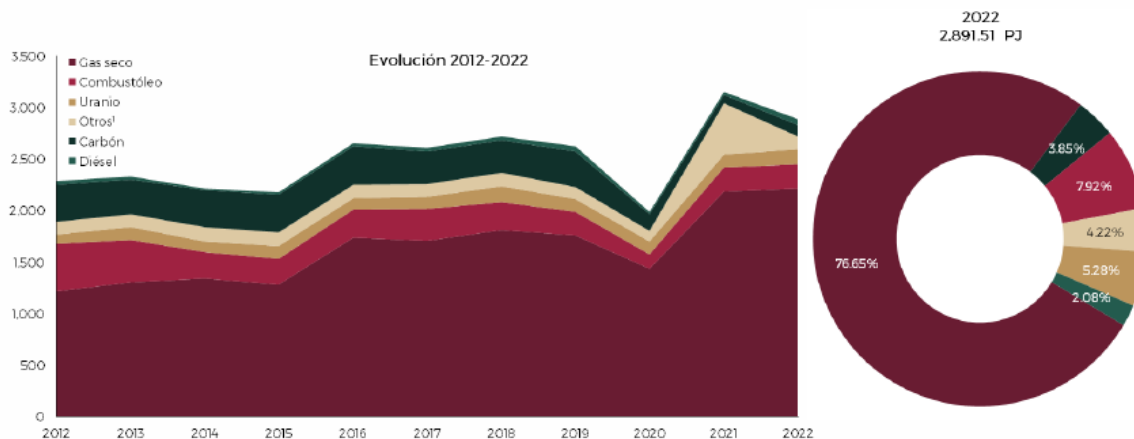


Figura 3. Proyección del consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, 2006 – 2016.

El escenario que plantea el sistema de generación eléctrico nacional, indica como tal, que la base energética dejará de depender de los derivados del petróleo, por lo que el Gas natural, de origen nacional e importación, el gas natural licuado y el carbón vendrán a ocupar este sitio.

Por lo que esto también repercute en las tecnologías de generación eléctrica, actualmente se cuentan con tres carboeléctricas en el país, las cuales consumen una cantidad de 16 millones de carbón. En la actualidad se proyecta transformar 6 centrales térmicas que operan con algún otro energético, para que empiecen a emplear carbón, lo que supondría un aumento de 8 millones de toneladas anuales adicionales para las centrales del norte-centro del país a partir del 2010 y de 3 millones de toneladas para la central térmica de puerto libertad.

1.3 Principales Yacimientos de Carbón Mineral en México

Los yacimientos más importantes en México se localizan principalmente en el estado de Coahuila, tal como se observa en la Figura 5.

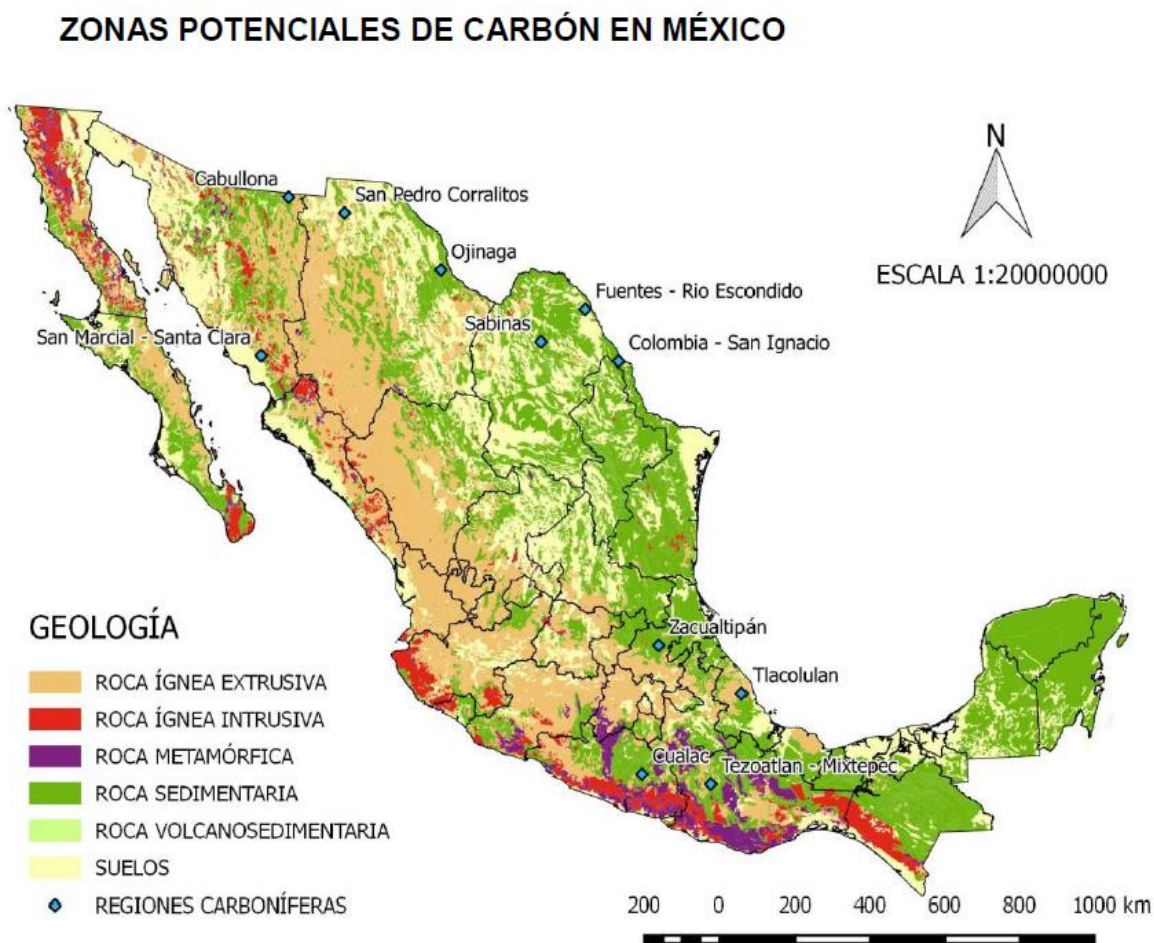


Figura 5. Localización de los principales yacimientos de carbón en México.

1.3.1 Región Carbonífera de Coahuila

La región carbonífera de Coahuila “Cuenca Sabinas” es la más importante del país, aportando más del 90% de la producción nacional de carbón, de acuerdo a las últimas cifras indicadas por el Servicio Geológico Mexicano (2023).

El carbón de las sub-cuencas de Coahuila son de tipo sub-bituminoso, apropiado para su transformación en coque: tiene volatilidad media a baja, presenta vitrinita preponderantemente como constituyente (Piedad-Sánchez et al., 2005). En cuanto a las reservas, al año de 1993 se estimó un potencial total de 1,387,622,586 ton. (Rivera-Martínez y Alcocer-Valdés, 2003).

El carbón en la cuenca de sabinas es del tipo Sub-bituminoso “C”, según los trabajos de exploración, realizados en forma coordinada por la CFE y por Minera Carbonífera Rio Escondido, S.A. permitieron comprobar reservas del orden de 600 millones de toneladas de carbón sub-bituminoso, de flama larga.

1.3.2 Región Carbonífera de Colombia – San Ignacio, Estados de Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León

El carbón localizado en esta región es del tipo lignítico. Los mantos de carbón lignítico, son los que representan el principal interés económico de esta cuenca. El carbón de esta

cuenca fue clasificado como lignito brillante sapropélico a lignito brillante vítrico (Rivera-Martínez y Alcocer-Valdés, 2003).

Las reservas de carbón han sido cuantificadas en el área de Villa Hidalgo en 5,914,169 toneladas medias, 5,152,249 indicadas y 2,232,800 inferidas y en la zona de Colombia-San Ignacio 51,052,449 toneladas probadas y susceptibles de exploración (Rivera-Martínez y Alcocer-Valdés, 2003).

1.3.3 Región Carbonífera de San Marcial-Santa clara, Sonora.

La geología y los depósitos de carbón han sido investigados por Dumble (1899), King (1939), Wilson y Rocha (1946), y Flores-Galicia (1988). Según el consejo de Recursos Minerales (1994), se han encontrado también evidencias carboníferas en las regiones de Santa Clara, San Enrique, Sierra Verde, Los Vasitos y El Cocinero, pero la de San Marcial, sigue siendo la más importante.

En el área de San Marcial, el carbón es negro, duro, compacto, brillante, con fractura sub-concoidal o cúbica y gravedad específica alrededor de 1.9 g/cm^3 . (Flores-Galicia, 1988). El carbón de esta región corresponde al tipo 2 de la “clase” antracítica, en el grupo que varía desde la meta-antracita hasta la semi-antracita, incluyendo a la antracita.

Las reservas de carbón reportadas por el Consejo de Recursos Minerales, considerando solo las áreas de Santa Clara, San Marcial y San Enrique, son de 4,755 millones de

toneladas probadas. Dada la gran extensión de la cuenca, es muy probable que mediante la exploración regional, dichas reservas se incrementen sustancialmente.

1.3.4 Cuenca de Cabullona, Sonora

El carbón de Cabullona corresponde al tipo bituminoso, subsecuentemente transformado por metamorfismo en antracita y aún en gráfico (Flores-Galicia, 1988).

Debido a la falta de prospección geológica de la formación es difícil presentar una evaluación de reservas, ya que se conoce la existencia de los mantos de carbón solo en afloramientos, desconociéndose su continuidad a profundidad. En base a los estudios efectuados, solo se puede estimar posibles recursos en 68 millones de toneladas de carbón en el área de San Marcos y 12 millones para el área El Encino (Flores-Galicia, 1988).

1.3.5 Cuencas en Chihuahua

Comprende dos unidades cartografiables, cuyo espesor es de aproximadamente 400 m. La primera es una unidad marina de 60 m de espesor. La otra unidad es una secuencia continental, la cual contiene en la base un manto de carbón sucio de 0.35 a 0.50 m de espesor. Las reservas de carbón estimadas en el área son de 23 millones de toneladas (Flores-Galicia, 1988), sin embargo, los trabajos geológicos efectuados, indican que actualmente, no son susceptibles de explotación económica.

1.3.6 Otras posibles cuencas carboníferas

Se han reportado ya algunas localidades de carbón, lignito o turba, pero solo en unas pocas se ha estudiado bien la geología y se han cuantificado y evaluado sus reservas, esto debido a que la base de la economía en el país, es el petróleo y sus derivados.

1.4 Principales usos de los PPCs

Es importante conocer la evolución que ha tenido el uso de los PPCs a lo largo de los años, ya que es sin duda un indicador del buen resultado de estas “buenas prácticas” por parte de la industria. Lamentablemente esto no ocurre en México en donde a lo mucho y en el mejor de los casos, se venden estos productos a otros países, en lugar de emplearlos a nuestro beneficio. La Figura 6 muestra las estadísticas de utilización de los PPCs.

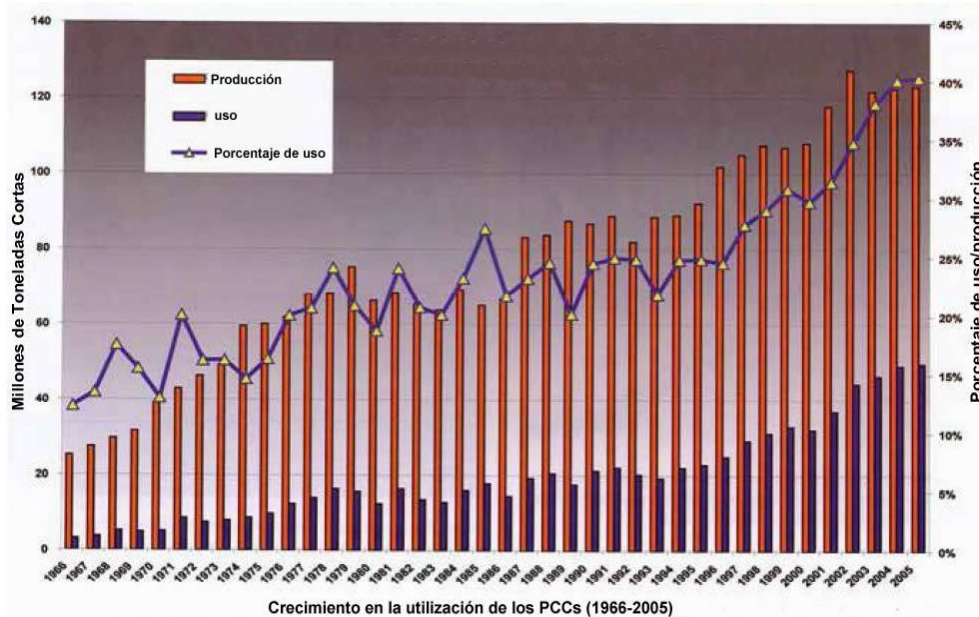


Figura 6. Producción y uso de los PCCs (1966 – 2005).

1.4.1 Clasificación de los PCCs

La clasificación de los PCCs es algo fundamental al momento de proponer la utilización de los mismos, ya que por medio de esta clasificación se facilita enormemente conocer las características de las cenizas y por tanto saber en que pudieran ser empleadas. Además que la clasificación nos indica parámetros que intervienen en el proceso de formación del tipo de ceniza.

Los PCCs se pueden clasificar en:

- Cenizas de fondo: Son las cenizas que por el tamaño y peso de su particulado no es capturado por los filtros-electrostáticos o algún otro medio de purificación del flujo de aire que se emite al ambiente.

- Cenizas volantes: Son las cenizas que por su tamaño y peso de particulado es arrastrado por el flujo de aire que atraviesa por los mecanismos de purificación del aire, donde es capturado generalmente en filtros-electrostáticos o filtros manga.

1.4.2 La utilización de las cenizas volantes y de fondo.

Las cenizas volantes han sido utilizadas por muchos años en un amplio rango de aplicaciones debido a que proveen muchas ventajas técnicas al ser incorporadas a los sistemas aportando mayor durabilidad y performance. Por ejemplo, en los materiales de construcción mejora la resistencia a ataques de los sulfatos, reduce la conducción del calor, etc.

En la actualidad la aceptación por estas prácticas ha sido reconocida además por los beneficios ambientales y sustentables, como lo es el sustituir los agregados vírgenes por las cenizas, con lo cual también se reducen las emisiones de gases de invernadero.

Aproximadamente el 50% de las cenizas volantes producidas es utilizada en los productos de construcción (UKQAAa 2006). Y la segunda mayor aplicación es utilizar las cenizas como relleno y para remediación de suelos. Suelos que tras un proceso pueden ser reutilizadas con fines industriales, de vivienda o incluso agricultura. En la Tabla 5 se ilustran algunas aplicaciones para los PCCs.

Tabla 5. Ejemplos de re-usos de los PCCs de la combustión de lignito y carbón duro

Tipo de re-uso de los PCCs	Cenizas volantes		Cenizas de fondo		Gypsum
	Lignito	Carbón duro	Lignito	Carbón duro	
Industria de construcción	x	x	x	x	x
Aditivo para concretos	x	x			
Agregados para aligerar el concreto	x	x	x	x	
Mortero	x	x			
Concreto de alto rendimiento	x	x			
Blender en la industria del cemento	x	x			
Materia prima en la industria del cemento	x	x			
Aditivo retardante para la fijación del cemento					x
Pared de aislamiento	x	x			
Construcción Gypsum					x
Industria cerámica	x	x	x	x	
Construcción de carreteras y paisaje	x	x	x	x	
Construcción de embalses con la técnica RCC	x	x	x	x	
Estabilización de suelos para construcción y carreteras	x	x	x	x	
Aislante acústico		x		x	
Para tratamiento de residuos y relleno sanitario	x	x	x	x	
Separador de capas en los vertederos	x	x			
Inmovilizador de sustancias peligrosas	x	x			
Filtro superficial para sellar vertederos			x	x	
Base para tratamiento biológico en aguas residuales			x	x	
Relleno para zanjas de tuberías	x	x	x	x	x
Mezcla cemento-ceniza estabilizada	x	x			
Relleno de zanjas	x	x			
Recuperación de material en minería	x	x	x		
Producción de zeolitas	x	x			
Material de relleno en la industria del papel					x
Proceso Müller-Kühne	x	x	x	x	x
Recuperación térmica			x	x	

2. Objetivo

El objetivo general es evaluar el uso de la ceniza volante generada por las centrales carboeléctricas de la Comisión Federal de la Electricidad (CFE), en obras civiles de gran volumen, a partir de su caracterización fisicoquímica, con la finalidad de orientar a

estudios posteriores y revisar la viabilidad técnica/económica, de la incorporación de este material a las actividades de construcción.

3. Justificación

Las cenizas volantes de las centrales carboeléctricas mexicanas pueden emplearse de forma sustentable en materiales de construcción, incrementando las propiedades deseables por los diseñadores, tanto en las propiedades mecánicas, cantidad de agua empleada, impacto ambiental favorable, entre otros efectos más. Cumpliendo además con los estándares internacionales y nacionales para estos propósitos. Con lo que se plantea una de las bases del Desarrollo Sustentable, “el hacer más con menos”.

4. EL CARBÓN: PETROLOGÍA Y CLASIFICACIÓN

4.1 Origen de los yacimientos de Carbón

Generalmente, se define al carbón como una roca de origen orgánico que se genera por la diagénesis, a cierta presión y temperatura de materia vegetal procedente de Pteridofitas, Gimnospermas y Angiospermas, y ocasionalmente de Briofitas. La composición del carbón incluye carbono, hidrógeno, oxígeno, así como pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno; contiene además, dióxido de carbono y metano; compuestos aceitosos, como alquitrán y brea, que a su vez contienen amoníaco, tolueno, naftas y creosotas (Clayton, 1998). La mayoría de los yacimientos de carbón mineral se generan en paleoambientes pantanosos asociados a lagunas, deltas, estuarios y zonas de rift continental.

En la Figura 7 se muestra como se generan los combustibles fósiles por medio de la migración del carbono contenido en la biósfera y su transporte hacia la litósfera, lo que comúnmente conocemos como ciclo del carbón.

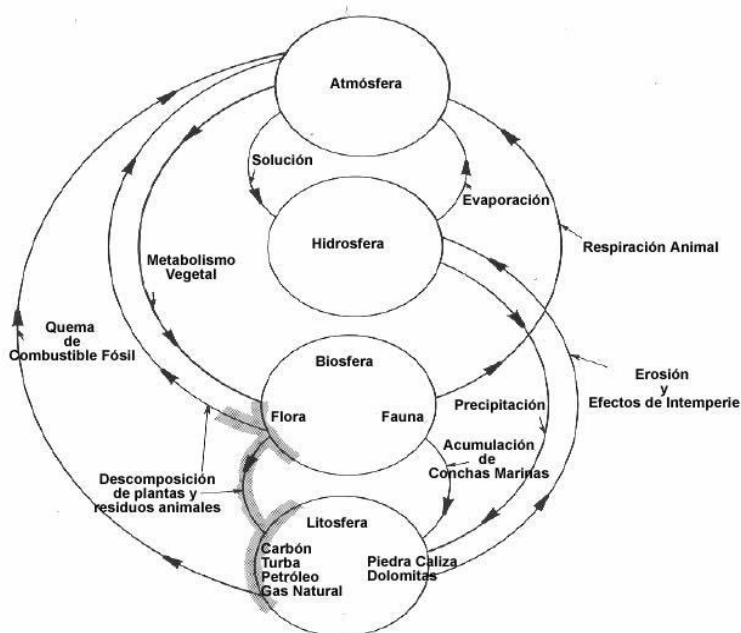


Figura 7. Ciclo del carbón.

En la Tabla 6 se ilustra cómo se lleva a cabo el proceso de carbonización.

Tabla 6. Proceso de Carbonización

Materiales	Procesos Parciales	Reacción Química Principal
Descomposición Vegetación	Putrefacción y carbonización	Ciclo de Vida Bacterial y de Hongos
↓		
Turba	Lignitificación	Oxidación en aire, seguido por la decarboxilación y deshidratación
↓		
Lignito	Bituminización	Decarboxilación y desproporción de Hidrogeno.
↓		
Carbón Bituminoso	Pre-antracitación	Condensación de pequeños sistemas de anillos aromáticos.
↓		
Semi-Antracita	Antracitación	Condensación de sistemas de anillos aromáticos; deshidrogenación.
↓		
Antracita	Grafitización	Proceso de Carbonización completo

4.2 Tipos de carbón.

Aunque a veces el carbón a simple vista pareciera no ser diferente de otros con el mismo color o incluso de la misma región o yacimiento, éste puede cambiar significativamente en su composición (porcentajes), sin embargo para usos prácticos se manejan clasificaciones bajo ciertos límites, como se verá más adelante.

