



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES.

“ZARAGOZA”

INGENIERIA QUIMICA.

**IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS PARA LA ADSORCIÓN DE CO₂ DE
LOS GASES DE ESCAPE DE LOS AUTOMOTORES A GASOLINA.**

T E S I S.

PARA OBTENER EL TITULO DE.

INGENIERO QUIMICO.

PRESENTA.

ÁNGEL JAVIER DÍAZ DAMIÁN.

DIRECTOR DE TESIS.

DR. ALEJANDRO ROGEL RAMIREZ



MÉXICO DF., 2015.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: I.Q. Francisco Javier Mandujano Ortiz

Vocal: DR. Alejandro de La Cruz Rogel Ramírez

Secretario: QUIM. Martha Ortiz Rojas

1er. Suplente: M. en I. Rafael Sánchez Dirzo

2do. Suplente: I.Q. José Antonio Zamora Plata

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Tutor de tesis.

DR. Alejandro Rogel Ramírez

AGRADECIMIENTOS.

A MI MADRE.

A mi heroína el Sr. (a) Ma. Esther Damián Sánchez; la persona que más admiro y admirare en este mundo ya que ella sola crio a mis hermanos y a mí, realizando esfuerzos que los demás verían como imposibles con tal de brindarnos las armas para poder salir adelante. Por ello no hay forma ni palabras para agradecer su amor, desvelos, consejos y el privarse infinidad de besos de gustos personales todo con el fin de apoyarme sin dudarle ni un segundo para la realización de todas las metas que me he impuesto a lo largo de mi vida. Me enseñó que las cosas fáciles no cuesta realizarlas pero fácil se van, que las cosas difíciles solo pocos las realizan y que las cosas imposibles las realizan las personas que son únicas y extraordinarias.

Me enseñó que no hay que renunciar nunca a los sueños, que cuando estos se vean como imposibles solo se debe tomar un respiro distraerse en algo para después retomar y darme cuenta que no era imposible sino que tan solo requería de más tiempo y esfuerzo, que nunca se debe retroceder en la vida a menos que sea para tomar más impulso para que nada me detenga.

Por todo lo anterior mamá te dedico la presente tesis que lleva por nombre; IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS PARA LA ADSORCIÓN DE CO₂ DE LOS GASES DE ESCAPE LOS AUTOMOTORES A GASOLINA. La cual no solo es un logro académico personal sino que de igual manera es el logro tuyo por todo lo que me diste y me apoyaste a lo largo de mi carrera y de esta tesis por lo cual no me queda más que decirte gracias mamá, siempre te amare y te extrañare y espero que donde te encuentres estés un décimo de orgullosa de mi y de mis logros como yo de los tuyos y sobre todo de que fueras mi mamá. Ya que para mí siempre serás La mejor mamá de todo el mundo. ¡Te quiero mamá!...

AL DR. ALEJANDRO ROGEL RAMIREZ.

Le doy las más sinceras gracias por todo su apoyo como profesor y amigo, sobre todo por su confianza, por brindarme la oportunidad de trabajar con una persona sumamente inteligente capaz de ver proyectos donde otros doctores e ingenieros no, por su gran conocimiento y experiencia que fueron partes fundamentales para la elaboración de esta tesis y de los prototipos propuestos, anteponiendo su valioso tiempo y esfuerzo para la realización de la misma y aun mas importante por ayudarme a crecer como profesionista y como persona.

Prof. (a) MARTHA ORTIZ ROJAS.

Mis más sinceras gracias por su apoyo en la elaboración de esta tesis ya que su confianza y amistad me permitieron la realización de diversas pruebas en el Instituto de Investigación en Materiales perteneciente a la UNAM, ya que gracias a usted que fue pieza fundamental para que se me brindara la oportunidad de trabajar con el DR. Pedro Boch Giral y la técnica Adriana Tejeda encargados del laboratorio de Difracción y fluorescencia de Rayos X. Por lo cual no me queda más que agradecer infinitamente su apoyo.

AGRADECIMIENTOS GENERALES.

A todas las personas como son; Amigos, Profesionistas, Profesores y Familiares que de distintas formas han participado en mi formación como persona y profesionista les agradezco su apoyo, sus consejos y vivencias las cuales recordare siempre y no cambiaría por nada a todos ellos mil gracias.