4.2.1 Petrografía orgánica: Macerales

Microscópicamente el carbón está compuesto por varios constituyentes, los cuales se encuentran en distintas asociaciones, mientras que los minerales o materiales minerales están también presentes pero en distintas proporciones. Los macerales son restos

carbonificados de varias plantas o derivados de las mismas que se encontraban justo en el tiempo de la carbonización (Diagénesis). Es decir la razón por la que el carbón puede ser distinto es debido a los materiales minerales, ya que éstos crean variables en los procesos de carbonificación y carbonización.

Cuando el proceso bioquímico de la degradación termina y la materia orgánica es sepultada a profundidades considerables en un ambiente sedimentario, se dice que toma parte un proceso geoquímico de carbonificación el cual requiere un periodo largo de tiempo, así como de condiciones de alta temperatura y presión. Sin embargo, la influencia del material mineral arrastrado por la materia orgánica, modifica las propiedades fisicoquímicas del producto entre las fases de evolución de la formación del carbón que van desde lignito, sub-bituminoso, bituminoso, antracita y meta-antracita, por lo que las propiedades finales de tecnología son modificadas (Stach et al., 1982, and Taylor et al., 1998).

Los macerales son identificados en base a sus propiedades ópticas. Existe una aceptación universal para esta clasificación y redefinición de los grupos macerales en solo tres, los cuales son liptinita, intertinita y huminita o vitrinita. Los grupos macerales están subdivididos en submacerales, los cuales indican las variaciones en la reflectancia, grado de destrucción o preservación, presencia de estructura celular, gelificación, y rasgos morfológicos. Y a su vez los grupos Macerales difieren en sus composiciones químicas y propiedades ópticas.

Dependiendo del tipo de maceral o grupos macerales, así como de su sub-tipo (sub-maceral), podemos conocer cualitativa y cuantitativamente la composición de las rocas de carbón, así como las características físico-químicas que describen la composición de la roca, tales como valor calorífico, sensibilidad a la oxidación, capacidad de hidrogenación, es decir todas aquellas propiedades ligadas intrínsecamente con la calidad del carbón. (ICCP, 1971, 1998, and Sy'korova'et al., 2005).

4.2.2 Petrografía Inorgánica: Minerales en el Carbón

Una gran variedad de minerales pueden llegar a ser identificados en las muestras de carbón. Muchos de estos materiales inorgánicos que se puede encontrar, han sido depositados durante (syngenético) o después (epigenético) de la carbonificación. Los minerales syngenéticos son formados debido a la precipitación en medios acuosos durante el proceso de carbonificación o por el arrastre de sólidos transportados por el viento o agua hacia los fangos y la turba. Los minerales epigenéticos son depositados en la veta del carbón, ya sea en grietas, fracturas e incrustaciones, debido a soluciones.

La materia inorgánica en el Carbón incluye además una variedad minoritaria de elementos traza. La concentración de estos elementos puede ser mayor que las normalmente encontradas en la corteza terrestre (ver Tabla 7).

Tabla 7. Distribución de elementos traza, Corteza Terrestre/Carbón

Elemento	Corteza	Ceniza Carbón min	Ceniza Carbón max
Ag	0.7	1	10
As	1.8	100	900
B	10	86	5,800
Ba	425	300	3,500
Be	2.8	1	30
Co	25	30	300
Cr	100	50	400
Cu	55	20	500
Mn	950	200	1,000
Mo	1.5	10	200
Ni	75	50	800
Pb	12.5	5	700
Sr	375	80	3,500
V	135	100	1,000
Zn	70	100	1,000

Las concentraciones están dadas en ppm.

Las características de las trazas contenidas en el Carbón dependen del área de la cual es extraído el material, e incluso en el mismo yacimiento la distribución de elementos pueden no ser consistente y variar respecto a la profundidad de extracción.

Los minerales son caracterizados como mayor (> 1% en peso), menor (.1%<1% en peso), y traza (<0.1% en peso). En base semi-cuantitativa, los grupos minerales ordenados por importancia serían: silicatos, carbonatos, oxyhidróxidos, sulfitos, sulfatos, fosfatos, etc.

4.3 Clasificación del Carbón

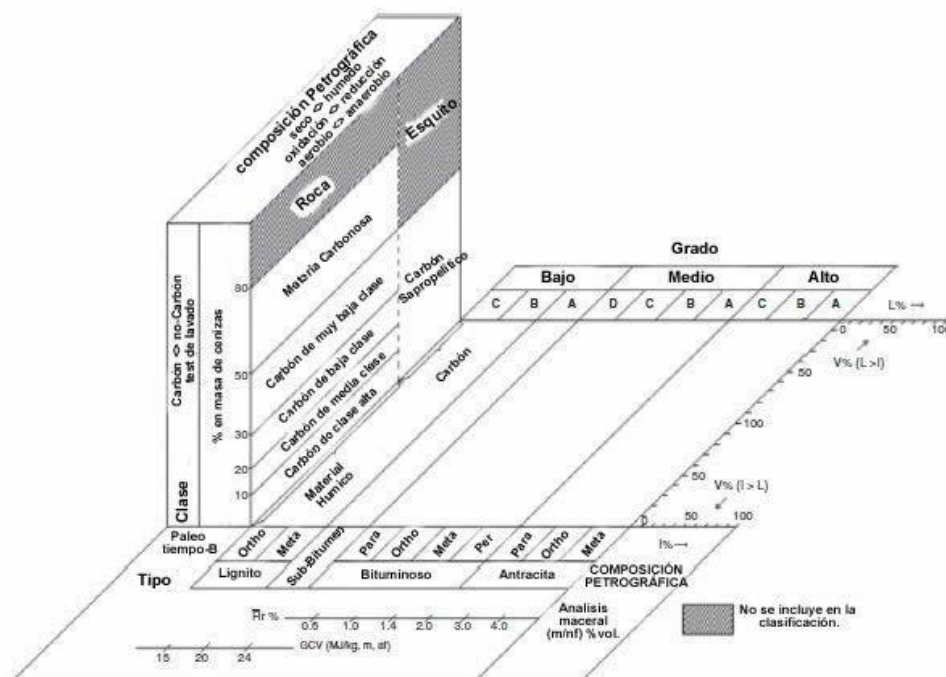
En 1998 la Comisión de Economía de las Naciones Unidas de Europa propuso un sistema internacional para clasificar los tipos de carbón. El sistema fue hecho para clasificar los tipos de carbón así como los yacimientos de origen del mismo. Aunque anteriormente existían otros sistemas de clasificación, este sistema, de 1998 era distinto,

ya que no tenía propósitos económicos únicamente, el cuál se basaba en tres características fundamentales y además incorporaba: la categoría de carbón (grado de carbonificación), composición petrográfica, y el grado de impureza (cenizas). Dando como resultado el sistema de clasificación que se ilustra en la Figura 8.

4.3.1 Características del carbón para su utilización

Los parámetros químicos básicos del carbón pueden ser determinados por análisis inmediatos (humedad, cenizas, materia volátil, % de carbono) y análisis elementales (contenido de C, H, O, N, P, S). Otros análisis que comúnmente se llevan a cabo es la determinación de las formas del Azufre en el carbón (sulfatos, orgánico, pirítico) y el carbón (CO₂) contenido, mismo que se deriva de las fracciones minerales del yacimiento. El contenido de Cloro, es el principal asociado con las sales orgánicas por lo que concentraciones altas de Cloro en el Carbón, pueden acarrear problemas serios de corrosión. El fósforo es un elemento que no se desea en el Carbón, pero que de igual forma puede ser determinado.

Las Cenizas de la combustión deben de analizarse para determinar las distintas clases de óxidos metálicos contenidos en el Carbón, ya que éstos influyen en el comportamiento del Carbón y de la misma Ceniza durante su combustión o uso, de ahí la importancia de este estudio. Además es de igual trascendencia conocer las porciones y número de elementos traza que constituyen el material, ya que algunos de ellos pueden ser potencialmente dañinos y por tanto deben ser evaluados.



Parámetro	Descripción de los parámetros de la Figura 2.4
Rr%	Porcentaje de Vitrinita o reflectancia (ISO 7404-5 standard)
GCV (MJ/kg, m, af)	Valor calorífico en bruto, corregido por humedad, y libre de cenizas (ISO 1928 y 1170 standards).
% en masa de cenizas	Contenido de cenizas a alta temperatura, calculada en base seca (ISO 1171, 331 y 1170 standards).
V%. L%. I%.	Contenidos de Vitrinita, Liptinita y Intertinita respectivamente, en % en volumen, calculado en base libre de mineral y base libre de materia orgánica (ISO 7404-3 standard).

Figura 8. Clasificación del carbón mineral.

También es importante considerar las diferencias en la composición del maceral, ya que sus diferencias indican las distintas composiciones químicas del carbón y por tanto las condiciones tecnológicas en las que ha de realizarse su combustión. El análisis del maceral está estandarizado por la ISO 7404/3 (1994a) y la ASTM D2799-05 (2005a) con lo cual se determina en base volumétrica las proporciones relativas de los componentes

del carbón de la muestra representativa. Los Pellets para el análisis petrográfico deben ser preparados según la ISO 7404/02 (1985), ASTM D7297-04 (2004).

4.3.2 Sistema de clasificación ASTM

Este sistema de clasificación (ASTM D388) agrupa el carbón en cuatro clases, las cuales se subdividen en varios grupos (ver Tabla 8). Como se ha mencionado, los carbones de clase alta (ver Figura 8) son clasificados en base al sus contenidos de Carbón y material volátil, mientras que los carbones de clase baja están clasificados en términos de su valor calorífico. Cabe señalar que este sistema fue desarrollado solo para aplicaciones comerciales, sin embargo a sido probado en ciertas áreas científicas con buenos resultado.

El carbón es descrito por el sistema como parte de un rango o clase, por medio de la cual se estiman sus propiedades (es decir por lo que está compuesto); por ejemplo: si el carbón es clasificado como sub-bituminoso/lignito o antártico, entonces será o no será considerado para ciertas aplicaciones.

Tabla 8. Sistema de clasificación del carbón ASTM

Clase/ Grupo	% de Carbón ^a	% Material Volátil ^b	Valor Calorífico ^b (Btu/lb)
Antracítico			
Meta-Antracita	>98	<2	----
Antracita	92-98	2-8	----
Semi-Antracita	86-92	8-14	----
Bituminoso			
Bajo-Volátil	78-86	12-22	----
Medio-Volátil	69-78	22-31	----
Alto-Volátil A	<69	>31	>14,000
Alto-Volátil B	----	----	13,000-14,000
Alto-Volátil C	----	----	10,500-13,000 ^c
Sub-Bituminoso			
Tipo A	----	----	10,500-11,500 ^c
Tipo B	----	----	9,500-10,500
Tipo C	----	----	8,300-9,500
Lignítico			
Tipo A	----	----	6,300-8,300
Tipo B	----	----	<6,300

^aCalculado en seco, sin material mineral. La corrección para la ceniza y el material mineral es realizado por la formula Parr: Material mineral = 1.08[%ceniza+0.55(%Azufre)]. Tanto el Azufre como la ceniza tienen base seca.

^bCalculado sin material mineral

^cCarbones con un valor calorífico entre 10,500 y 11,500 Btu/lb son clasificados como Bituminosos de alta volatibilidad tipo C si presentan un aglomerado o como sub-bituminoso tipo A si no lo presentan.

4.4 Análisis Básico del Carbón

Los análisis inmediatos proporcionan información acerca de los contenidos relativos de humedad, materia volátil, ceniza e indirectamente arrojan el contenido de carbono fijado en el carbón. Mientras que el análisis elemental da información acerca de las cantidades de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, y oxígeno contenido en el material.

Un tercer análisis, evalúa el valor calorífico como se mencionó anteriormente, el cual es una medida de la cantidad de energía producida con la quema del carbón. Debido a que la humedad y el material mineral (o ceniza) son “parásitos” en el carbón, los datos

analíticos deben ser expresados en distintas bases con la finalidad de reflejar así la composición ya sea como es recibida, secada, saturada de agua o como una composición seca, libre de cenizas, o libre de material mineral. Sin embargo las bases más comunes para presentar los resultados del análisis son las que se presentan en la Figura 9.

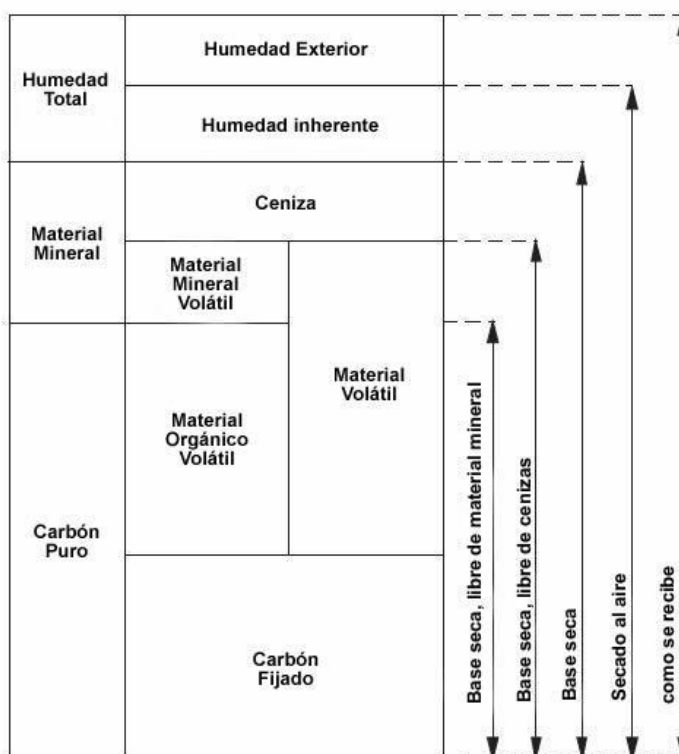


Figura 9. Bases de análisis para los componentes del carbón.

La siguiente Figura (Figura 10) lleva a cabo una comparación de los valores caloríficos (base húmeda, libre de material mineral) del carbón según su clase.

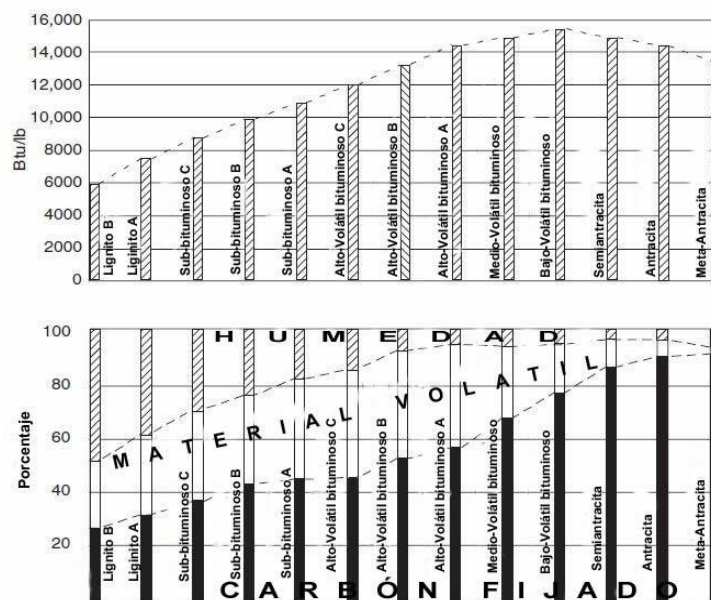


Figura 10. Valores caloríficos por clase de carbón.

Anteriormente se ha hablado sobre la composición del Carbón, sin embargo es importante conocer que la determinación del material mineral se efectúa por medio de una disolución en HF. El carbón fijado es el combustible sólido así como los orgánicos no volátiles en el mismo. Combustible que se estima por la substracción porcentual de humedad, ceniza, etc. Por lo que el valor calorífico y la clase de carbón mejora con el aumento del carbón fijado en la muestra, tal como se muestra en la Figura 11.

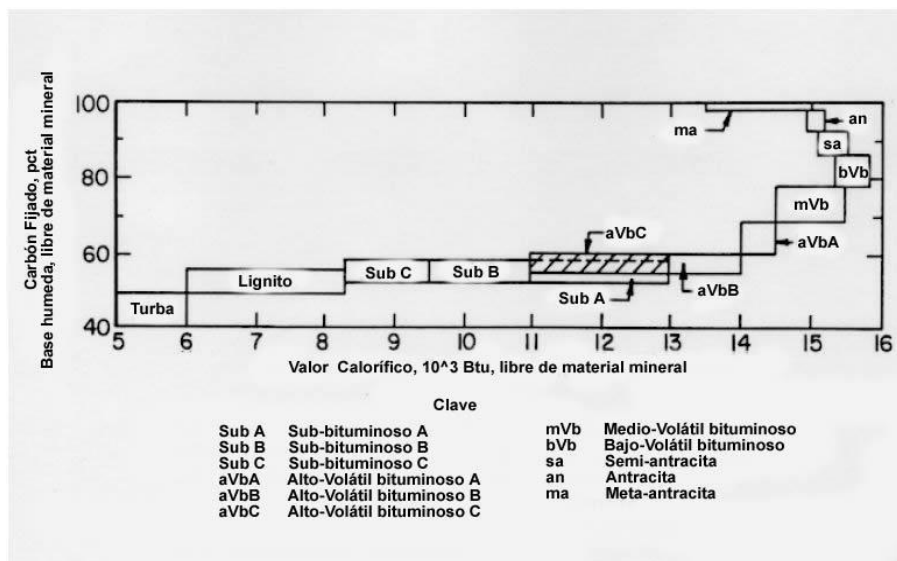


Figura 11. Variación del valor calorífico y clase dependiendo del carbón fijado.

5. COMBUSTIÓN: REACCIONES Y PRODUCTOS

5.1 Sistema de Combustión

La producción y tipo del producto de la combustión del carbón depende tanto del tipo de Carbón y procedencia, como del sistema de combustión. Es decir la configuración de las condiciones operativas que existen tanto en la caldera, como en los parámetros post-combustión

La metodología que se emplea para seguir la energía en el sistema está basada en el total de la energía reportada (contenida en varios materiales) que fluye por los subsistemas. Lo cual debe ser tomada en cuenta para ser relacionado con el grupo Maceral, la clase de carbón y el contenido mineral del mismo, ya que por medio de estos estudios podemos conocer el total de la energía liberada por bloque (el valor calorífico es dependiente del tipo de Maceral y de la composición mineral del carbón). Otro punto que refuerza la importancia de este tipo de estudios está relacionado con la temperatura de

fusión de las cenizas, lo cual nos indica el comportamiento de las cenizas a altas temperaturas lo cual está íntimamente ligado con la composición química y la naturaleza mineral del carbón. Con lo que podemos conocer si la ceniza permanecerá como un polvo fino a través del sistema de combustión o si se fusionará.

- Ceniza volante: Los gases de escape dejan la cámara de combustión arrastrando cenizas volantes de combustión las mismas que se originan durante el proceso de combustión. Para prevenir que las cenizas volantes escapen a la atmósfera, las plantas termoeléctricas utilizan varios dispositivos de recolección con la finalidad de remover las cenizas de los gases de emisión. Las cenizas volantes son las partículas más finas de la combustión del carbón. La American Society for Testing and Material (ASTM) define dos clases de cenizas volantes según su composición química, para fines benéficos. La ceniza volante tipo F son el resultado de la combustión de la antracita o el carbón bituminoso, mientras que las cenizas volantes del tipo C son resultado de la quema del lignito o carbón sub-bituminoso.

Para tener una visión más clara sobre lo que se ha hablado con anterioridad, se invita a observar la Figura 12. Para conocer las partes que integran el sistema de una carboeléctrica.

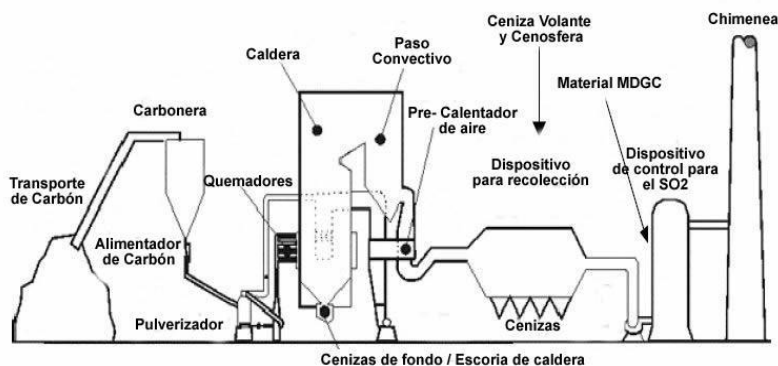


Figura 12. Proceso de combustión de una carboeléctrica

5.2 Minerales en los PCCS

Estos componentes inorgánicos son agregados durante la deposición y el metamorfismo -aunque estas etapas no son necesariamente una parte integral de la estructura-. Tanto la combustión como el enfriamiento post-combustión poseen un efecto significativo en las fases minerales de los PCCs.

El estado físico de los metales traza, ya sea sólido o fase gaseosa ocurre acorde con la temperatura de combustión y la atmósfera química en la que se presenta en la cámara de combustión (Binner et al. 1997). Sin embargo la cantidad y distribución de los metales contenidos en las cenizas dependen principalmente del tipo de carbón y de cómo se configure el proceso de quemado.

Los óxidos inorgánicos en la ceniza volante pueden ser por tanto una fase cristalina o una fase vítrea. Las cantidades relativas de estas fases materiales en las cenizas dependen en gran manera de la combustión y del proceso de vitrificación que se usa en la planta de combustión.

Cuando las temperaturas máximas de combustión oscilan entre los 1 200°C y el tiempo de enfriado es corto, las cenizas presentan más cantidades en fase material vítrea (McCarthy et al 1987). Y si se presenta un enfriamiento más gradual, la fase material predominante es la cristalina formada por compuestos de calcio. Los minerales presentes en el carbón solo nos indican la composición elemental de las cenizas, pero la mineralogía y cristalinidad de la ceniza es determinada por el diseño de operación y la configuración de la caldera. Por tanto los factores que presentan una influencia en la mineralogía en los PCCs son la composición química del carbón, el proceso de combustión incluyendo la pulverización del material, la combustión –reacción química-, el flujo de gas de escape, las operaciones de recolección de las cenizas volantes, y cualquier aditamento que pudiera usarse durante la combustión, incluyendo otros combustibles, estabilizadores de flama o aditivos para tratar el control de corrosión (Baker 1987).

La hidratación y las propiedades de lixiviado de las cenizas volantes se ven influenciadas por la mineralogía de la ceniza, la cual incluye las porciones relativas de la fase esférica vítrea y los materiales cristalinos, la distribución de medida de partícula de la ceniza, la naturaleza química de la fase vítrea, y el tipo de material cristalino (Roy et al 1985). Por tanto, las propiedades de hidratación y lixiviado pueden variar significativamente según las características de generación de cenizas (Torrey 1978). Las composiciones químicas típicas de las cenizas clase F y clase C, se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Composición Química típica de las Cenizas Volantes

Especies químicas	% Composición		
	Típica clase C	Típica clase F	Cemento Portland
CaO (cal)	24	9	64
SiO ₂	40	55	23
Al ₂ O ₃	17	26	4
Fe ₂ O ₃	6	7	2
MgO	5	2	2
SO ₃	3	1	2

Los principales constituyentes químicos inorgánicos de las cenizas volantes son los óxidos de Si, Al, Fe y Ca. Sin embargo las cenizas volantes contienen en menor medida cantidades de Mg, S, Na, K, como también cantidades traza (mg/kg) (Torrey 1978). Los componentes orgánicos en las cenizas volantes incluyen carbón sin quemar y cantidades muy pequeñas (mg/kg) de contaminantes orgánicos.

El grado de evaporación depende de los factores interrelacionados como la temperatura de operación, condiciones de oxidación o reducción, y la presencia de impurezas como lo pueden ser los halógenos (Evans et al 2000).

Los metales Lithofílicos, como el Co, Cr, Mn y V, están usualmente muy fijados en el carbón por lo que su evaporación se traduce en altísimas temperaturas. Como resultado de esto, estos metales tienden a encontrarse distribuidos equitativamente entre las cenizas volantes y de fondo. Los metales pesados se relacionan más con la fase gaseosa durante la combustión, por lo que se les nombran metales volátiles. Los elementos con alta volatilidad, como puede serlo el Hg y Tl, son emitidos en su mayoría en la fase vapor, de ahí que no se encuentren cantidades significantes en las cenizas. Los elementos como el As, Cd Cu, Pb y Zn son vaporizados a temperaturas intermedias, y también se pueden encontrar principalmente en las cenizas volantes (Yan et al. 2001).

5.2.1 Transformación del material mineral de los PCCs

Basados en los puntos de ebullición y en las temperaturas de cambio de fase de los óxidos, varios autores han descrito el particionamiento de los elementos traza en los PCCs (Germani and Zoller, 1988; Meij, 1989; Yokoyama et al., 1991). El primer grupo de elementos, que se concentran en las cenizas de fondo o que se encuentran igualmente distribuidos entre las cenizas volantes y las de fondo, incluyen a los elementos lithofilicos (Ba, Mg, y Mn. En un segundo grupo, los elementos traza que enriquecen una fina fracción de particulado se conocen como elementos chalcophilicos, formado por elementos como el As, Cd, Pb, Se y Zn. Y un tercer grupo que incluye elementos volátiles que permanecen en estado de vapor (Hg y Br). Existen además otros varios elementos divididos entre estos grupos.

La vaporización y la condensación forman un aerosol ultra fino durante la combustión del carbón pulverizado (Senior et al., 2000a). Factores como el tiempo de residencia, historial de temperatura, y el nivel de disturbios de control en la medida y morfología de las partículas en el aerosol, son los que determinan como se ha de llevar a cabo dicha vaporización o condensación en el particulado. Las partículas de las cenizas volantes poseen diámetros aerodinámicos menores de 0.4 Fm. Mientras que los elementos no volátiles, como el Fe, se encuentran en grandes concentraciones y como partículas grandes. Entre 10 y 30 por ciento de elementos volátiles como el As, Sb, Se, y Zn se encuentran en las partículas condensables de las cenizas volantes. El arsénico y Sb son solubles en el silicato vítreo y pueden ser retenidos por partículas vítreas de igual forma debido a la fusión de minerales.

La materia volátil y las matrices orgánicas reaccionan con el aire produciendo con ello calor, CO₂, H₂O, SO₂ y NO_x. Temperaturas a las cuales los minerales se oxidan, descomponen, funden, desintegran o aglomeran (Clarke and Sloss, 1992).

Por lo que dependiendo de las condiciones de temperatura en la zona de post-combustión, las partículas pueden enfriarse lentamente y crear una estructura de características cristalinas (Figura 13). Pero si el enfriamiento es rápido, los minerales

condensarán como partículas esféricas y cristalinas. Si los granos minerales se originaron con la matriz del carbón, estos pueden convertirse en líquidos durante la combustión mientras que los elementos volátiles pasan a fase vapor. Al irse enfriando, los componentes gaseosos pueden condensar en partículas muy pequeñas (aerosoles) o a fusionarse en partículas esféricas ligeramente más largas. Estas pueden condensar en la superficie de otras partículas, y con ello enriquecer la superficie de especies volátiles. Los componentes no volátiles se aglomerarían para formar las partículas de las cenizas volantes. La expansión de la acumulación de material volátil es la causa de la expansión de las partículas, con lo que se forman esferas huecas de baja densidad que se denominan Cenósferas.

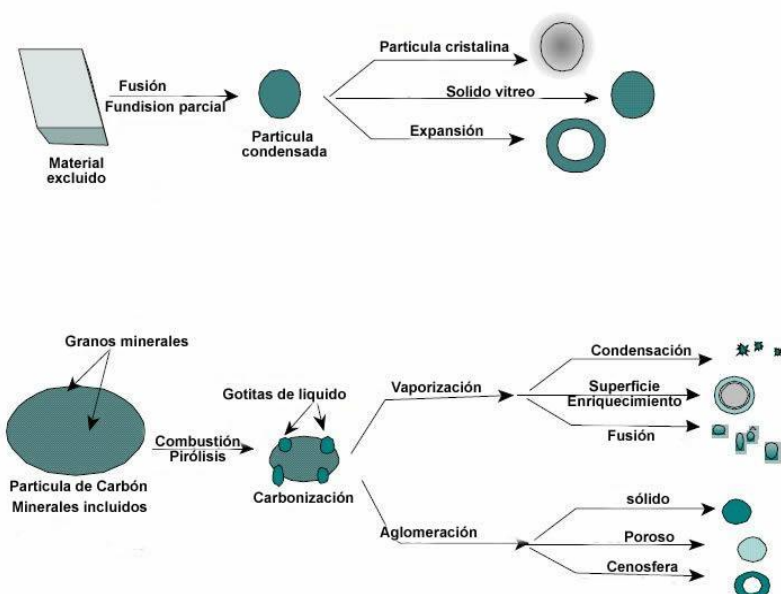


Figura 13. Transformación del material mineral en el carbón a ceniza.

En parte debido al rápido enfriamiento desde altas temperaturas, la fase cristalina de las cenizas volantes, o incluso fases minerales, son termodinámicamente meta-estables y poseen potenciales de hidrólisis. La experiencia de medio siglo de uso de las cenizas volantes confirma que las reaccionan en presencia de cal y agua o que poseen una reactividad puzolánica. La cual puede ser ampliamente atribuida a la materia cristalina en la ceniza volante.

En respuesta a la demanda de energía, la eficiencia de ignición cambia con lo que los picos de temperatura varían. Y como resultado de estas varianzas, la cantidad de carbón sin quemar en las cenizas también suele ser distinta. Además, se ha reportado que el tiempo de residencia de las cenizas volantes en la caldera causa variaciones en el contenido de alcalinidad y en el grado de vitrificación de las cenizas volantes.

En la Figura 14 se ilustra un bosquejo-resumen de lo visto hasta este momento, que es necesario tener bien claro para lo siguiente.

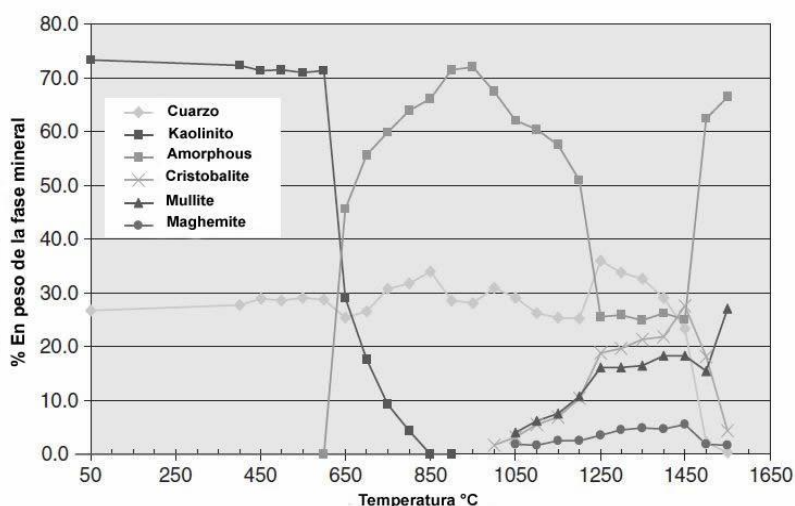


Figura 14. Posibles formaciones inorgánicas durante la combustión.

5.3 Reacciones asociadas a la combustión.

En la Tabla 10 se muestran los principales minerales identificados a altas temperaturas de fase, asociados con el uso del carbón.

Tabla 10. Principales minerales asociados con la utilización del carbón a altas temperaturas

Mineral	Composición
Cuarzo	SiO ₂
Cristobalita	SiO ₂
Tridimita	SiO ₂
Metakaolin	Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂
Mullita	Al ₆ Si ₂ O ₁₃
Albita	NaAlSi ₃ O ₈
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
Sanidina	KAlSi ₃ O ₈
Corindón	Al ₂ O ₃
Pirrotita	Fe _(1-x) S
Oldamita	CaS
Anhidrita	CaSO ₄
Aragonita	CaCO ₃
Vaterita	CaCO ₃
Portlandita	Ca(OH) ₂
Cal	CaO
Periclasa	MgO
Wuestita	FeO
Hematita	Fe ₂ O ₃
Magemita	Fe ₂ O ₃
Magnetita	Fe ₃ O ₄
Spinela	MgAl ₂ O ₄
Magnesioferrita	MgFe ₂ O ₄
Ferrita cálcica	CaFe ₂ O ₄
Srebrodolskita	Ca ₂ Fe ₂ O ₅
Brownmillerita	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀
Wollastonita	CaSiO ₃
Gelenita	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇
Merwinita	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂
Melilita	Ca ₄ Al ₁₂ MgSi ₃ O ₁₄
Whitlockita	Ca ₃ (PO ₄) ₂

5.3.1 Reacciones minerales asociadas a la combustión.

Debido a la alta temperatura de fusión (cerca de 1 800°C), el cuarzo aparentemente no es reactivo en el proceso de combustión. Sin embargo las fases de altas temperaturas como los son la tridimita y cristobalita pueden formarse del cuarzo mediante a reacciones de estado sólido (Reifenstein et al 1999), pero seguido estas reacciones toman lugar a razones lentas, por lo que el cuarzo original puede persistir como tal a través del proceso entero de combustión.

Kaolinita suele perder unidades OH de su estructura cristalina a una temperatura cercana a los 500°C, formando con esto un material esencialmente amorfo llamado metakaolin. El metakaolin experimenta cambios de fase para formar gamma-alúmina, mullita, y cristobalita a 950 -1,000°C, apareciendo estos productos persistentes como fases sólidas a temperaturas mínimas de 1,600°C (Reifenstein et al., 1999, y French et al., 2001b). illita y smectita forman spinel y mullita a temperaturas que oscilan entre 950 – 1,050°C, por lo que comúnmente se funden para formar componentes cristalinos a temperaturas de entre 1,200 a 1,350°C, con lo que hacen que las temperaturas de fusión relativas de las cenizas sean más bajas.

La calcita se descompone para formar cal (CaO) a alrededor de 900°C, y el dolomita se descompone en dos etapas de proceso para formar cal y periclasa (MgO). La cal puede interactuar con la humedad atmosférica durante el enfriamiento con lo que forman portlandita (Ca(OH)₂). El calcio puede interactuar también con materiales

aluminosilicatos a elevadas temperaturas para formar minerales como la gelenita anhídrida (Filippidis et al., 1996).

Dependiendo de la naturaleza de la atmósfera en la caldera, la pirita y siderita se descompone para formar minerales de óxido de hierro como los son la hematita, maghemita, y magnetita. El hierro en el carbón puede reaccionar para formar un amplio rango de minerales, en los que se incluye el spinel, magnesioferrita, ferrita cálcica, srebrodolskita, y browmillerita (Huffman et al., 1981; Raask, 1985^a; Reifenstein et al., 1999).

Los no-minerales inorgánicos en el maceral del carbón, junto con el azufre orgánico, pueden tomar parte en el proceso de formación de las cenizas. Algunos elementos, como el Na, S y Cl, pueden estar vaporizados parcial o completamente y llegar de esta forma hasta la sección de enfriamiento del sistema de caldera. Los elementos relacionados con las combinaciones inorgánicas en los macerales son usualmente más reactivos que los mismos elementos asociados a las fases minerales cristalinas. El Ca y el Fe, por ejemplo, forman cal (CaO) y magnetita (Fe₃O₄) cuando son derivados de la calcita o pirita, respectivamente. Estos componentes pueden reaccionar con otros componentes para formar aluminosilicatos (Russell et al., 2002). Sin embargo, cualquier Ca y Fe incorporado en los macerales están relacionados en una forma más reactiva, permitiendo con esto una incorporación más sencilla y rápida dentro de las nuevas fases que equivalen a los elementos derivados de los componentes de forma mineral cristalina (Falcone and Schobert, 1986). En la Figura 15, está basada en la dinámica de difracción

por rayos X a altas temperaturas (French et al., 2001b), el cual muestra la abundancia relativa de los diferentes minerales y fases amorfas en la formación de la materia mineral (cenizas de bajas temperaturas) aislados al carbón, los cuales constituyen en este caso la kaolinita y cuarzo, los cuales son calentados progresivamente y formados en una atmósfera oxidante a mas de 1 500°C. La kaolinita comienza a desaparecer alrededor de los 600°C y es remplazado por materiales amorfos (metakaolin).

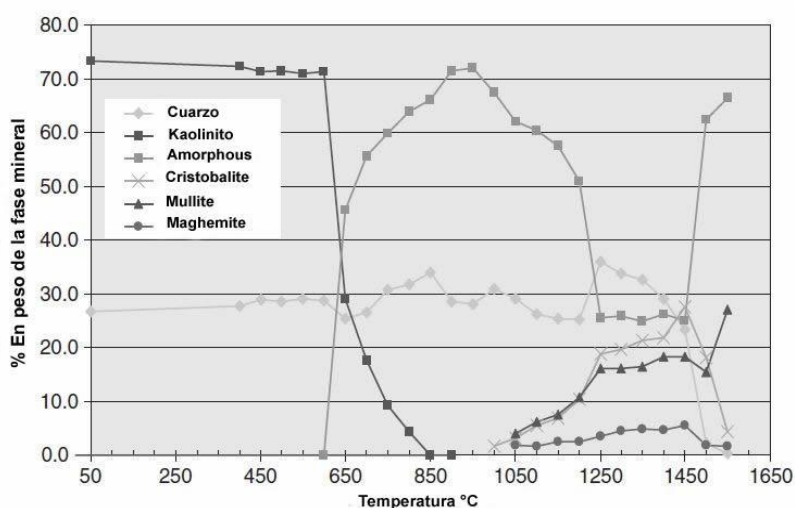


Figura 15. Abundancia relativa de los minerales y materiales amorfos.

La mullita y cristobalita se forman a temperaturas cerca de 1,000°C y la porción de metakaolin desciende acorde a este fenómeno. Sin embargo las fases no cristalinas del hierro aparecen formarse a temperaturas originales bajas de la ceniza (TBC), una porción baja de magemita se forma a la misma temperatura. El cuarzo persiste hasta una temperatura cercana a los 1,500°C, para entonces desaparecer abruptamente, formando cristobali y magemita, para ser remplazado por una segunda generación de material amorfo. Los datos de un análisis termomecánico (French et al., 2001b) sugiere que las

cenizas del carbón comienzan a fundirse a esta temperatura. Por lo tanto, aunque la mullita persiste, el cuarzo y cristobalita aparecen incorporados en los componentes vítreos.

La Figura 16 muestra datos similares para la persistencia del calcio en el carbón, trazando las fases presentes en temperaturas de 800 a 1,500°C. El cuarzo, Cal y hematita están presentes en las cenizas a 800°C, y gelenita comienza a formarse, posiblemente a expensas del cuarzo y cal, a temperaturas de alrededor de 1,000°C. El cuarzo, Cal y gelenita desaparecen a temperaturas cercanas a 1,200°C, y la anortita se forma en el proceso con un leve incremento en la porción del material amorfo.

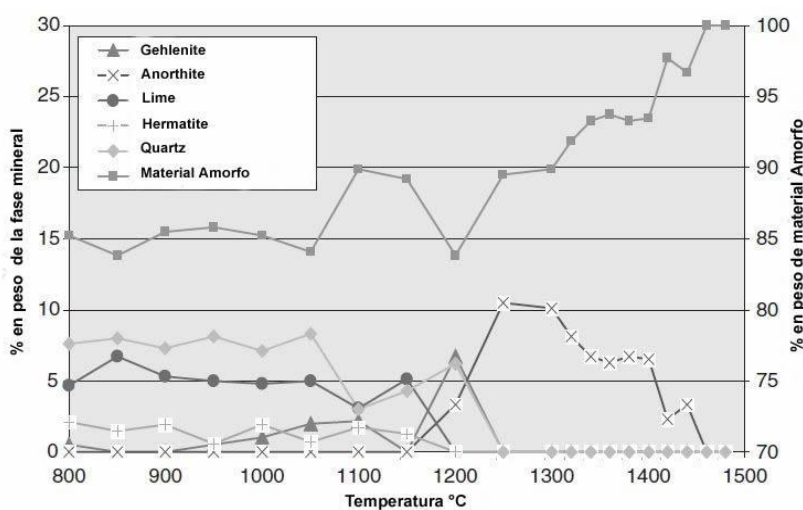


Figura 16. Abundancia relativa de minerales y material amorfo.

La anortita desaparece alrededor de los 1,450°C, temperatura a la cual los datos termomecánicos sugieren que es probable incorporarlos en una fusión, y a materiales amorfos (cristal) para formar con ello virtualmente las cenizas.

5.3.2 Procesos de escorificación e incrustación

Los minerales y los no-minerales inorgánicos en el carbón pueden reaccionar de diversas formas (Figura 17). Mientras algunas de las partículas más gruesas y densas pueden acumularse en la base de la cámara de combustión como cenizas de fondo, la mayoría de las cenizas en las calderas de carbón pulverizado se mantienen como suspensiones de partículas de cenizas volantes. Las cuales son llevadas a través del sistema y posteriormente son removidas por precipitadores electrostáticos o por algún otro tipo de filtro antes de que las corrientes de gas sean descargadas a la atmósfera (Figura 18).