CONTENIDO.

| | |
|-------------------|----|
| RESUMEN..... | 13 |
| INTRODUCCION..... | 15 |

CAPITULO 1

PANORAMA DEL CO2 EN EL MUNDO

| | |
|--|----|
| 1.-MARCO TEORICO – Problemática del incremento de CO2 en la atmosfera y métodos para eliminación de CO2..... | 18 |
| 1.1. ¡Que es el CO2! Y ¡cómo afecta al planeta!..... | 19 |
| 1.2. EL calentamiento global. | 19 |
| 1.3. Afectaciones y principales fuentes de emisión de CO2 en México. | 20 |
| 1.4. Índice metropolitano de la calidad del aire. | 24 |
| 1.4. 1. Categorías del Índice Metropolitano de Calidad del Aire. | 25 |
| 1.5. Cálculo actual del IMECA..... | 25 |
| 1.6. Equipos para la medición de la calidad del aire. | 27 |
| 1.6.1. Tipos de equipos en una estación de medición de la calidad del aire. | 27 |
| 1.6.2 Analizadores automáticos. | 27 |
| 1.6.3. Analizador de CO (Fotometría Infrarroja, IR). | 28 |
| 1.6.4. Analizador de NOx (Quimiluminiscencia). | 28 |
| 1.6.5. Analizador de SO2 (Fluorescencia pulsante). | 29 |
| 1.6.6. Analizador de O3 (Fotometría UV). | 30 |
| 1.6.7. Monitores de partículas suspendidas. | 31 |
| 1.7 Contribución de la captura y el almacenamiento de CO2. | 31 |
| 1.7.1. Beneficios de la captura y almacenamiento de CO2..... | 35 |
| 1.7.2. Potencial de captura y almacenamiento de CO2..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 1.7.3. Situación de la captura y almacenamiento de CO ₂ .----- | 37 |
| 1.8. Panorama futuro para la captura de CO ₂ y la tecnología de almacenamiento. ----- | 38 |

CAPITULO 2

MÉTODOS DE CAPTACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂).

| | |
|--|----|
| 2. Captura de CO ₂ (Diferentes métodos de secuestro de CO ₂). ----- | 40 |
| 2.1. 1er. Generación: pre-combustión.----- | 40 |
| 2.2. Tecnologías existentes. ----- | 42 |
| 2.2.1. Reformado con vapor de gas natural o hidrocarburos ligeros (SMR). ----- | 42 |
| 2.3. Separación de CO ₂ - Procesos químicos con absorbentes. ----- | 44 |
| 2.4. Separación de CO ₂ - Procesos físicos con absorbentes. ----- | 44 |
| 2.5. Tecnologías emergentes para la separación de CO ₂ . ----- | 44 |
| 2.5.1. Reacción de adsorción mejorada (SER). ----- | 44 |
| 2.5.2. Reformado en micro canales. ----- | 45 |
| 2.6. 1er. Generación: Oxidación. ----- | 45 |
| 2.7. 1er. Generación: Post-combustión. ----- | 48 |
| 2.8. Adsorción química empleando aminas. ----- | 50 |
| 2.9. Tecnologías basadas en óxidos de calcio. ----- | 53 |
| 2.10. Adsorción de CO ₂ (sólido-gas).----- | 53 |
| 2.10.1. Fenómenos de superficie.----- | 53 |
| 2.10.2. Adsorción de gases sobre sólidos.----- | 56 |
| 2.10.3. Adsorción química o quimisorción.----- | 57 |
| 2.11. Isotermas de adsorción. ----- | 58 |
| 2.12. Efecto de la temperatura sobre el equilibrio de adsorción.----- | 60 |
| 2.13. Limitaciones en la isoterma de Langmuir.----- | 62 |

| | |
|---|----|
| 2.14. Velocidad de procesos superficiales. | 63 |
| 2.15. Modelos de carbonatación. | 66 |
| 2.15.1. Modelo de Tuutti. | 67 |
| 2.15.2. Modelo de Bakker. | 68 |
| 2.15.3. Modelo de Parrott. | 69 |
| 2.16. Carbonatación natural y acelerada. | 70 |

CAPITULO 3.

CARACTERIZACION DE LA ESCORIA DE FUNDICION DE ACERO LD o BOF (ZEOLITA).