Las altas temperaturas creadas en la interface lejos de incrementar la adherencia del material formado, permiten un impacto adicional de las partículas que se adhieren a la superficie y progresivamente incrementan el espesor del depósito. Eventualmente las zonas de la caldera en las que se formaron estas capas pueden fundirse o disolverse, formando escorias constituídas por aluminosilicatos con un amplio rango de incrustaciones minerales y partículas de cenizas (Figura 19)

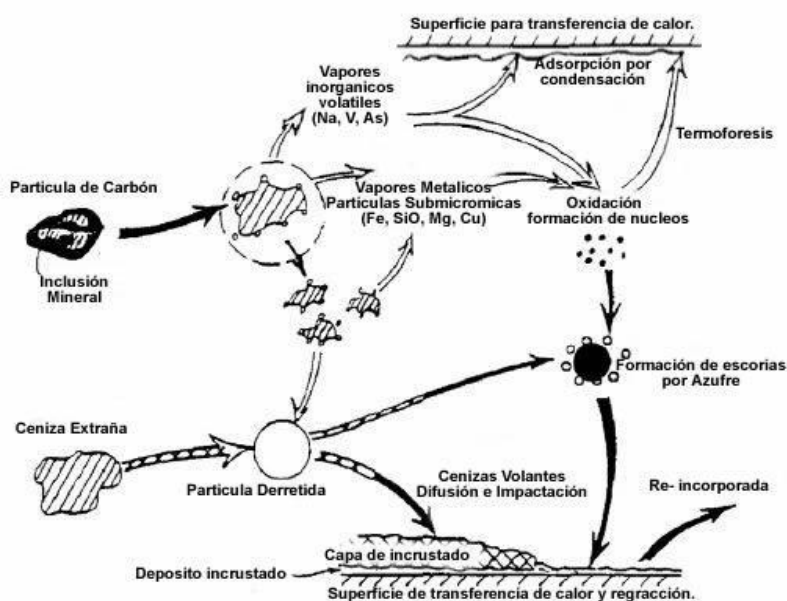


Figura 17. Procesos asociados a la reacción de material mineral en sistemas de combustión de carbón pulverizado.

Incrustaciones de escoria formadas de manera individual pueden crear capas internas, como acumulaciones de partículas minerales cerca de los tubos de agua y como materiales vítreos fusionados en las paredes de la caldera (Wang et al., 1999). La cristianización de minerales como el feldepar (una composición rica de Ca de la anortita) la cual puede tomar parte como una acumulación de escoria (Creelman et al., 2003).

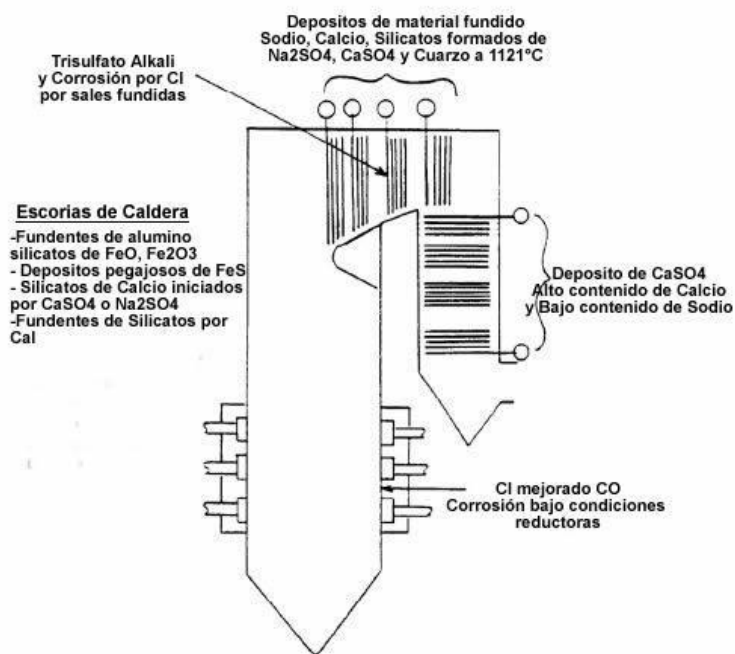


Figura 18. Sección transversal de una caldera de carbón pulverizado.

Un gran número de índices han sido desarrollados para identificar los tipos de carbón, y cuales son particularmente propensos a producir escorias y causar problemas operativos (Cudmore, 1984; Bryers, 1996; Lee and Lockwood, 1999; Creelman et al., 2003; y Su et al., 2003). Estos métodos se basan usualmente en las porciones relativas de los óxidos inorgánicos en las cenizas volantes. Y la forma en las cuales los diferentes elementos componentes de las mismas se crean e interactúan, sin embargo, también como la atmósfera, la distribución de temperatura y otros aspectos concernientes a la caldera, afectan el resultado del producto o afectan los índices de manera individual y el comportamiento del carbón, es decir las instalaciones en donde se quema el carbón es un determinante de los productos o residuos finales. La introducción de Ca, K, P, Cl y

otros elementos diferentes a los que forman la biomasa (Thy et al., 2006) fomentan el incremento de escorias o tendencias que repercuten en el rendimiento del sistema (Byers, 1996, y Pronobis, 2006) al momento que la biomasa (maceral) es quemado en las operaciones de combustión.

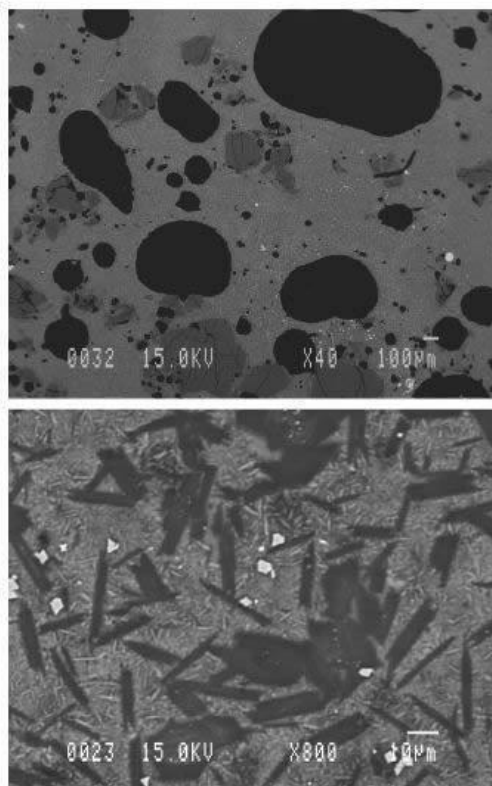


Figura 19. Imágenes de escorias incrustadas en la caldera.

5.3.3 Tendencia de los elementos traza en la combustión y formación de cenizas.

El comportamiento de los elementos en mayor composición y elementos traza durante la combustión del carbón depende de la volatilidad natural así como de su concentración y la forma en la que se encuentra en el carbón, así como las reacciones químicas que toman lugar con azufre o otros componentes volátiles en las corrientes de combustión.

La volatilidad de varios elementos depende de la tecnología de combustión por si misma, incluyendo la temperatura, el tiempo de exposición, tipo de ceniza generada, entre otros factores (Clarke y Sloss, 1992; Clarke, 1993; y Querol et al., 1995).

Los elementos traza en el carbón pueden ser divididos según la base de volatilidad en tres grupos superpuestos (Figura 20). Los elementos menos volátiles (Grupo 1) tienden a ser retenidos en las cenizas de fondo o particionadas entre las cenizas de fondo y las partículas de las cenizas volantes. Los elementos más volátiles, sin embargo, especialmente los del grupo 3, pueden ser vaporizados en la caldera y por tanto incorporarse con cualquier impureza o depósito de escorias, recondensado en las partes del enfriador del sistema en la superficie de las partículas suspendidas de las cenizas volantes, o emitidas como vapores o particulado fino en la acumulación de las corrientes gaseosas. Los elementos adjuntos a las superficies de las partículas de las cenizas volantes son especialmente propensas a movilizaciones subsecuentes, con lo que pueden pasar por sistemas acuáticos al momento de que la cenizas se disponen en sitios de acumulación (Jankowski et al., 2006) o usados en procesos para eliminación de condiciones de drenaje de minas ácidas.

Numerosos trabajadores han estudiado el particionado de los elementos traza en los sistemas de combustión del carbón, incluyendo Querol et al.(1995), Vassilev y Vassileva (1997), Hower et al. (2000b), Clemens et al. (2000), Vassilev et al (2001; 2005^a), Karayigit et al. (2001), y Li et al. (2005). Elementos que muestran enriquecimientos en las cenizas volantes de plantas de Combustión de Carbón Pulverizado son principalmente aquellas

que son volátiles y condensan parcialmente en los flujos de gases de los sistemas de combustión. Estos afluentes incluyen As, B, Bi, Cd, Ge, Hg, Mo, Pb, S, Se, Sb, Sn, Tl (Querol et al., 1995). Los elementos muestran enriquecimiento en las cenizas de fondo o escorias, de otra parte, incluyen Cu, Cr, Ni, Fe, y Mn, Concentrados en parte por los efectos de segregación de densidad.

Muchos autores, incluyendo Hower et al., (1999d), Vassilev et al. (2005b), y Vassilev y Menéndez (2005), han realizado investigaciones sobre las variaciones mineralógicas y químicas (incluyendo elementos traza) de las diferentes fracciones de las cenizas volantes, basadas en el tamaño de partícula, densidad, propiedades magnéticas, y, en algunos casos, la solubilidad en agua. Estos estudios han sido base para crear diferencias más marcables entre los productos de las corrientes de las cenizas, o como una ayuda en la determinación o estudios de impactos ambientales o para el diseño de los procesos de disposición de las cenizas (Sushil and Batra, 2006). La fracción densa de las cenizas pueden se enriquecidas con elementos como el As, Ca, Cr, Cu, Gd, Mg, Mn, Mo, Fe, Ni, Pb, S, Se, Ti, V, Zn y Zr, lo que lleva a cuadrículas cristalinas de Fe y otros óxidos, silicatos y componentes cristalinos, y otros accesorios minerales discretos. La fracción magnética está usualmente dominada por magnetita, spinel, y minerales relacionados que pueden ser enriquecidos con Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Ni, Zn y otros elementos.

Spears (2004) ha investigado el modo de ocurrencia de los elementos traza en las cenizas volantes utilizando laser ablación inductivamente acoplado a un

espectrofotómetro de plasma. Donde la mayoría de los elementos más ambientalmente significativos, incluyen As, U, Pb, Ti, Mo, Se, y probablemente, en menor cantidad, Ge y Ga, mostrando una mayor asociación con las superficies de las partículas de las cenizas, consistentes con la condensación de elementos volátiles del carbón hacia las partículas de cenizas durante el enfriamiento de los gases de combustión. Varios estudios (Querol et al., 1995) muestran el incremento de concentraciones del último grupo de elementos en las fracciones más finas de las cenizas, una observación consistente con la ocurrencia de las partículas en las superficies en lugar de inclusiones en las fases minerales y cristalinas.

El mercurio es una excepción notable en cuanto a su captura que lo distingue de otros elementos traza. Diferente al As y Pb, por ejemplo, los cuales muestran una relación entre el incremento de concentración y el descenso en la temperatura del flujo de gas y la medida de la partícula de la ceniza volante, el Hg es capturado por la ceniza volante, con la aparente captura por el material inorgánico de la ceniza volante (Hower et al., 2005a; Lee et al., 2006; Sua' rez – Ruiz et al., 2006a, 2007). El Hg que es capturado por las cenizas volantes incrementa el total de las cenizas volantes totales, a temperaturas ambientes del flujo gaseoso bajas (Hower et al., 2000b, c; Sua' rez-Ruiz et al., 2007). Otra división del Hg ocurre entre las diferentes formas de carbón sin quemar (Hower et al., 2000b,c; Maroto-Valer et al., 2001). Estudios llevados a cabo con microscopía electrónica de alta resolución aplicado a cenizas volantes capturadas por precipitadores electrostáticos han demostrado la existencia de carbón, incluso bajo la resolución de la microscopía óptica, con $<3\text{nm}$ las inclusiones asociadas de metal o mineral

(posiblemente Fe spinel) con As, Pb, y Se, y cantidades de otros elementos (Graham et al., 2005). Otras complicaciones para la captura del Hg surgen debido, a que generalmente, solo Hg^{2+} es capturado por los sistemas de control de emisión, el Hg elemental pasa a través del sistema a la atmósfera (Senior et al. 2000b). Una vez en el ambiente, el Mercurio es convertido microbially a metilmercurio, concentrado en los cuerpos acuáticos (agua dulce o mar), en la cadena alimenticia, y como un potencial neurotóxico cuando es consumido por humanos (Transand et al., 2006). Existe una sinergia entre el Hg y el Cl, con el Cl se incrementa la oxidación de HgO a Hg^{2+} incrementando la posibilidad de captura del Hg por las partículas del carbón (Kellie et al., 2005; Gerasimov, 2005). El Fe puede de la misma incrementar la oxidación, mientras Ca inhibe este proceso (Senior et al., 2000b). El control de emisión del Hg por medio de inyecciones de carbón activado pulverizado puede ser llevado a cabo, pero presenta algunos inconvenientes como el costo, y que no se ha estudiado mucho sobre este método, además la calidad del carbón es un factor importante debido al SO_3 (Srivastava et al., 2006).



Figura 20. Partición de los elementos traza basados en la volatilidad.

5.4 Generalidad

Es importante señalar que las cenizas volantes debido a su constitución pueden variar de color, que va desde canela hasta un gris oscuro. La composición química de las cenizas volantes depende principalmente de las propiedades químicas del carbón quemado, pero también del equipo empleado para controlar las emisiones. Dicho de otra forma, pueden existir cambios significativos en la composición química, propiedades físicas y en la misma morfología de las PCCs como resultado de la aplicación de tecnologías para el control de emisiones.

Las cenizas volantes con alto contenido de carbón (carbón sin quemar) es generalmente producto con un nivel mayor o igual a 6% en pérdidas por combustión, con lo cual la ceniza queda inhabilitada para su uso en construcción, concreto ya que afecta la resistencia del material deseado.

6. IMPACTO AMBIENTAL

6.1 Efectos ambientales de los PCCs

Estudios recientes realizados por instituciones como la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), el Chesapeake Biological Laboratory de la universidad de Maryland y el Savannah River Laboratory de la universidad de Georgia, por citar algunos, han demostrado que los PCCs contiene concentraciones de elementos y metales como Al, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sr, V y Zn. Según EPA, la descarga accidental o intencional de estos productos en los sistemas naturales como lo es en el caso del sistema acuático,

presenta efectos perniciosos en el medio ambiental, como sistema. Ya que estos residuos se acumulan rápidamente y en altas concentraciones en los seres vivos (Fauna y Flora) que habitan en los ecosistemas de “vertido”. La muerte de peces e incluso la extinción de algunas especies ha sido asociada a la mala gestión de los PCCs.

En los peces, reptiles, ranas, camarones y otros organismos, su exposición a los PCCs se ha traducido en numerosos efectos de tipo histopatológicos, fisiológicos (reproductivos, energéticos, endocrinológicos), etc. Debido a que ellos van acumulando los tóxicos a nivel celular, fenómeno conocido como bioacumulación, que alteran su comportamiento y desarrollo en sus nichos naturales. La recuperación de los lugares afectados por estos materiales puede ser extremadamente lenta, incluso en sitios que solo han recibido los PCCs durante periodos cortos de tiempo.

6.1.1 El suelo

En cuanto a su fracción mineral es importante señalar que los componentes minerales que constituyen la mayor parte de la estructura de un suelo, no se encuentran en cantidades equitativas, ni similares en terminos “cualitativos”. En orden de abundancia, los elementos mas comúnmente encontrados en los minerales son: O>Si>Al>Fe>C>Ca>K>Na>Mg>Ti. Los minerales se dividen en primarios y secundarios; los primeros se encuentran constituidos principalmente por O y Si y forman silicatos de estructuras Si-O (grava y arena). Los minerales secundarios, provenientes de procesos de disolución y precipitación, son de suma importancia debido a su superficie de

reacción, y a que sirven como depósitos de agua, nutrientes y materia orgánica, lo que le confiere la parte activa de un suelo (arcillas).

En general, la composición química y la estructura física del suelo están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por el tiempo en que ha actuado la meteorización (desintegración por la acción de agentes atmosféricos), por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas (Sposito 1989).

6.1.1.1 Elementos potencialmente tóxicos (Propiedades de los metales, metaloides y no metales)

Los elementos de la Tabla periódica se encuentran divididos por una marcada línea, en metales (izquierda) y no metales (derecha). La mayoría de los elementos que limitan con esta línea divisoria son metaloides o semi-metales (Figura 21) (Csuros y Csuros 2002).

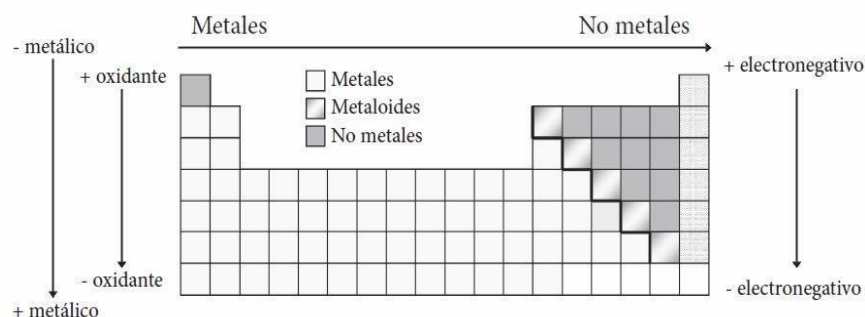


Figura 21. Localización de los metales, no metales y metaloides en la Tabla periódica.

Aunque el término metal pesado es usado comúnmente en materia de contaminación ambiental, su uso en éste y otros contextos ha causado confusión. Una de las definiciones más comunes se aplica a metales con una densidad (gravedad específica) mayor a 5 g/cm³. Sin embargo, dentro de esta clasificación también caen elementos (no metales) con propiedades químicas muy diferentes, además de que la gravedad específica no es significativa en cuanto a la reactividad, toxicidad o ecotoxicidad de un metal. El término también se ha definido con base en otras propiedades fisicoquímicas (peso y número atómico, reacción con otros elementos) y toxicológicas, por lo que resulta inconsistente.

Tabla 11. Principales características de los metales y no metales

Metales	No Metales
<i>Propiedades físicas</i>	
Buenos conductores de electricidad	Malos conductores de electricidad
Dúctiles	No dúctiles
Maleables y lustros	No maleables
Sólidos	Sólidos, líquidos o gases
Puntos de fusión altos	Puntos de fusión bajos
Buenos conductores de calor	Malos conductores de calor
<i>Propiedades químicas</i>	
Reaccionan con ácidos	No reaccionan con ácidos
Forman óxidos básicos: reacción con ácidos	Forman óxidos ácidos: reacción con bases
Forman cationes	Forman aniones
Forman haluros* iónicos	Forman haluros covalentes
*Formas mono-aniónicas (carga negativa) de un átomo de un halógeno, específicamente fluoruro (F ⁻), cloruro (Cl ⁻), bromuro (Br ⁻) y yoduro (I ⁻).	

Otra clasificación más aceptada, se basa en la acidez de Lewis y se enfoca en las propiedades químicas de los metales, de manera que los metales pesados se clasifican como elementos de clase A (duros), clase B (Suaves) y de frontera. Esta clasificación se basa en la forma en la que se unen los metales en sus complejos y determina las posibilidades para la formación de los mismos (Figura 22) (Duffus 2001).

Los iones de clase A normalmente forman complejos con ligandos similares que no se polarizan y las uniones más comunes de estos complejos son iónicas. Los metales clase B se unen preferencialmente a ligandos suaves polarizables para dar uniones más covalentes (Duffus 2001, Csuros y Csuros 2002).

6.2 Efectos de los Elementos potencialmente tóxicos sobre algunas funciones biológicas

Para que un ion de alguno(s) de los elementos arriba mencionados tenga un efecto fisiológico o tóxico sobre un organismo, primero debe entrar a célula. Los cationes metálicos divalentes (Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+}) son estructuralmente muy similares entre sí; todos ellos tienen diámetros iónicos entre 138 y 160 pm y una doble carga positiva. De esta manera, por su semejanza estructural, ciertos cationes metálicos divalentes pueden desplazar a otros con funciones fisiológicas importantes en la célula. Por ejemplo, si el Zn^{2+} es reemplazado por Ni^{2+} , o el Be^{2+} por Mg^{2+} en enzimas, estas se desactivan y pierden su función. La sustitución de Ca^{2+} por otros metales en proteínas de membrana provoca desordenes funcionales (Nies 1999).

El Cobre y el Plomo pueden ser clase B o frontera, dependiendo si se encuentran en forma de Cu(I) o Cu (II) y Pb (II) o Pb (IV), respectivamente. El hierro puede ser clase A o frontera, si se encuentra como Fe (III) o Fe (II)

Figura 22. Metales clasificados como: clase A (duros), clase B (suaves) y frontera (metales intermedios).

Los cationes de varios metales (Ca, Fe, Cu, K, Mg, Zn, Mn y Cr) juegan un papel importante como elementos traza en reacciones bioquímicas y en el metabolismo humano. Otros elementos, como Al, Si, As y Ni también se encuentra en el cuerpo, pero su función exacta no se ha determinado. Ciertos metales funcionan como “venenos” metabólicos, ya que pueden reaccionar e inhibir una serie de sistemas enzimáticos; algunos iones de estos elementos (Hg²⁺, Cd²⁺ y Ag⁺) forman complejos tóxicos inespecíficos en la célula, lo que produce efectos tóxicos para cualquier función biológica. Elementos como el Hg, As, Sn, Ti y Pb, pueden formar iones órgano-metálico liposolubles capaces de penetrar membranas y acumularse en las células. Aun, elementos sin propiedades tóxicas en baja concentración, como Zn²⁺ o Ni²⁺ y, especialmente Cu²⁺, son tóxicos en concentraciones mayores (Nies 1999, Csuros y Csuros 2002).

En relación con lo anterior, cationes tri- o tetra-valentes de otros metales (Sn, Ce, Ga, Zr y Th), debido a su baja solubilidad, no poseen influencia biológica. Del resto de los metales, el Fe, Mo y Mn son elementos traza importantes con baja toxicidad; el Zn, Ni, Cu, V, Co, W, Cr son tóxicos con importancia biológica moderada; y elementos como As, Ag, Sb, Hg, Pb y U, no tienen importancia biológica significativa como elementos traza y se consideran tóxicos (Nies 1999).

6.3 Cuidados ambientales y a la salud asociados con los usos del concreto

Cuando se utilizan cenizas volantes en el concreto para construir carreteras y puentes, (el cual está constituido por metales pesados), estas son encapsuladas en la matriz del concreto por lo que son consideradas muy estables. Por lo que la probabilidad de lixiviados de los constituyentes de estas aplicaciones no ocurren.

En cuanto a los temas asociados a la ocupación de las cenizas con el concreto se incluyen cuando estas son manejadas a priori, durante la inclusión de la mezcla que dará origen al concreto e incluso a las exposiciones que se esperan de la demolición de las estructuras elaboradas con el concreto. En estos casos, la inhalación y las precauciones del contacto con la piel deben ser tomadas en cuenta y a detalle.

Estudios e investigaciones dirigidas o respaldadas por Electric Power and Research Institute (EPRI), agencias de gobierno, y universidades, indican los beneficios del uso de los PCCs como materiales de construcción, como otras aplicaciones, ya que estas no han mostrado o presentado riesgos significativos para la salud humana y el medio

ambiente, en una experiencia que va desde 1954, cuando comenzó EPRI con estos estudios. Sin embargo, como cualquier otra sustancia común, las precauciones y prácticas de manejo seguras deben ser aplicadas al momento de usar las cenizas en aplicaciones que no encapsulan este material (gresifican). El agua y el aire son los medios que pueden verse más afectados por los constituyentes de las cenizas.

6.4 Efectos en las propiedades microbiológicas del suelo

El equilibrio de materia orgánica (C) y N en los suelos tiene un efecto en la microbiología del suelo. Poco o nada de N es aportado por los PCCs, mientras que el contenido de C varía dependiendo del PCCs del que se trate. Por lo que se posee un efecto directo en la actividad microbiana en cualquier caso. Desgraciadamente, no se tiene mucha investigación sobre la aplicación de los PCCs y el equilibrio C:N que se requieren en cada caso de aplicación, por lo que más investigación debe ser considerada en este tema.

7. FABRICACIÓN DE CONCRETO A PARTIR DEL EMPLEO DE LAS CENIZAS

VOLANTES

7.1 El cemento Portland

El cemento Portland es el ingrediente ligante o adhesivo del concreto. Está compuesto principalmente por óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro hasta en un 95%. Las fases

presentes comprenden principalmente silicatos de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) y en menor proporción aluminato de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) y ferroaluminato de calcio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Las propiedades de endurecimiento del cemento se logran mediante la mezcla de éste con agua.

La reacción química principal se da con el silicato tricalcio y el agua, expresada en la fórmula condensada (C = CaO, S = SiO₂, H = H₂O) [$\text{C}_3\text{S} + \text{H} \rightarrow \text{C}_x\text{-S-H} + (3-x)\text{CH}$].

El gel C-S-H (sin indicar la composición específica) es el responsable de las propiedades mecánicas conocidas del cemento; el CH [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] es un sub-producto de poco valor cementoso y puede ser el punto de origen de algunas reacciones degenerativas del cemento Portland hidratado.

7.1.1 Cemento y contaminación

La producción de cemento es un proceso de alta demanda energética de combustibles ($\approx 4,000$ kJ/kg cemento, 25% de pérdidas) y con alta emisión de contaminantes (0.85-1 kg CO₂/kg cemento) por descarbonatación de materia prima y uso de combustibles.

7.2 Materiales alternativos

Se puede decir que los materiales alternativos se dividen en materiales puzolánicos e hidráulicos.

7.2.1 Materiales puzolánicos

Las puzolanas son aquellos materiales de composición rica en SiO_2 , similares a las cenizas volcánicas utilizadas por los romanos.

Los materiales puzolánicos son así llamados por la interacción química con los productos de hidratación del cemento, principalmente Ca(OH)_2 ; la reacción que describe tal proceso es llamada “reacción puzolánica”

La generación de más C-S-H y la eliminación del CH producido por el cemento explica el incremento en las propiedades mecánicas de cementos reemplazados. Además de la composición química de las puzolanas, sus características físicas, como tamaño de partícula y morfología, influyen también considerablemente en las propiedades del cemento sub-sustituido.

7.2.2 Materiales hidráulicos

Para estos materiales de reemplazo del cemento Portland generalmente se requiere un estado estructural amorfo, esto es, con alta energía interna y por ende inestables termodinámicamente y muy reactivos químicamente. El mecanismo básico es el ataque alcalino de los OH^- sobre la estructura vítrea para disolverla, con la consecuente combinación con el Ca(OH)_2 y precipitación de productos cementosos tipo C-S-H.

7.3 Contexto Mexicano

Como consecuencia de la crisis económica y medio ambiental en que vivimos actualmente a consecuencia del uso y de traimiento del petróleo, como de otros combustibles fósiles tanto en México como en el mundo, se ha experimentado un cambio en los hábitos energéticos con sustitución progresiva de éstos por otras fuentes de energía o por lo menos es lo que se espera, como tendencia que a pesar de situaciones como la actual (en la que los precios del crudo ha experimentado una volatilidad considerable), se pronostica con clara proyección a futuro.

Una consecuencia directa de esta situación ha sido el progresivo uso del carbón en la generación eléctrica en el planeta, y muy posiblemente nos encontremos como país ante este panorama en un periodo corto de tiempo. Lo cual nos llevará a producir cantidades más grandes de Cenizas Volantes en las centrales carboeléctricas, las cuales si no son empleadas adecuadamente, constituirán un residuo origen de importantes problemas tanto de eliminación como de impactos ambientales.

Las centrales carboeléctricas que se construyen en el mundo están basadas en la tecnología de dos o tres grupos mundiales de proyectistas, sin embargo, parte del carbón que se quema en estas centrales en México, proceden de otros países. Por tanto los aspectos básicos para establecer normas son mas bien internacionales.

Por tanto, cualquier utilización de este subproducto será benéfico tanto del punto de vista ecológico como desde el punto de vista económico, y ha sido precisamente en la industria de la construcción donde se ha encontrado su mejor aplicación: Siendo el

cemento el componente del hormigón que más caro resulta y que más energía exige en su elaboración, la sustitución parcial del mismo por Cenizas Volantes no solo reduce el costo del hormigón como producto, sino que supone también un ahorro de energía considerable.

Es menester estudiar aunque sea de forma muy superficial, las características fundamentales de las Cenizas Volantes y del empleo de las mismas en el hormigón, antes de entrar en el desarrollo de éste. Así, como adoptar las normas ASTM, como pauta y punto de comparación, ya que es más económico traducir al español las normas que tratar de preparar otras, mas o menos basadas en ellas y/o en los ensayos de tan solo un laboratorio.

7.4 Aplicación de las cenizas volantes para la producción de hormigones

Los hormigones a los que se hace referencia son los empleados cuando se utilizan Cenizas Volantes, es decir, los empleados con proporciones de Cenizas Volantes menores del 30-35% en peso respecto al total del material conglomerante.

La incorporación de las cenizas al hormigón reduce su costo y mejora algunas de sus propiedades como su trabajabilidad y su resistencia al ataque químico, siempre que se tomen las medidas adecuadas para conseguir un correcto curado del hormigón. Las cenizas volantes afectan a las resistencias mecánicas en el sentido de disminuirlas a edades tempranas del hormigón y aumentarlas a largo plazo.

Al ser las cenizas volantes subproductos de la combustión de carbones, están condicionadas sus propiedades físicas y químicas a la naturaleza de éstos y al proceso de combustión de los mismos. Es por tanto necesario establecer unos límites máximos y mínimos a las características y llevar a cabo un minucioso control de recepción de las Cenizas Volantes que se empleen en la fabricación de los hormigones.

7.5 Cenizas volantes. Introducción

La norma UNE 83.415 define a las cenizas volantes como “el producto sólido y en estado de fina división procedente de la combustión del carbón pulverizado en los hogares de las centrales carboeléctricas y que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de los mismos en los filtros”.

Están formadas por partículas generalmente esféricas, de tamaños variables entre 1 y 150 μm dependiendo del tipo de filtros empleados, siendo mayores si se emplean filtros mecánicos que si son del tipo electrostático.

Una de las principales razones de ser del empleo de las Cenizas Volantes es su acción puzolánica. Mismas que define la norma UNE 80.301-85 como “materiales naturales o productos artificiales capaces de combinarse con la cal grasa, hidráulica o de hidrólisis de los cementos, a la temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos hidráulicos de los constituyentes del clinker Portland.

Partiendo del hecho de que las Cenizas Volantes son un tipo de puzolana artificial, en paralelo con las puzolanas naturales, que son materiales activos, ya que confieren al cemento resultante propiedades y comportamientos específicos distintos y mejores en muchos aspectos que los del cemento Portland ordinario, es decir aquel que no contiene adiciones activas o constituyentes secundarios como las Cenizas Volantes.

7.5.1 Composición química de las Cenizas Volante

Las Cenizas Volantes en cuanto a su composición química son bastante variables, pero similares a la de los grupos de minerales de la arcilla. En la (Tabla 12) se muestra los valores máximos, mínimos y medios de los a su vez, máximos y mínimos y medios de la composición química, correspondientes a 150 cenizas de ocho países de los tres principales continentes.

Tabla 12. Composición química de las Cenizas Volantes de 180 cenizas distintas, de 8 países distintos de los 3 principales continentes productores de Carbón.

	Conceptos analíticos	Máx. máx.	Min. máx.	Med. máx.	Máx. min.	Min. min.	Med. min.	Máx. med.	Min. med.	Med. med.
SiO ₂	S	63.3	50.7	56.1	47.9	29.9	39.1	58.0	41.1	49.4
Al ₂ O ₃	A	37.2	28.3	32.2	23.9	10.8	19.2	27.2	20.8	25.5
Fe ₂ O ₃	F	31.3	5.9	15.7	8.5	1.5	5.3	17.5	4.3	9.6
CaO	C	38.8	5.8	13.0	11.1	0.8	2.8	6.0	2.8	4.4
MgO	M	4.5	1.2	2.6	1.9	0	0.8	2.4	0.6	1.6
SO ₃	S	7.0	0.8	3.3	0.6	0	0.2	1.6	0.3	0.9
Na ₂ O	N	2.4	0.6	1.5	0.9	0.1	0.3	1.5	0.3	0.8
K ₂ O	K	6.0	2.9	3.7	1.8	0.6	1.1	3.9	1.3	2.4
Per. Fuego	PF	23.5	1.2	14.0	1.5	0.05	0.8	9.7	0.7	5.5
Total		214.0	97.4	142.1	98.1	33.75	69.6	127.8	72.2	100.1

Los carbones antracíticos y bituminosos producen cenizas ricas en S, A y F, con contenidos totales de estos componentes superiores al 70%, mientras que de los carbones sub-bituminosos y ligníticos se obtienen cenizas más pobres en dichos componentes ($S+A+F < 70\%$) –sobre todo en A-, y más ricos en C, M y S, ($C+M+S > 30\%$).

Debido a la importancia de la composición química de las Cenizas Volantes en el comportamiento de los cementos y hormigones, se han especificado ciertas limitaciones, como se menciona:

La PNE UNE 83.415 especifica:

- SO_3 (UNE 83.432) máximo: 4.5
- Humedad (UNE 83.431) máximo: 1.5
- Perdida por calcinación (UNE 83.433) máximo: 6

(valores expresados en % masa y referidos a base seca).

Por otra parte, la ASTM C618-80 divide a las Cenizas Volantes en dos clases:

- Clase F –Cenizas con bajo contenido en cal, silicoaluminosas, con propiedades puzolánicas normalmente producidas a partir del carbón antracítico y bituminoso.
- Clase C –Cenizas con alto contenido en cal, cálcicas, con propiedades puzolánicas e hidráulicas normalmente producidas a partir del lignito o carbón sub-bituminoso.

La norma ASTM clasifica las cenizas volantes en clase F o clase C según el contenido de óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) sea superior al 70 o 50%, respectivamente. En la (Tabla 13) se indican para cada una de ellas los límites fijados.

Todas las normas limitan el contenido máximo de SO_3 y esto es con el fin de evitar las interferencias con el fraguado del cemento y para reducir la posibilidad de fenómenos expansivos en el hormigón. Incluso existe quien recomienda limitar el contenido máximo de CaO libre con la idea de evitar este mismo problema de expansividad en el hormigón.

La pérdida por calcinación está relacionada con el contenido de carbón en las cenizas volantes. Tiene un carácter nocivo en el comportamiento resistente del hormigón e influye desfavorablemente en la eficacia de los aditivos, especialmente en los inclusores de aire. Por todo esto, las normas limitan su valor máximo al 6 o 7% si bien en muchos casos se aconseja no sobrepasar el 4% con el fin de conseguir una mayor eficacia de los aditivos aireantes.

Tabla 13. Especificaciones de la ASTM para el empleo de las cenizas según su tipo o clase, la cual se basa en la suma de los componentes S+A+F, porcentaje mínimo que representan.

	Clase F	Clase C
S + A + F, % min.	70.0	50.0
SO ₃ % máx.	5.0	5.0
Humedad, % máx.	3.0	3.0
Perdida por fuego, % máx.	12.0	6.0
Opcionales:		
MgO, % máx.	5.0	5.0
Alcalis como Na ₂ O, % máx.	1.5	1.5

La limitación del contenido de humedad de las cenizas volantes en las normas citadas tiene por objeto facilitar su manipulación y reducir su costo. Esta limitación oscila entre el 0.5 y el 3%, según cada norma.

7.5.2 Constitución de las cenizas volantes

Los óxidos básicos y ácidos que componen a las Cenizas Volantes se encuentran formando parte de constituyentes análogos a los minerales arcillosos, de tal forma que del 50 al 80% del total de las mismas son silicoaluminatos en mayor proporción cuanto mayor es la edad de los carbones de procedencia. Estos silicoaluminatos se forman por fusión, de la cual puede resultar en el enfriamiento una fase vítrea y unos constituyentes cristalinos en proporciones recíprocas variables. Y su importancia radica en la relación vidrio/cristal, ya que es decisiva para el poder puzolánico de las Cenizas Volantes.

7.5.3 Propiedades físicas de las Cenizas Volantes

Las especificaciones físicas se marcan en la PNE UNE 83.415 y son la finura, el índice de actividad resistente, la demanda de agua y la estabilidad de volumen, en esencia, las mismas que señala la ASTM C618-80. Por lo que, en cuanto más fina sean las cenizas, mayor es su actividad puzolánica. Ya que éstas dan lugar a reacciones más rápidas, con tiempos de endurecimiento ligeramente más cortos y resistencias algo mayores.

En cuanto a la densidad, las Cenizas Volantes menos densas poseen una mayor proporción de partículas a veces huecas, las cuales contienen carbono, casi todo el amorfo, y a su vez con superficie específica y capacidad de absorción variable, lo que influye decisivamente en el rendimiento y comportamiento de los aditivos fluidificantes y superplastificantes haciéndolos incontrolables e impredecibles, tanto en el contenido del aire ocluido por el hormigón, como en la reología, fluidez y trabajabilidad del mismo.

Todas las normativas existentes limitan la finura de las Cenizas Volantes, su granulometría y específicamente los tamaños de sus partículas inferiores a $45\mu\text{m}$, valor que se relaciona con la actividad resistente, la demanda de agua y con las propiedades del hormigón que de ellas se derivaran. Las normas limitan la finura estableciendo un valor máximo del retenido en el tamiz de $45\mu\text{m}$. Para la norma UNE el valor se limita a 40%, la americana a un 34% y la británica a un 12.5% si son utilizadas Cenizas Volantes en hormigones estructurales.

La contribución de las cenizas al desarrollo de las resistencias mecánicas se mide a través del índice de actividad resistente, y su valor mínimo a 28 días se limita al 75% en el caso de las normas Española y Americana, y al 85% en el caso de la norma británica para hormigón estructural. La norma UNE establece también un valor mínimo de dicho índice del 90% en el ensayo a 90 días.

Por último, la norma americana establece unos criterios para controlar la estabilidad de volumen, la cual se limita a 0.8% de cenizas a 10mm de máxima expansión o contracción en autoclave. El objeto de esta limitación es controlar la estabilidad de volumen que puede ser afectada por la presencia de la cal libre o de los sulfatos.

7.6 Las Cenizas Volantes y la hidratación del cemento

La acción de las Cenizas Volantes en la hidratación de los aluminatos se podría esquematizar como sigue:

En primer lugar se produce una adsorción sobre el C_3A de iones SO_4^{-2} de la fase líquida que existe en exceso en el caso de cementos con cenizas; después se forma ettringita que consume agua sustrayéndola del sistema; para dar pie a la migración de los iones SO_4^{-2} y la formación y estabilización de aluminatos hidratados hexagonales; para finalmente producir el paso de la fase hexagonal a la cúbica, de forma retardada que sin la ceniza, y el resto del C_3A anhidro se hidrata rápidamente.

Las Cenizas Volantes contribuyen a acelerar la hidratación de los constituyentes del clinker y dan a la pasta una estructura evolutiva especial. Las propiedades de esta pasta dependen en buena medida de la naturaleza y de la evolución de la adherencia de los productos formados en la interfase esfera/matriz de la pasta, lo cual depende a su vez de las características del clinker y de la ceniza, así como de la finura y las proporciones de ambos, y del tiempo. Ya que a cortas edades, esta interfase presenta una mayor proporción de superficie inconsolidada, siendo esta mayor al ser mayor la proporción de Cenizas Volantes.

Pero este efecto se acentúa con la consolidación de la interfase, es decir, con el tiempo, llegando a producir los aumentos de resistencia a largo plazo.

La actividad puzolánica de las Cenizas Volantes de la clase F depende de la cal producida en la hidratación del cemento. Por el contrario, las de tipo C comienzan sus reacciones puzolánicas y conglomerantes inmediatamente después de la adición del agua, produciéndose más rápidamente que cuando se utiliza cal en la hidratación del cemento.

Otro fenómeno importante es la reducción del calor de hidratación por adición de las cenizas volantes. Esto se debe fundamentalmente a un efecto de dilución del clinker (o del cemento), puesto que el calor de hidratación de las cenizas es menor que el del clinker o cemento, y además se desprende con mayor lentitud.

Aunque, por otro lado, los aumentos de temperatura aceleran la resistencia del hormigón de cemento Portland ordinario, si bien a costa de reducir las resistencias a largo plazo. Sin embargo, con los cementos y hormigones con Cenizas Volantes sucede lo contrario, por efecto puzolánico, con la ventaja de que la elevación de la temperatura no es tan grande en elementos de gran espesor y en hormigón muy masivo.