(Basic Oxigen Furnace slag BOF slag)

| | |
|---|----|
| 3.1. ¿QUÉ ES LA ZEOLITA?..... | 72 |
| 3.2 ¿POR QUÉ SINTETIZAMOS LA ZEOLITA?..... | 73 |
| 3.3 ¿CUALES SON LAS CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE LA ZEOLITA?..... | 74 |
| 3.4 ¿CÓMO SE PUEDE UTILIZAR LA ZEOLITA PARA CONTROLAR LOS CONTAMINANTES DEL AIRE?..... | 75 |
| 3.5 ¿TIENE LA ZEOLITA UN USO FUERA DEL CAMPO DE CONTROL DE CONTAMINANTES DEL AIRE?..... | 77 |
| 3.6. Escoria de Acería. | 79 |
| 3.7. Propiedades. | 80 |
| 3.7.1. Propiedades Físicas aparentes. | 80 |
| 3.7.2. Propiedades Químicas | 80 |
| 3.7.3. Propiedades Mecánicas | 80 |
| 3.8. Procesamiento. | 80 |
| 3.9. Propiedades del material procesado. | 81 |
| 3.9.1. Composición química y mineralógica. | 81 |
| 3.9.2. Inestabilidad volumétrica. | 82 |
| 3.9.3. Propiedades físicas. | 82 |
| 3.10. Aplicaciones de la escoria tipo LD o BOF. | 82 |

| | |
|--|----|
| 3.11. Consideraciones ambientales..... | 83 |
| 3.12. Técnicas de caracterización..... | 85 |
| 3.12.1. Ensayos térmicos..... | 85 |
| 3.12.2. Técnicas espectroscópicas..... | 86 |
| 3.12.3. La fluorescencia de rayos X..... | 88 |
| 3.12.4. Difracción de rayos X..... | 90 |
| 3.13. Procedimiento experimental para el análisis de la escoria tipo LD o BOF..... | 92 |
| 3.14. Caracterización de la escoria aceraría tipo LD o BOF..... | 92 |
| 3.14.1. Caracterización química..... | 93 |
| 3.14.2. Caracterización estructural..... | 96 |

CAPITULO 4

DISEÑO, CONSTRUCCION Y APLICACIÓN DE PROTOTIPOS PARA ADSORCION DE CO2.

| | |
|--|-----|
| 4.1. Componentes de los gases de escape..... | 104 |
| 4.1.1. Descripción de las sustancias que integran los gases de escape..... | 104 |
| 4.2. Componentes del sistema de eliminación de gases de escape del automóvil..... | 106 |
| 4.3. Descripción de la construcción de los prototipos para adsorción de CO2..... | 111 |
| 4.3.1. Diseño del prototipo ADS-1 de tres cámaras para motores a gasolina..... | 111 |
| 4.3.2. Diseño del prototipo ADM-2..... | 117 |
| 4.4. MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE LOS PROTOTIPOS ADS-1 Y ADM-2..... | 118 |
| 4.5. Proceso de elaboración del prototipo ADS-1..... | 120 |
| 4.6. Proceso de construcción del prototipo ADM-2..... | 131 |
| 4.7. Aplicación de los prototipos ADS-1 y ADM-2 al automóvil..... | 134 |
| 4.8. Comportamiento de los prototipos ADS-1 y ADM-2 en el automóvil..... | 136 |
| 4.9. Discusión de resultados..... | 143 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 144 |

| | |
|----------------------|-----|
| Recomendaciones..... | 145 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 146 |

Relación de Figuras.