Por todo esto, los cementos y hormigones con Cenizas Volantes son especialmente aptos para presas y para toda obra civil donde se especifiquen hormigones de alta resistencia con buena trabajabilidad para su puesta en obra con gradientes de temperatura mínimos.

7.6.1 Propiedades del hormigón fresco

Como se ha mencionado, la incorporación de las cenizas volantes al hormigón, en general, aumenta los tiempos iniciales y finales de fraguado. Este efecto depende de la cantidad de cenizas añadidas y de su finura y composición química. Sin embargo, la finura del cemento, la cantidad de agua empleada y la temperatura ambiente tienen, en muchos casos, una influencia mayor en el principio y final del fraguado que la propia incorporación de cenizas volantes.

El tamaño y la forma esférica de las partículas que componen muchas de las cenizas volantes influyen en las propiedades reológicas del hormigón, reduciendo la cantidad de agua necesaria para obtener una durabilidad equivalente a la de un hormigón sin cenizas. La (Figura 23) muestra la influencia que la cantidad de cemento sustituido por cenizas y la finura de éstas tienen en la reducción del agua necesaria para obtener un hormigón de la misma docilidad.

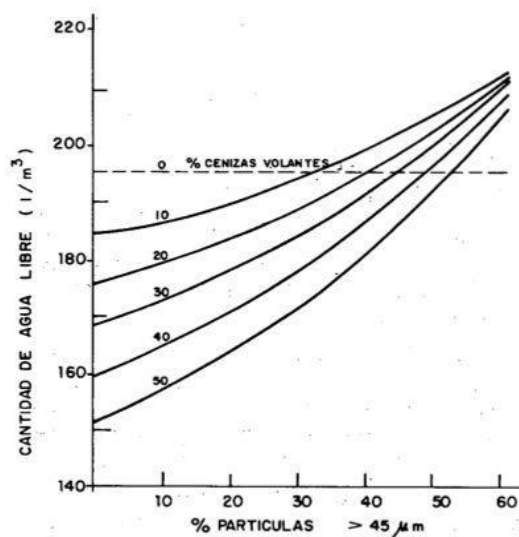


Figura 23. Influencia del contenido de partículas gruesas de las cenizas volantes en la cantidad de agua necesaria para obtener la misma docilidad.

La incorporación de las cenizas volantes reduce también en muchos casos la segregación y la exudación, dando lugar a hormigones muy aptos para ser bombeados. Sin embargo, con áridos mal graduados esta reducción no se produce y la incorporación de cenizas puede empeorar la situación, aumentando la exudación.

La hidratación del cemento es una reacción exotérmica que, si se evitan las pérdidas de calor, puede provocar elevaciones de temperatura de hasta 75°C en el hormigón. Este hecho no suele plantear problemas especiales durante el hormigonado de elementos lineales ya que las pérdidas de calor contrarrestan en gran medida el producido por la hidratación del cemento. Sin embargo, el problema es distinto cuando se hormigón a grandes volúmenes. En estos casos se producen elevaciones importantes de temperaturas en el núcleo y gradientes térmicos muy fuertes entre el interior y la superficie del hormigón, generando estados tensionales que provoca fisuraciones.

La sustitución parcial de cemento por cenizas reduce el calor generado durante el proceso de hidratación del cemento y es una práctica habitual en los hormigones para presas y en general para cualquier tipo de elemento volumétrico de grandes dimensiones.

Es necesario por tanto llevar a cabo estudios previos que permitan conocer la cantidad adecuada de aditivo según la cantidad y composición de las cenizas empleadas.

7.7 Fabricación de los hormigones con cenizas volantes

Como inicio del proceso de fabricación de hormigones con Cenizas Volantes debe realizarse un minucioso control de recepción de las Cenizas Volantes, de acuerdo con el indicado en la norma UNE 83422-86, con el cual se pueda determinar las variaciones producidas en el suministro. No solo interesa comprobar que se cumplan las especificaciones de la normativa sino también detectar las variaciones de sus características, siempre y cuando estas se encuentren dentro de los límites establecidos, ya que pueden afectar tanto el proceder como las dosificaciones de las mismas.

Cabe señalar que algunas normas estipulan no solo unos valores límites sino también fijan las variaciones máximas admisibles durante el suministro de las cenizas para un hormigón determinado.

Las cenizas se transportarán y almacenarán en equipos y silos estancos, respectivamente, de tal forma que eviten la alteración de sus características químicas o físicas y que permitan un fácil acceso para una adecuada inspección e identificación de cada envío o lote. Los silos de almacenamiento de las cenizas volantes estarán claramente diferenciados de los silos del cemento. Cabe señalar que los equipos para la manipulación de las cenizas son similares a las empleadas con el cemento.

7.7.1 Dosificación de hormigones con cenizas

Las cenizas se incorporan al hormigón para mejorar la granulometría de la arena, para formar parte del conglomerante como producto cementicio o para ambas finalidades.

Si este es empleado como sustituto parcial del árido fino con el objeto de mejorar la granulometría para conseguir una trabajabilidad mayor del hormigón, las Cenizas Volantes deberán cumplir las especificaciones contenidas en la norma UNE 83415-87 salvo lo referido a la finura y a la actividad resistente.

Si las cenizas volantes se incorporan al hormigón sustituyendo parcialmente al cemento deben tenerse en cuenta los aspectos siguientes:

- El cemento debe ser tipo Portland (RC-75) o tipo I (UNE 80 301-85)
 - Las cenizas deben cumplir todas las especificaciones contenidas en la norma UNE 84315-87.
 - Las resistencias mecánicas a corto plazo serán inferiores a las de un hormigón sin cenizas con igual cantidad de producto cementicio
 - La cantidad de Cenizas Volantes que suelen utilizarse para sustituir al cemento oscila entre el 15 y el 35% del total de material cementicio (cemento + arena)
 - Deben tenerse en cuenta que los límites establecidos en la normativa de hormigones (Tabla 14) sobre la relación agua/cemento (a/c) y el contenido mínimo de cemento por m^3 de hormigón, según el tipo de ambiente en el que se ubique la construcción. Ahora bien, en este caso los límites corresponderán a la relación
-

agua/(cementos + cenizas) y al contenido de (cementos + cenizas) y al contenido de hormigón, siempre que no sobrepase el 30% de sustitución.

Tabla 14. Límites establecidos en la normativa de hormigones sobre la relación agua/cemento y el contenido mínimo de cemento por m³ de hormigón, según el tipo de ambiente de construcción

Ambiente	Relacion Maxima a/c	Contenido minimo en cemento kg/m ³	
		Hormigon en masa	Hormigon armado
I	0.65	150	250
II	0.60	175	275
II (heladas)	0.55	175	300
II (fundentes)	0.50	200	300
III	0.55	200	300
III (heladas)	0.50	200	300
III (fundentes)	0.50	200	325
Quimicamente agresivo	0.50	200	325

- *Ambiente I – Interior de edificios y exteriores con humedad baja (no se sobrepasa el 60% de maxima humedad relativa mas de 90 dias al años).*
- *Ambiente II – Exterior no agresivo o en contacto con aguas normales o terrenos ordinarios*
- *Ambiente III – Atmosfera marina o industrial, o en contacto con aguas salinas o ligeramente acidas.*

(En estos casos deberan utilizarse aireantes que produzcan un contenido de aire ocluido mayor o igual al 4.5%)

7.8 Propiedades del hormigón endurecido

7.8.1 Resistencias mecánicas

Las resistencias mecánicas de los hormigones fabricados con cenizas volantes y su evolución con el tiempo dependen de la calidad de las cenizas, de su correcta dosificación y amasado y de un sistema de curado del hormigón apropiado.

La colaboración de las cenizas en este aspecto difiere según que en ellas prevalezcan los componentes ácidos (cenizas sálico-aluminosas) o que posean contenidos altos en

cal (cenizas sulfocalcicas). Mientras que las primeras necesitan la presencia del cemento Portland para reaccionar con su Ca(OH)_2 proporcionando compuestos conglomerantes, las segundas, en presencia del agua, generan en si mismas compuestos que colaboran en el desarrollo de las resistencias mecánicas del hormigón.

El contenido de partículas en las cenizas superiores a $45\mu\text{m}$ tiene una influencia notable en las resistencias, aumentando éstas cuando dicho contenido disminuye.

Por ejemplo, variaciones del 5 al 35% en cantidad retenida en el tamiz de $45\mu\text{m}$ pueden hacer variar la resistencia del hormigón entre un 10 y 25%.

A igualdad de la relación agua/productos cementicios, la sustitución parcial de cemento Portland por Cenizas Volantes proporciona hormigones con resistencias menores a edades tempranas (en algunos casos hasta 90 días), si bien a largo plazo éstas pueden superar a la del hormigón fabricado sin cenizas.

En la (Figura 24) se representa la relación entre distintas cantidades de sustitución de cemento por cenizas y la resistencia a compresión del hormigón a 28 días, para relaciones agua/producto cementicio ($\text{agua}/(\text{cemento} + \text{cenizas})$) de 0.35, 0.50 y 0.65, respectivamente.

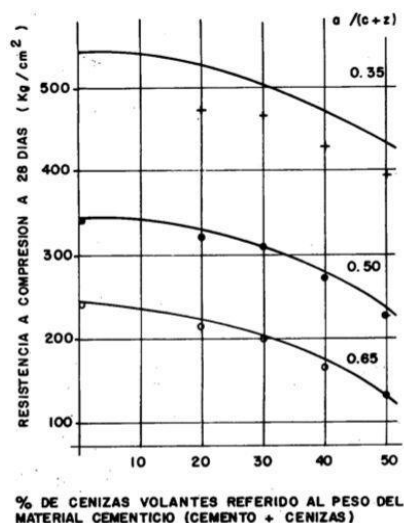


Figura 24. Influencia de la relación agua/material cementicio y de la cantidad de cenizas en la resistencia del hormigón a compresión.

Si se realiza la adición de forma que se incremente el contenido total de producto cementicio y consecuentemente se reduzca la cantidad de agua, se pueden conseguir hormigones con resistencias mecánicas a 28 días similares a los hormigones sin cenizas y con resistencias mayores a edades superiores.

7.8.2 Permeabilidad

La permeabilidad de los hormigones con resistencias similares a 28 días disminuye cuando se incorporan cenizas volantes al hormigón, siempre que el curado sea correcto.

Este efecto, depende en gran medida de un buen diseño de la mezcla y de un curado apropiado del hormigón, es debido a la reducción del contenido de agua, al aumento del

producto cementicio y al propio efecto puzolánico de las cenizas. Referente al último aspecto citado, la reducción de la permeabilidad del hormigón se detecta cuando ya se ha desarrollado, en parte, la actividad puzolánica de las cenizas volantes.

La (Figura 25) pone de manifiesto de forma cualitativa la influencia del curado en la permeabilidad. En un hormigón bien curado el empleo de adiciones disminuye su permeabilidad. Sin embargo, si el curado es inadecuado, la incorporación de adiciones en el hormigón aumenta su permeabilidad.

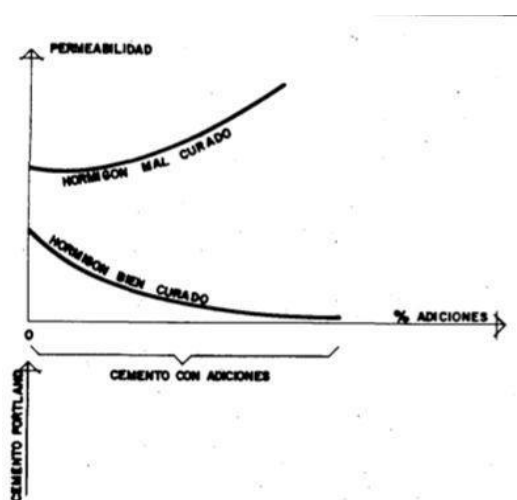


Figura 25. Influencia del curado en la permeabilidad del hormigón

7.8.3 Resistencia al ataque por sulfatos

Los hormigones fabricados con cenizas con un contenido de éstas últimas, superiores al 25% del total de material cementicio suelen mejorar ligeramente su resistencia al ataque de los sulfatos, si se comparan con los hormigones sin cenizas. Esta mejora es notable cuando el contenido de cenizas alcanza el 40% del total del material cementicio y la relación agua/productos cementicios es inferior a 0.45.

7.8.4 Protección de armaduras

La capacidad del hormigón para proteger las armaduras depende, entre otros factores, de la cantidad y la calidad del recubrimiento, influyendo en esta última la impermeabilidad y la reserva alcalina del hormigón.

Los hormigones fabricados con cenizas volantes y curados adecuadamente son menos permeables como ya se ha comentado. Por otra parte, la reserva alcalina de los hormigones con cenizas es menor que la de los fabricados sin ellas debido a la puzolanicidad de las mismas.

En general, siempre que se tomen las medidas adecuadas para garantizar un curado correcto y que se emplee una cantidad mínima de cemento Portland (RC-75) o cemento tipo I (UNE 80301), el hormigón fabricado con cenizas no plantea aspectos distintos al fabricado sin ellas en lo que concierne a la protección de las armaduras, ya que aunque disminuye su reserva alcalina aumenta su impermeabilidad.

7.8.5 Las Cenizas Volantes y la reología del hormigón

Una de las características más destacadas de las Cenizas Volantes, y que las hacen aprovechables para su utilización en cemento y hormigones, es su capacidad de

reducción de agua en las pastas, morteros y hormigones, e igual con la plasticidad, capacidad de flujo, etc.

7.8.6 Las Cenizas Volantes y la retracción

La adición de ceniza parece hacer disminuir la retracción intrínseca, la cual depende de la naturaleza y proporción de la ceniza empleada.

7.8.7 Las cenizas volantes y la durabilidad

En general las Cenizas Volantes producen un efecto benéfico en la durabilidad del hormigón que responde a factores de índole física y química.

Los factores de índole física son la mayor densidad, compacidad, impermeabilidad a los iones, que las Cenizas Volantes aportan al hormigón como consecuencia de su efecto reductor de agua para una consistencia y trabajabilidad dadas, y como consecuencia de ser la durabilidad dependiente de la permeabilidad, y función a su vez del grado de hidratación y de la proporción de huecos, y de la capilaridad creada por exceso de agua de amasado.

En cuanto al factor de naturaleza química tenemos el carácter puzolánico de las Cenizas Volantes. Que por medio de éstas se consigue una mayor resistencia a los ataques por sulfatos, agua de mar, aguas puras, ácidas y carbónicas agresivas y un mejor

comportamiento frente a la reacción expansiva aridoalcalis y frente a la carbonatación. Sin embargo en el hormigón con Cenizas Volantes usado normalmente se observa que las cenizas apenas mejoran la resistencia a las heladas.

7.9 Las cenizas volantes y los aditivos para el hormigón

Las Cenizas Volantes influyen en la dosificación, control y efectos de los aditivos, y en particular de los agentes inclusores de aire, fluidificantes y superplastificantes. En estas influencias juega un papel importante el contenido de carbón, el tamaño, superficie específica y porosidad de sus partículas y, en definitiva, su capacidad de adsorción.

La combinación de superplastificantes y cenizas en el hormigón permite obtener menor retracción, menor fluencia y mayores resistencias a corto y largo plazo que con cementos Portland ordinarios, en hormigones de igual trabajabilidad.

7.10 Cenizas volantes y los hormigones con cenizas volantes en la normativa internacional

Las normas ASTM relacionadas con cenizas volantes son las siguientes:

- Norma C-311, sobre métodos de muestreo y ensayo para las cenizas volantes o para puzzolanas naturales
 - Norma C-25, sobre métodos de análisis químicos de caliza, cal viva o cal apagada (para analizar las cales a emplear con las cenizas para tener un aglomerante propiamente puzolánico).
 - Norma C-109, sobre métodos para hallar la resistencia a la comprensión de morteros de cemento hidráulico, usando probetas cúbicas de 50 mm de lado.
-

- Norma C-144, sobre análisis químicos del cemento hidráulico.
- Norma C-150, sobre cemento Portland.
- Norma C-191, sobre tiempo de endurecimiento del cemento hidráulico usando la aguja de vicat.
- Norma C-305, sobre la mezcla mecánica de pastas y morteros de cemento hidráulico para determinar la consistencia plástica.
- Norma C-593, Sobre las Cenizas Volantes y otras puzolanas para usarlas con cal.
- Norma C-821, sobre cal para usarla con puzolánas.
- Norma D-422, sobre el análisis granulométrico.
- Norma D-560, sobre ensayos de heladicidad de probetas de suelo-cemento.

Como se ve tenemos normas ASTM para todos los casos de empleo de las Cenizas Volantes y materiales complementarios.

La norma UNE 83.415 en el apartado de fabricación del hormigón con cenizas especifica lo concerniente a:

- Definición y utilización
 - Dosificación
 - Condiciones de las instalaciones de fabricación de hormigón con Cenizas Volantes
- Recepción de las Cenizas Volantes
 - Control y entrega del pedido
-

Hay que destacar que estas recomendaciones no contemplan los nuevos tipos de cemento definidos en las normas UNE 80.301-85 y 80.302-85, por ser su redacción anterior a la de éstas.

Cabe señalar por otra parte, que no existe ninguna normativa en el mundo sobre el uso de las Cenizas Volantes en las altas proporciones que se dan en los Hormigones con alto contenido de Cenizas Volantes, sin embargo las recomendaciones admiten un máximo del 35% en relación del peso de las Cenizas Volantes al total del material conglomerante.

Los nuevos cementos definidos en la UNE 80.301 y 80.302 el cemento que se presta mejor para su utilización en Hormigones con alto contenido de Cenizas Volantes es el cemento mixto tipo V, definido como "conglomerante hidráulico, constituido a base de clinker Portland en proporción no menor del 20% ni superior al 60% en masa, y de un máximo del 5% de filer calizo".

7.11 Puesta en obra y curado del hormigón

En la puesta en obra del hormigón con cenizas deben tenerse en cuenta las mismas reglas de buena práctica que rigen para el caso de los hormigones sin cenizas.

7.11.1 Construcción de presas

Un cambio significativo en los métodos de construcción de presas en los últimos años ha sido el uso de un sistema de colocación de hormigón en bandas continuas horizontales en vez de los vertidos aislados con posterior vibración interna. Y a principios de los años 70 surgió la compactación con rodillo para la compactación de presas, como una extrapolación de los métodos utilizados en la colocación de suelos mejorados con cemento en explanadas de carretera.

Un Hormigón compactado con Rodillo, puede definirse como un hormigón de consistencia seca, sin asiento en cono, que es transportado, colocado, y compactado con la misma maquinaria que la usada en movimientos de tierra. Las proporciones de los ingredientes básicos de este hormigón varían considerablemente dependiendo de la función asignada a la estructura. Así, se han hecho Hormigones compactados con Rodillo con contenidos de cemento de 66 a 249 kg/m³ y con contenidos de Cenizas Volantes con una relación entre Cenizas Volantes/Conglomerante (en volumen) entre 0 a 0.8.

Se pretende por tanto vincular la conocida técnica del Hormigón compactado con Rodillo con los concreto con alto contenido de Cenizas Volantes:

Los sistemas de compactación de hormigón con rodillo contemplan tres tipos de materiales diferentes:

- Suelo estabilizado
- Concreto pobre, con 100-120 kg/m³ de material conglomerante con hasta un 30% de Cenizas Volantes
- Hormigones con alto contenido de cenizas volantes, con los valores ya conocidos de la relación Cenizas Volantes/Conglomerante (en volumen)

La presa de hormigón ideal construida con el sistema de compactación con rodillo debería tener las siguientes propiedades:

- Baja permeabilidad
- Alta densidad
- Unidad adecuada entre tongadas sucesivas
- Unión adecuada entre el hormigón de los parámetros exteriores, no compactado con rodillo, y el hormigón interno
- Baja retracción y alta resistencia a tracción
- Posibilidad de controlar la calidad con métodos factibles y rápidos
- Posibilidad de incorporar juntas, drenes, galerías, etc.

El concreto con alto contenido de Cenizas Volantes, satisface adecuadamente estos requerimientos.

Estas conclusiones llevaron al diseño de una presa de gravedad en Milton Brook con esta configuración en el Hormigón. Sin embargo en los ensayos a escala real llevados a cabo por el CIRIA se comprobó que era difícil cumplir los requisitos con un hormigón convencional con Cenizas Volantes. Por lo que se concluyó que el concreto más

adecuado era un Hormigón con alto contenido de Cenizas Volantes y que el mismo compactado con Rodillo es adecuado para la construcción de presas allí donde las condiciones son favorables para una presa de hormigón en masa.

7.12 Huella de carbono

Teniendo en cuenta la importancia que tiene la implementación de materiales sostenibles en la sustitución del cemento Portland para la disminución de emisiones de CO₂ a la atmósfera, se ejecutan medidas de reducción y/o compensación de emisiones. El cálculo de la huella de carbono se convierte en un indicador para determinar impactos y su posterior disminución y así cuantificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al ciclo de vida de un producto, para determinar su contribución al cambio climático.

Debido al interés de la población mundial frente a esta problemática ambiental se han creado metodologías para el cálculo de la huella de carbono. En el reporte de la Comisión Europea se resaltan cuatro procedimientos principales para la estimación de la huella de carbono en empresas, organizaciones, servicios, procesos y productos. Los cuales son, protocolo de gases efecto invernadero, balance de carbono, PAS 2050 y método compuesto de las cuentas contables. Para el cálculo de la huella de carbono de un producto es comúnmente usado el método de las Especificaciones Públicamente Disponibles llamado PAS 2050, elaborado en el año 2007 por el Instituto Británico de Estandarización. Está enfocado al cálculo de emisiones de productos y servicios por medio del análisis del ciclo de vida y huella de carbono.

Los límites del cálculo de la huella de carbono se establecieron a partir del límite B2B (business to business) el cual se enfoca en terminar la estimación de la huella de carbono cuando el producto abandona la empresa en la que se ha fabricado quedando por fuera del estudio el proceso de uso y etapa de fin de vida. Este límite fue escogido según lo indicado en la regla de categoría de producto para el cemento y prefabricados de hormigón, definido por las Normas (UNE-EN 15804, 2014) y (UNE 127757,2016).

Se definieron dos alcances según el impacto directo e indirecto sobre la fabricación de las tabletas prefabricadas. En el alcance 1 se involucraron las emisiones directas que ocurren de actividades relacionadas en la creación de tabletas prefabricadas, mientras que en el alcance 2 se tuvieron en cuenta las emisiones indirectas derivadas de su fabricación, pero generadas por otras entidades. A partir de las etapas productivas y los límites establecidos para la elaboración de tabletas prefabricadas de cemento y ceniza volante activada alcalinamente, se realizó la recopilación de datos que involucra las cantidades de material y energía implicadas en el ciclo de vida de cada producto y los factores de emisión de los combustibles utilizados.

La recopilación de datos de las tabletas prefabricadas de mortero de cemento fue basada en la visita a la planta Santa Rosa en Nuevo México, México con el fin de obtener mayor precisión. Para las tabletas prefabricadas de mortero de ceniza volante activada alcalinamente los datos se obtuvieron de forma teórica y del proceso práctico realizado en la presente investigación. Para el cálculo de la huella de carbono se tuvieron en cuenta las etapas productivas descritas anteriormente con el fin de crear un balance de masa e identificar fuentes de energía y combustibles utilizados para la

fabricación de un lote equivalente a mil (1000) kilogramos. Los cálculos se realizaron por medio de las ecuaciones 1 y 2 mostradas a continuación.

$$CE = ExFE$$

Dónde

CE = Es el CO₂eq por consumo energético (Kg CO₂eq)

E = Es la electricidad generada (Wh)

... CC = ExECxGWP

Dónde

FE = Es el factor de emisión (Kg $\frac{CO_2eq}{Wh}$)

Dónde

CC = Es el CO₂ por consumo de combustible (Kg CO₂eq)

Q = Es la cantidad de combustible quemado para llevar una actividad en particular

EC = Es el contenido de energía de los tipos específicos de combustible utilizados

GWP = Es el potencial de calentamiento global total del tipo de combustible

Para calcular la cantidad de Kg CO₂ eq de los alcances 1 y 2 para mil (1000) kilogramos de tabletas prefabricadas de cada material se usaron las ecuaciones. (1) y (2) teniendo en cuenta los tipos de combustibles, poderes caloríficos y factores de emisión establecidos para los combustibles.

En las Tablas 15 y 16 se presentan los resultados de las emisiones de CO₂ eq obtenidos en la producción de un lote de mil (1000) kilogramos de tabletas prefabricadas de cada material. En el cálculo de la huella de carbono del alcance dos de las tabletas prefabricadas de mortero de cemento se tuvieron en cuenta las emisiones desde la extracción de materias primas del cemento.

Para el cálculo de la huella de carbono del alcance dos en las tabletas prefabricadas de ceniza volante no se tuvo en cuenta la extracción de materias primas de los activadores alcalinos debido a que varía el valor dependiendo del lugar de extracción, distancias y maquinaria utilizada.

Los resultados obtenidos indican que las tabletas prefabricadas de ceniza volante tienen una huella de carbono menor con respecto a las tabletas prefabricadas de cemento Portland como se puede evidenciar en la Fig. 8. En el alcance 1 a pesar de que los procesos son muy similares las tabletas prefabricadas de ceniza volante obtienen un valor más alto de CO₂ eq por la necesidad de utilizar el horno para curar las tabletas prefabricadas. Aunque en el presente estudio se realizó curado a temperatura ambiente en diferentes tiempos no se obtuvieron resistencias.

Según la Figura 16 las emisiones del alcance 2 de las tabletas prefabricadas de ceniza volante activada alcalinamente son notablemente más bajas que las fabricadas en cemento Portland. Esto se debe a que la materia prima (ceniza volante) es un residuo

aprovechado de la producción de energía. En consecuencia, al igual que las emisiones de CO₂ de la termoeléctrica no se toman en cuenta por que el objetivo de la termoeléctrica es producir energía y no ceniza volante. Por el contrario en la producción de cemento Portland se generan emisiones por combustión y consumo energético principalmente en los procesos de molienda, precalentamiento, calcinación y enfriamiento, no obstante estas emisiones pueden ser reducidas implementando tecnología con eficiencia energética. Por tanto, se comprueba que la incorporación de ceniza volante en la industria de prefabricados es viable ambientalmente en términos de huella de carbón generando una disminución en emisiones totales de CO₂ del 55% en comparación con las tabletas prefabricadas de cemento Portland.

Tabla 15. Energía y emisiones de CO₂ para tabletas prefabricadas de mortero de cemento Portland

	ENERGÍA (WH/KG)	CANTIDAD DE COMBUSTIBLE (KG)	TIPO DE COMBUSTIBLE	EMISIÓN (KG CO ₂ -EQ)
ALCANCE 2				
EXTRACCIÓN DE MATERIAS PRIMAS		0,13	Diésel	0,40
TRITURACIÓN DE MATERIA PRIMA	0,93			0,35
PREHOMOGENIZACIÓN	1,50			0,56
MOLIENDA DE MATERIA PRIMA	28,60			10,70
HOMOGENIZACIÓN (MEZCLA EN SECO)	0,95			0,36

PRECALENTAMIENTO, CALCINACIÓN Y ENFRIAMIENTO	100	98	Coque	324,05
MOLIENDA DEL CEMENTO	39,70			14,85
ENVASE Y EMBARQUE DEL PRODUCTO	15			5,61
			Subtotal	356,88

	ENERGÍA (WH/KG)	CANTIDAD DE COMBUSTIBLE (KG)	TIPO DE COMBUSTIBLE	EMISIÓN (KG CO ₂ -EQ)
ALCANCE 2				
TRANSPORTE DE INSUMOS DEL DEPÓSITO A LABORATORIOS		0,36	Gasolina	1,05
MEZCLA DE CEMENTO, AGUA Y AGREGADOS	2,55			0,95
MOLDEADO Y VIBRO- COMPRIMIDO DE TABLETA	1,39			0,52
			Subtotal	2,52
			Total	360,40

Tabla 16. Energía y emisiones de CO₂ para tabletas prefabricadas de mortero de ceniza volante activada alcalinamente.

		ENERGÍA (WH/KG)	CANTIDAD DE COMBUSTIBLE (KG)	TIPO DE COMBUSTIBLE	DE EMISIÓN (KG CO ₂ -EQ)
ALCANCE 2					
FUNDICIÓN	DE	30,75		Diésel	97,50
ARENA DE SÍLICE Y CARBONATO DE SODIO					
ELECTROLISIS	DE	75			28,05
SALMUERA					
ALCANCE 1					
TRANSPORTE	DE	2,31		Gasolina	6,79
CENIZA VOLANTE A LABORATORIOS					
MEZCLA	DE	2,55			0,95
CEMENTO, AGUA Y ARENA					
MOLDEADO Y VIBRO-		1,39			0,52
COMPRIMIDO	DE				
TABLETA					
CURADO	TABLETA	76,80			28,72
(80°C)					
Total					162,53

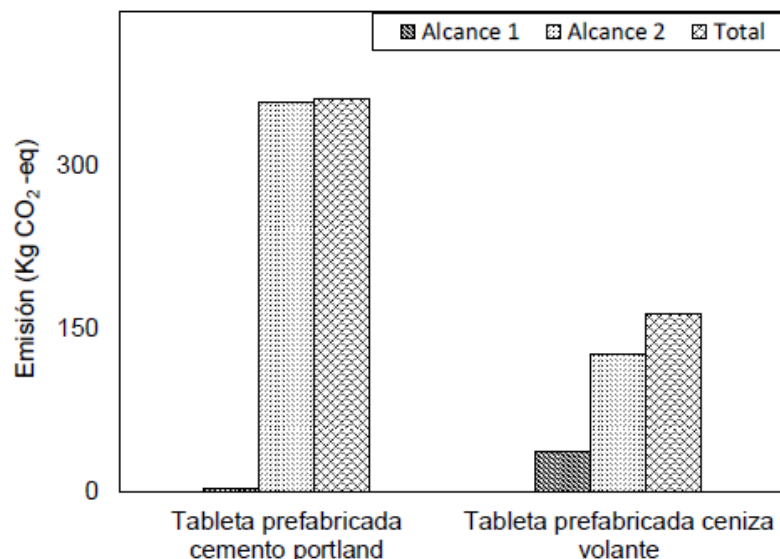


Figura 26. Cuantificación total de emisiones de CO₂

De acuerdo a los resultados se extraen las siguientes conclusiones principales: 1) este estudio demostró que el uso de ceniza volante generada por la combustión de carbón colombiano es apta para ser activada alcalinamente y obtener resistencias a la compresión y flexión similares a las del cemento Portland en tabletas prefabricadas; 2) los resultados mecánicos indicaron que al igual que los morteros de cemento Portland, las buenas propiedades mecánicas de los morteros de ceniza volante activada alcalinamente están influenciadas por una adecuada dosificación de la mezcla y condiciones de curado, por esta razón la muestra GB6-24h fue la mezcla óptima deseada; 3) la ceniza volante activada alcalinamente es competitiva en la industria de tabletas prefabricadas cuando es curada a temperatura inducida (80°C) porque se obtienen buenas resistencias a la compresión y módulo de rotura a edades cortas (1 día); 4) el cálculo de la huella de carbono demostró que el uso de ceniza volante activada alcalinamente en tabletas prefabricadas reduce el 55% de emisiones de CO₂ eq en comparación con el cemento Portland.

7.13 Perspectivas

El nivel de uso de las Cenizas Volantes estará regido por factores como la disponibilidad y los efectos generados sobre el cemento.

Los niveles de aplicación estarán regidos por las normas locales o por los requerimientos específicos de un proyecto de construcción. Aunque, cabe aclarar, que en México se permite agregar alrededor de un 5% de cenizas volantes como constituyente. Sin embargo, remplazando este 5% del cemento por cenizas volantes, se estaría hablando de una reducción de 1.4 millones de toneladas de CO₂ liberadas al medio ambiente tan solo de los datos que CEMEX publicó en su página web como la producción en el 2007, y siendo el valor de la tonelada una variable de entre \$5 a 15 dls, según la actividad industrial, país, entre otros factores que se toman en cuenta por el Banco Mundial.

8. CONCLUSIONES

- Usando las cenizas volantes simplemente como un sustituto del cemento Portland no se alcanzan, en general, los beneficios potenciales de las mismas; se requiere un nuevo método de dosificación.
 - La adición de cenizas volantes al hormigón flexibiliza el proceso de dosificación, permitiendo que para la mayoría de las especificaciones aparezca un margen de posibles mezclas potencialmente utilizables.
 - Existe una relación entre la contribución de las Cenizas Volantes a la resistencia a compresión y la relación agua/conglomerante similar a la introducida por Abrams en 1912 para la relación agua/cemento. La contribución de las Cenizas Volantes es más
-

sensible a la relación agua/conglomerante que la contribución del cemento, y por encima de un cierto valor de dicha relación, la contribución inicial es nula.

- Es importante mantener un alto grado de control en las operaciones de fabricación, colocación y posterior curado, para evitar problemas tanto en construcción como en servicio.
- La incorporación de las Cenizas Volantes además de extender la capacidad de producción de materiales con mejores propiedades que el cemento Portland tradicional, también reducen su costo; coadyuvando la reducción de emisión de contaminantes y requerimientos energéticos; los cuales reducen la acumulación de este material en tiraderos industriales o rellenos sanitarios, etc.
- Para fines prácticos, podemos estimar la reducción de Gases de Efecto Invernadero por m³ de Hormigón preparado como sigue: 250-325kg de cemento empleado según el ambiente de construcción en el que se empleara el Hormigón producto, como se ve en la Tabla 14; y debido a que en México solo se deja sustituir un 5% de cemento por Cenizas Volantes, tenemos un empleo neto de entre 237.5-308.75kg de cemento, con lo cual tenemos una disminución de 171-222.3 kg de CO₂, por m³ de Hormigón que según sea el caso.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con estudios acerca del carbón que se utiliza en las termoeléctricas del país, condiciones de operación de las centrales térmicas, y el destino final de las cenizas volantes y los demás productos de la combustión del carbón, ya que por medio de estos estudios o seguimientos es posible plantear en términos monetarios la viabilidad de un proyecto civil de gran escala, empleando las cenizas volantes como

constituyente e innovación tecnológica, a favor de la sustentabilidad y como medida para la reducción de emisiones de gases de invernadero.

REFERENCIAS

Pamela L. Spath, Margaret K. Mann, Dawn R. Kerr, Life cycle assessment of Coal-fired power production, June 1999, NREL/TP-570-25119, National Renewable Energy Laboratory.

Life cycle evaluation of Coal Combustion Residues, DOE workshop, March 19, 2002 Pittsburgh, PA. S. Thorneloe EPA/Office of Research & Development.

Guido W. Sonnemann, Ph.D. Thesis, Environmental damage estimations in industrial process chains, Departament d'enginyeria Quimica Universitat Rovira i Virgili, January 2002.

Tesis doctoral, Dr. Santiago Gasso Domingo, Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis del ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales, UPC, Noviembre 2006.

Charles E. Baukal, Jr. John Zink Company, Combustion pollution and control, LLC, Tulsa, Oklahoma, USA, Marcel Dekker, Inc. New York-Basel 2004.

Prevencion y control integrados de la contaminación (IPPC), resumen document de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en el ámbito de las grandes instalaciones de combustión, Comisión Europea, Dirección general centro común de investigación, 2005.

Md Sazzad Bin-Shafique, Craig H. Benson, and Tuncer B. Edil, Leaching of heavy metals from fly ash stabilized soils used in highway pavements, Combustion Byproducts Recycling Consortium, West Virginia University, 2003.

Tarun R. Naik and Rudolph N. Kraus, Development and demonstration of high carbon CCPs and FGD by-products in permeable roadway base construction, Center for By-Products Utilization, CBU-2002-33, 2002.

Haifang Wen, PhD, Robert Patton, Project Manager, High volume use of high carbon fly ash for highway construction, PE Department of Civil & Environmental Engineering, National Energy Technology Laboratory Department of Energy, EPA-DOE, 2008.

Dean M. Golden Sr. Project Manager Electric Power Research Institute, Fly ash for highway construction and site development, Palo Alto, California, USA, Coal Combustion Products Partnership, 2003.

Recycled Materials in European Highway Environments, Uses, Technologies, and policies. U.S. Department of transportation, 2000.

Tarunjit S. Butalia, Ph.D., Rehabilitating Asphalt Highways: coal fly ash used on ohio full depth reclamation projects, P.E., Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, Coal Combustion Products Partnership, 2007.

Dave Goss, Products in Highway construction, Arkansas Department of Transportation little rock, American Coal Ash Association, 2007.

Anil Misra, Ph.D., Crushed aggregates from class C fly ash, Combustion Byproducts Recycling Consortium, Department of Civil Engineering University of Missouri, 2005.

Technical Datasheet, sustainability using fly ash in concrete, United Kingdom quality ash association, UKQAA-208, 2003.

Using coal ash in highway construction: A guide to benefits and impacts, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), EPA-530-K-05-002, 2005.

Keith Bargaheiser, Tarunkit S. Butalia, Prevention of Corrosion in Concrete Using Fly Ash Concrete Mixes, The Ohio State University, USA, 2004.

Ms.Karlene Fine, Mr. Clifford Porter, Use of Bottom Ash and Fly Ash in rammed-Earth construction, Energy & Environmental Research Center, University of North Dakota, 2000.

William E. Wolfe, Tarunkit S. Butalia, Harold Walker, William Mitsch, Re-use of clean coal technology by-products in the construction of low permeability liners, CBRC Project# ECE24, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, 2005.

Jerzy Sobczak, Robert Purgert, Commercialization demonstration for production foundry molds made from CCB's for high volume automotive applications, DOE 2005.

Rene Van Den Bos, Aardelite technology, turning a residue into a building material, Coal Combustion Products Partnership, 2008.

Cold weather concrete mix design for the beneficial use of coal fly ash as a supplementary cementitious material, Coal Combustion Products Partnership, 2008.

Takeshi Yamamoto, New applications for fly ash concrete, Civil engineering research laboratory, Nuclear fuel cycle backend research center, CRIEPI 426, 2006.

Anne Weir, The benefits of using fly ash in concrete, Association of Canadian industries recycling coal ash, 2003.

Lopez Villegas M T, Tzintzum Cervantes M G, Iniestra Gomez R, Garibay Bravo V, Zuk M, Rojas Bracho L, Fernandez Bremautz A, Evaluating the impacts of power plant emissions in Mexico, Direccion de Investigacion sobre calidad del aire, instituto nacional de ecologia, 2003.

OLADE-SENER, Jose Miguel Gonzales Santalo, Tecnologías limpias para el aprovechamiento de residuales de petróleo, taller de tecnologías limpias, IIE, 2005.

Carl O. Bauer, Coal combustion products: challenges and opportunities, National Energy technology Laboratory, 2003.

Clean Coal Technology Roadmap, CURC/EPRI/DOE Consensus Roadmap, Department of Energy, the Electric Power Research Institute, and the Coal Utilization Research Council, 2004.

L.K. A. Sear, The use of fly ash for enhancing durability and sustainability, United Kingdom Quality ash association, 2007.

Samudra Vijay, Luisa T. Molina y Mario J. Molina, Estimating air pollution emissions from fossil fuel use in the electricity sector in Mexico, MIT, 2004.

Combustión de mezclas de carbones en la termo-generación de electricidad, CONICYT, 1998.

Miriam Zuk, Veronica Garibay, Rodolfo Iniestra, Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de Mexico, SEMARNAT, INE, 2006.

J.M. Gonzales Santalo, Use of primary fuels for electricity generation in Mexico, CIE-IETS Seminar, 2004.

Eden Prairie, The value of coal combustion products: an economic assessment of CCP utilization for the US economy, American Coal Council, 2005.

Michael McDonald, Beneficial use of coal combustion products continues to grow, American Coal Ash Association, 2006.

Janet Gellici, CCPS: a valuable U.S. Economic resource, American coal council, 2008.

David J. Hassett, Qualifying CCBs for agricultural land application, Energy & Environmental Research Center, 2007.

Mick O'Neil, Power Plant Combustion Byproducts for improved crop productivity of agricultural soils, U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory, The Combustion Byproducts Recycling Consortium, 2006.

Agricultural Uses of Coal Combustion Byproducts, R. F. Korcak, 1998.

M. Ghosh, S. P. Singh, A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts, Biomass and waste management laboratory, school of energy and environmental studies, faculty of engineering sciences, 2005.

Introduction to phytoremediation, national risk management research laboratory office of research and development, U.S. Environmental protection Agency, 2000.

David T. Tsao, Overview of phytotechnologies, Group Environmental Management, 2006.

Ray R. Hichman, M. Cristina Negri, Phytoremediation: using green plants to clean up contaminated soil, groundwater, and wastewater, Edward G. Gatliff, 1999.

Neil Willey, Phytoremediation, Methods and Reviews, Humana Press, 2007.

C.M. Frick, R.E. Farrell and J.J. Germida, Assessment of phytoremediation as an in-situ technique for cleaning oil-contaminated sites, Department of soil science, University of Saskatchewan, 1999.

Decision tree, phytoremediation, Interstate technology and regulatory Cooperation work group phytoremediation work team, 1999.

Martina mackova, David N. Dowling and Tomas Macek, Phytoremediation and rhizoremediation, theoretical background, Springer, 2006.

I.D. Pulford and N.M. Dickinson, Phytoremediation Technologies Using Trees, 2005.

Beatriz Cárdenas Gonzáles, Sergio Revah Moiseev, Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de Fuentes fijas, Instituto Nacional de Ecología, 2003.

F. Sanchez, R. Keeney, D. Kosson, Characterization of Mercury-Enriched Coal Combustion Residues from Electric Utilities using enhanced sorbents for Mercury control, U.S. Environmental Protection Agency, 2006.

Rodolfo Corona Esquivel, Enrique Martinez-Hernández, Jordi tritlla, Principales yacimientos de carbón mineral en México, UNAM, 2008.

Sergio Balbotin C., El incremento en la generacion de centrales eléctricas a carbón en Chile, economía y negocios, el mercurio, 2007.

Assessment of the leaching risk to the environment from the use of pulverised fuel ash (PFA),United Kingdom Quality Ash Association, 2003.

Thomas J. Feeley, James Murpy, Lynn A. Brickett, A review of DOE/NETL's Coal Utilization By-products Environmental Characterization Research, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 2004.

John Abbott, Peter Coleman, Environmental and Health Risk Associated with the use of processed incinerator bottom ash in Road construction, BREWEB, 2003.

Lindon K.A. Sear, The environmental impacts of using fly ash the UK producers' perspective, United Kingdom Quality Ash Association, Power Technology Ltd., 2003.

Tania Volke Sepulveda, Juan A. Velasco Trejo y David A. de la Rosa Pérez, Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación, SEMARNAT-INE, 2005.

Tania Volke Sepulveda y Juan Antonio Velasco Trejo, Tecnologías de remediación para suelos contaminados, INE-SEMARNAT, 2002.

Managing Coal Combustion Residues in Mines, Committee on mine placement of coal combustion wastes Board on Earth Sciences and Resources Division on Earth and life studies, National Research Council of the National Academies, 2006.

Yoginder P. Chungh, Jinrong Ma, Development and Demonstration of Coal combustion Byproducts-Filled composite Materials for Utility pole fabrication, Mining and Mineral Resources Engineering, Combustion Byproducts Recycling Consortium, 2006.

William E. Wolfe, Tarunjit S. Butalia, Re-Use of clean coal technology By-Products in the construction of low permeability liners, The Ohio Coal Development Office, 2000.

Lindon K.A. Sear, Pulverised Fuel Ash and Preventing the Thaumassite Form of Sulfate Attack, United Kingdom Quality Ash Association, 2006.

Eduard K. Levy, Ammonia removal from fly ash in a bubbling fluidized bed, Energy Research Center-Lehigh University, 2001.

David C. Goss, Coal Combustion Products (CCPs) opportunities for beneficial use, American Coal Ash Association (ACAA), 2004.

David Goss, Coal Combustion Products (CCP) Basics, American Coal Ash Association, 2007

Wasted and Materials-flow Benchmark Sector Report: Beneficial Use of Secondary Materials-Coal Combustion Products, U.S. Environmental Protection Agency, 2008.

Irena Twardowska and Sebastian Stefaniak, Coal and Coal Combustion products: prospects for future and environmental Issues, Polish Academy of science, institute of environmental engineering, 2006.

D. Ian Barnes, Lindon K.A. Sear, Ash Utilization from Coal-Based Power Plants, United Kingdom Quality Ash Association, 2006.

Rustu S.Kalyoncu, Coal Combustion Products, American Coal Ash Association, 2001.

Rustu S. Kalyoncu, Coal Combustion Products-Production and uses, U.S. Geological Survey, 2003.

Lindon K.A. Sear, Recycling Power Station By-products a long history of use?, Sustainable Waste Management Conference, 2005.

Novem, Iwaco B.V., Sustainable solutions for total coal fly ash utilization, with emphasis on large scale options, International Clean Coal Technology Co-operation (ICCT), 1999.

Natalia Moreno i Palmerola, Valoración de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa. -Aplicaciones ambientales-, Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Universitat politécnica de Catalunya, 2002.

Reported by ACI Committee 232, Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete, ACI 232.1R-00, 2000.

Reported by ACI Committee 232, Use of Fly Ash in Concrete, ACI 232.2R-03, 2003.

Reported by ACI Committee, Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash, ACI 211.4R-93, 1993 (Reapproved 1998).

L.K. Crouch, Ryan Hewitt, Ben Byard, High Volumen Fly Ash Concrete, World of Coal Ash (WOCA), 2007.

IERE E-8722, Research and Development of artificial light-weight aggregate by utilization of fly ash, 1988.

IERE R-8414, Development of water barrier materials using coal ash, 1984.

Bruce G. Miller, Coal energy systems, Academic Press Sustainable World Series, Elsevier Academic Press, 2005.

N. A. Dogan, M. H. Ozkil, Optimizing Mixing Parameters in fly ash concrete with respect to compressive strength, Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, 2005.

Thomas J. Feeley III, Coal Combustion Products- Challenges to increased utilization, EUCI's Coal Combustion Products optimization, National Energy Technology Laboratory (NETL), 2005.

High Volume Fly Ash Concrete, Canadian International Development Agency (CIDA), 2002.

M. Roderick Jones, Lindon K. A. Sear, Michael J. McCarthy and Ravindra K. Dhir, Changes in coal fired power station fly ash: recent experiences and use in concrete, Technology Unit, Division of Civil Engineering, University of Dundee, 2006.

P. K. Mehta, Coal fly ash- The most powerful tool for sustainability of the concrete industry, Civil and Environmental Engineering, University of California, 2008.

P. Kumar Mehta, High-Performance, High-Volume fly ash concrete for sustainable development, University of California, 2004.

K. A. Sear, Fly ash standards, market strategy and UK practice, Technical Officer for the United Kingdom Quality Ash Association (UKQAA), 2001.

Ann G. Kim, Physical and Chemical characteristics of CCB, U.S. Department of Energy, 2003.

C.W. Bailey, G. W. Bryan and T. F. Wall, Ash deposits in a coal-fired station related to experimentally measured ash character, Department of Chemical Engineering and CRC for Black Coal Utilization, 1999.

Isabel Suarez-Ruiz, John C. Crelling, Applied Coal Petrology- The role of petrology in coal utilization, 2008.

James R. Pfaffling, Edward N. Ziegler, Encyclopedia of Environmental Science and Engineering; 5th Edition, CRC Taylor & Francis, 2006.

William Aljoe, National Synthesis report on regulations, Standards, and Practices related to the use of Coal Combustion Products, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory (NETL), 2007.

L. K. Sear, UK Practice- A review of fly ashes for use in concrete, United Quality Ash Association, 2001.

Camoses, B. Aguiar, S. Jalali, Durability of low cost high performance fly ash concrete, Department of Civil Engineering, University of Minho, 2005.

Karthikeyan H. Obla, Sushant Upadhyaya, Dimitrios Goulias, Anton K. Schindler, and Nicholas J. Carino, New technology-based approach to advance higher volume fly ash concrete with acceptable performance, DOE, 2008.

Javed I. Bhatti, John Gajda, and F. M. Miller, Comercial demonstration of high-carbon fly ash technology in cement manufacturing, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2003.

Rafael Fernández Sánchez, Desarrollo y contaminación atmosférica- Protocolo de Kyoto y sus repercusiones: Sectores industriales ante el reto medioambiental, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Oficemen, 2006.

Balance Nacional de Energía 2006, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, SENER, 2007.

Prospectiva del Sector Eléctrico 2007-2016, Secretaría de Energía, 2007.

European Commission, Integrated pollution prevention and control, Large Combustion Plants, 2006.

F. El-Mahallawy, S. El-Dinhabik, Fundamentals and technology of combustion, ELSEVIER, 2002.

R.P. Gupta, T.F. Wall, and L. Baxter, Impact of mineral impurities in solid fuel combustion, Kluwer Academic Publishers, 2002.

L. K. A. Sear, Pfa and fly ash as an addition in concrete european standards, United Kingdom Quality Ash Association, 2003.

Dr. Lindon K. A. Sear, Should you be using more PFA?, Dundee University conference- Global construction- Ultimate concrete opportunities, 2005.

Anne Weir, Roller Compacted Concrete (RCC), Association of canadian industries recycling coal ash, CIRCA, 2002.

L. K. A. Sear, UK practice –A review of fly ashes for use in concrete, United Kingdom Quality Ash Association, 2001.

Karthikegan H. Obla, Sushant Upadhyaya, Dimitrios Goulias, Anton K. Schindler, and Nicholas J. Carino, New Technology-Based Approach to advance higher volume fly ash concrete with acceptable performance, DOE, 2008.

Lindon K. A. Sear, European legislation in the UK –a threat or an opportunity?, United Kingdom Quality Ash Association, 2005.

Tera D. Buckley, Debra F. Pflughoeft-Hassett, John Sager, John Ward, Review of state regulations, standards, and practices, related to the use of coal combustion products: Texas review case study, University of North Dakota, Energy & Environmental Research Center, 2005.

John Sager, William Aljoe, Review of Florida regulations, standards, and practices related to the use of coal combustion products, University of North Dakota, Energy & Environmental Research Center, 2006.

Tera D. Buckley, Debra F. Pflughoeft-Hassett, Review of Pennsylvania regulations, standards, and practices related to the use of coal combustion products, University of North Dakota, Energy & Environmental Research Center, 2007.

Marquita K. Hill, Understanding environmental pollution, Cambridge University Press, 2004.

S. Koca & R. Ucar, H. Koca, Zero –waste recycling of coal combustion residues, Osmangazi & Anadolo University, 2007.

Ash at work, applications, science and sustainability of coal ash, American Coal Ash Association, ISSUE 2, 2008.

Ash at work, applications, science and sustainability of coal ash, American Coal Ash Association, Winter/Spring, 2005.

Ash at work, applications, science and sustainability of coal ash, American Coal Ash Association, ISSUE I, 2007.

Ash at work, applications, science and sustainability of coal ash, American Coal Ash Association, Summer/Fall, 2005.

Ash at work, applications, science and sustainability of coal ash, American Coal Ash Association, ISSUE I, 2008.

Ash at work, applications, science and sustainability of coal ash, American Coal Ash Association, ISSUE 2, 2007.

Ash at work, applications, science and sustainability of coal ash, American Coal Ash Association, Summer, 2006.

Ash at work, applications, science and sustainability of coal ash, American Coal Ash Association, ISSUE I, 2006.

J. H. Potgieter, S. S. Potgieter, R. A. Kruger, and Kruger, Development of a robust quality control procedure to measure particle size distributions in fly ash, international ash utilization symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2003.

Javed I. Bhatti, John Gajda, and F. M. Miller, Commercial demonstration of high-carbon fly ash technology in cement manufacturing, International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2003.

Valeriy S. Drozhzhin, Lev. D. Danilin, Mikhail Ya. Shpirt, Mikhail D. Kuvayev, Grigory A. Potemkin, Igor V. Pikulin, Formation Processes of hollow microspheres in the fly ash from electric power stations, Russian Federal Nuclear Center, Russian Research Institute of Experimental Physics, 2005.

Doug Cross, Jerry Stephens, and Jason Vollmer, Structural Applications of 100 percent fly ash concrete, Montana State University, Department of Civil Engineering, 2006.

John M. Fox, Changes in fly ash with thermal treatment, Degussa Admixtures, 2005.

Masayoshi Kimoto, Hiromitsu Matsuda, Hiromi Shirai, Influence of Coal properties and combustion conditions on specific surface area of fly ash, Central Research Institute of Electric Power Industry, Energy Engineering Research Laboratory, 2005.

Akira Ohnaka, Takashi Hongo, Mikio Ohta, and Yoshitsugu Izuma, Research and development of coal ash granulated material for civil engineering applications, Ube Industries & Clean Japan Center, 2005.

DOE/EIA, Annual Energy Outlook 2008, With projections to 2030, 2008.

Kenneth D. Hansen, Ernest Shrader, Roller-Compacted mass concrete, Reported by ACI committee 207, 1999.

Gary R. Mass, Guide for selecting portions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash, Reported by ACI committee 211, 1998.

Marshall L. Brown, Joseph J. Hiznay, Chemical Asmixtures for concrete, Reported by ACI committee 212, 1999.

Wayne S. Adaska, State of the art report on soil cement, Reported by ACI committee 230, 1997.

K. Ishii for JSPS and ISIJ, Advanced pulverized coal injection technology and blast furnance operation, Hokkaido Univeristy, Research group of pulverized coal combustion in blast furnance, Japan society for the promotion of science (JSPS) and Technical Division of High-Temperature Processes, ISIJ, PERGAMON, 2000.

P. Novak, A. Moffat, C. Nalluri and R. Narayanan, Hydraulic structures, Spon press, Taylor & Francis group, 2004.

Bruce G. Miller, Coal energy systems, ELSEVIER Academic Press, 2005.

Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese, Design and control of concrete mixtures, Portland Cement Association, 2003.

James G. Speight, Handbook of coal analysis, Wiley-Inter-Science, 2005.

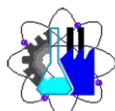
Cipriano A. Londoño N., Presas de concreto compactado con rodillo, Instituto colombiano de productores de cemento, 1992.

W. F. Chen, J. Y. Richard Liew, The civil engineering Handbook, CRC press, 2002.

An interdisciplinary MIT study, The future of coal, Massachusetts Institute of Technology, 2007.

World Coal Institute, The coal resource, A comprehensive overview of coal, 2005.

D. A. Kosmack, Landfill cost model for disposal of coal combustion products, User's Manual, Consol Energy, 2002.



**FORMA T4
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR**

Cuernavaca, Mor., a 8 de febrero de 2024

**DRA. FERNANDA MORALES GUZMÁN
DRA. YOLANDA FLORES VELÁZQUEZ
DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
DRA. ANA KAREN GÁLVEZ LARIOS
MTRA. DANIELA CORDOVA OCAMPO
Docentes de la FCQel
P R E S E N T E**

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de **TESIS** titulada:

Uso sustentable de las cenizas volantes para la fabricación de hormigón y reducción de emisiones de CO₂.

Que presenta la C. JACQUELINE ALONDRA XICOTENCATL VALLE

Dirigido por: DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ

Del programa educativo de: INGENIERÍA QUÍMICA de la FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA. Para obtener el grado académico de: LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA.

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

Se anexa firma electrónica
M. en E. ANGÉLICA GALINDO FLORES
Directora interina de la FCQel

D I C T A M E N

M. en E. ANGÉLICA GALINDO FLORES
Directora interina de la FCQel
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE
APROBATORIO	DRA. FERNANDA MORALES GUZMÁN
APROBATORIO	DRA. YOLANDA FLORES VELÁZQUEZ
APROBATORIO	DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
APROBATORIO	DRA. ANA KAREN GÁLVEZ LARIOS
APROBATORIO	MTRA. DANIELA CORDOVA OCAMPO

Se anexan firmas electrónicas de cada revisor, en las cuáles se incluye la fecha y hora que se ha emitido el voto aprobatorio.

AGF/fmg





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2024-02-09 12:32:06 | Firmante

sND4nxITyctqNnUmV0Ry1br1T9I5CtQhA2oH8Dz51MV0ZQP5cwVCR0a7OPm6VWd8oXl4/Py0DqNVg3Bvsth+cXx5weBY5ztCqURDOnXt0Xgg3kEp2FlrSdk9FZLyO42KTKippaF
FOfCoNDozt+fyzzAZP3znSmCZKJnl5obQ/I3JHKVKRsaWut2qh7dF8tKN1d4GFZHDzKhqccj2nkSr3sLSZd7wLkBe4DWXFJBBKZJDurSjhE3GFE4HXmZbGc2hNoQ56ZwSkeQj
6t0KEx0lh+PlcjURAHylnJEBqQUSQaySJNAA/374O8kL83Cf1vE3FHm4MIIAhWwtFHzBF1xig==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[38RcK0x2Y](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/swXobklaRbycjwjtz28m3vuGkWOpXlcl>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FERNANDA MORALES GUZMAN | Fecha:2024-02-13 11:50:49 | Firmante

JRA4YKs5eKQARkmpf0omntkrftPEQoCakn4hWSq1i2MaMw5GzNGXrfUOoP1reX+/h1V4VNw43+y1MjrdWkEhVrZRh00ltCb+xAOHUPXqA+nm41xCAYzhOZg2S+3TWpPGcxR2NRCcmu1fc6f7TVZ4sNJFCHt2JmpYLN1jH4AfaBiGiKEvJLgZSWC7j/D4Tgr7xksdo2VwY6eic0smjX8JmN1JO6yfcBIW6U0J8hIO4dfz5ZIX/A6EqESEo0yJzF3Xqx8HlkD9v4jmeSgwZ8T6rfYgrCMt3+0MCUF3UJevVNfiwkoih0Ozo5tllnL3tQwPw0DLOqOe6x3LSLb3TGjQ==

ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2024-02-21 08:00:57 | Firmante

BcH9CYG/clbcvPDoXF1yKTuHus4BIHGALkTXvSeZ46njXwukzchVJ2917qe0fqAXUi4Izrwl+K3pfrgILpu34ubwZ2aWK4qVjK5P5xPvxYkflOI6GwoZH6GvS/B9Q2p2dsbytA8kTBijzcnv5H7w//iB80UdGeTX/XNhUHPyoGPuURwVaGQmiWAXTGDtEtSacar5riXBkFnwYjA0pql2vfaceM9rUaiQpuNb6OUQ78jcuG7Bv5wq151NjNZAsyooZ82t5TloN8F5lvYVHe3iD7K1oLSy55m9ILNXAPu9HGnLhMNHwJvbvvwQla66xiMM90fSolvCdu4v1vfo5ka3Q==

ANA KAREN GALVEZ LARIOS | Fecha:2024-02-22 13:16:04 | Firmante

Mz8VdAfx+B7tFNQ35E21FEjuqT3hVTb1pZkqrwoX4gZNoQzZcSd3wd7fYt/lkOHqgypTE9mC9AyVp0vCz7KMqs0m0dmjXL1iFpC7I7CMTL6vESYS1g5wL9fgHePXHh9TnfQ511F8wF6X56LcGS7eZAD76WD6lgr3DNgia1P/dsJSGYhlgSaoZiuqMjpWjWzwnwpuOiYa7uvNGJFeZL0lrx0EJK6noWMTQt+dGvleovVDXfQGI+1IRGv0nydv6SAINRrtIFaN9g54xUCsR/uFcm1Khemx1Y+IDn0JQcpj3UVaPHEXK7iPJZhfB2KKsASZdEZq5xd6ApFXo8Q1fQQ==

YOLANDA FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2024-02-25 19:58:40 | Firmante

h5FjhbKvwdL1N+KcaNKG3KXYnjAtk8zxGvV6/ZvBidKTN1/VXq53AxK2ZEo1p7iA4zy4XT42NDpOPGkRl+axQNK/B4c6amZ3R127THGzwxCaa2xA4yIPSKSLQhXebcp3rdsce aOiSwSRusRALmvT+SpMQEwY0QWrpJoVR5NwMkgQGUwJdDkYoITMBW/SyQ4poluVZ9t+V073ZZ38uMEjRPMc4Pd1Lqo9s4SQc1ctZ4YDnZCMGsbfgFyASS13DoAWbYfEe k7LkThi7ssv3ILH2Y3BVnN3Suw/3vj0NX7hz/Hqll9jV2mNww4Ywx22esnEy8xERO1Tt+eePb73a1GA==

DANIELA CORDOVA OCAMPO | Fecha:2024-03-02 13:10:21 | Firmante

bL802NIXY7GUPoU5Ci3JzevSQ8JPPLRgm0d7sR9pHNP6meY/DRA41ApXKJvtbjH8LiBr/ul8Z9VHhFN9jqb74MRFFyBpKuPIJ4Jh5p9PxZ1id9q/xZUIvpUGJQE125E+MR2le8UwyJzkscA+VQH5OZB+i2GAmS/56G0z/L1vPiT29Kf5x2ihyzpbH0TnlHnsl/UaPBzCeU5FFcC8cFzv9YQMAFynufy6SLmMng5nC8FAbDLGQlgo8Vyk6RQtGOQk3C/3sss7llju7UCs0w5YW5fk0hfo68sGN3i+LZxsmZWozSbXRhrJvN60XQ/TTc2Q9hxrZvAKUF189JZQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



KxM0fEaiZ

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/PgP5kFiWh6efmOFFVabWtkpimBg3X5Rg>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029