| | |
|--|-----|
| Figura 1.1 Raking mundial de emisiones de CO2 | 22 |
| Figura 2.1. Proceso de reformado con vapor con captura de CO2..... | 43 |
| Figura 2.2. Diagrama simplificado de una central de oxidación para la captura de CO2 | 47 |
| Figura 2.3. Composición de los gases de oxidación de carbón en comparación con la combustión convencional..... | 48 |
| Figura 2.4. Ciclo de Absorción-Desorción. | 49 |
| Figura 2.5. Esquema de la captura en post-combustión en una Central Térmica..... | 49 |
| Figura 2.6. Layout de proceso de absorción..... | 51 |
| Figura 2.7. Modelo de adsorción de gas-sólido..... | 57 |
| Figura 2.8. Velocidad de adsorción de procesos superficiales..... | 63 |
| Figura 3.1 Muestra de escoria tipo BOF procedente de refinación de acero..... | 73 |
| Figura 3.2 -- Estructura en Y del Cristal de Zeolita - Mostrando Ventanas, Jaulas, y superjaulas..... | 74 |
| Figura 3.3 Concentrador de CO2..... | 76 |
| Figura 3.4. Representación geométrica de la ley de Bragg..... | 91 |
| Figura 3.5 y 3.6 Analizado marca LECO modelo CNHS-932..... | 93 |
| Figura 3.7 Espectrofotómetro Philips PW2404 con cargador automático PW2504..... | 94 |
| Figura 3.8 Difractómetro Philips modelo X PERT PRO..... | 96 |
| Figura. 3.9. Espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Frontier L128-0044..... | 98 |
| Figura 4.1 Composición de los gases de escape..... | 104 |
| Figura 4.2 componentes de la combustión-residuos de la combustión. | 105 |
| Figuras4.3. Esquema de la válvula PCV. | 107 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.4. Ubicación del múltiple de escape.----- | 108 |
| Figura 4.5. Ubicación del sensor de oxígeno antes y después del convertidor catalítico.----- | 108 |
| Figura 4.6. Componentes del convertidor catalítico.----- | 109 |
| Figura 4.7. silenciador acústico.----- | 110 |
| Figura.4.8. Diagrama de dimensiones del prototipo ADS-1 para adsorción de CO2 del sistema de gases de escape del automóvil. ----- | 112 |
| Figura.4.9. Diagrama de dimensiones del prototipo ADM-2 para adsorción de CO2 del medio ambiente. ----- | 117 |
| Figura 4.10. Capas de aleaciones zinc-hierro.----- | 118 |
| Figura 4 .11. Diagrama de dureza de los recubrimientos.----- | 119 |
| Figura 4.12. Proceso de medición de partes del cuerpo del prototipoADS-1.----- | 121 |
| Figura. 4.13. Corte de plancha principal.----- | 121 |
| Figura 4.14. Tapa externa del prototipo ADS-1.----- | 122 |
| Figura 4.15. Barolando plancha principal del prototipo ADS-1.----- | 122 |
| Figura 4.16. Finalización de Barolar plancha principal.----- | 123 |
| Figura 4.17. Prensado de tapas del prototipo ADS-1. ----- | 123 |
| Figura 4.18. Prensado de compartimientos del prototipoADS-1.----- | 124 |
| Figura 4.19. Tapas y compartimientos terminados.----- | 129 |
| Figura 4.20. Cortado tubo interior del prototipo ADS-1.----- | 125 |
| Figura 4.21. Tubo interior terminado de taladrar----- | 126 |
| Figura. 4.22.Ubicación de tapas en el extremo del cilindro.----- | 127 |
| Figura 4.23. Cilindro listo para unión.----- | 127 |
| Figura 4.24. Señalización de compartimientos para luego corta.----- | 128 |
| Figura 4.25. Soldando tubos con compartimiento.----- | 129 |
| Figura 4.26 Tubos y compartimientos unidos.----- | 129 |
| Figura 4.27. Llenado de cámara intermedia con el material adsorbente de CO2----- | 130 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.28.Soldando cilindro principal.----- | 130 |
| Figura 4.29. Prototipo ADS-1 terminado.----- | 131 |
| Figura 4.30. Trazado de patrones en la lámina.----- | 132 |
| Figura 4.31. Corte de lamina.----- | 132 |
| Figura 4.32. Doblado de bastidor para el cuerpo del prototipo ADM-2.----- | 133 |
| Figura. 4.33. Bastidor terminado del prototipo ADM-2.----- | 133 |
| Figura 4.34. Prototipo ADM-2 terminado.----- | 134 |
| Figura 4.35. Diagrama de sistema de escape del automóvil , implementación del prototipo ADS-1.----- | 135 |
| Figura 4.36. Posición y sujeción del prototipo ADS-1 en el automóvil.----- | 135 |
| Figura 4.37. Posición del prototipo ADM-2 en el automóvil (camioneta Jimmy 1996)----- | 136 |

Relación de Tablas.

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.1 Tabla de resumen estimativo de emisiones del periodo 1990-2012.----- | 11 |
| Tabla 1.2. Cálculo de intervalos de IMECAS.----- | 26 |
| Tabla 1.3 Tipo de analizadores de calidad de aire de tipo automáticos.----- | 28 |
| Tabla 1.4. Evaluación de otras cuestiones relacionadas con el uso de depósitos biológicos y geológicos para el almacenamiento de carbono.----- | 35 |
| Tabla3.1Características físicas de la escoria BOF-01, sobre las fracciones 5/10 y 10/20.----- | 82 |
| Tabla 3.2 caracterización química de escoria.----- | 93 |
| Tabla 3.3 Valores correspondientes de análisis de (RFX) de muestra de escoria.----- | 95 |
| Tabla 4.1. Corrosión del zinc aplicado al acero y aleaciones.----- | 119 |
| Tabla 4.2. Datos de fluorescencia de rayos X de muestras extraídas del prototipo ADS-1 del automóvil GMC-Jimmy 1996.----- | 139 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.3. Datos de fluorescencia de rayos X de muestras extraídas del prototipo ADS-1 del automóvil Volvo S40T 2000.----- | 140 |
| Tabla 4.4. Datos de fluorescencia de rayos X de muestras extraídas del prototipo ADM-2 del automóvil GMC-Jimmy 1996.----- | 141 |
| Tabla 4.5 Datos de fluorescencia de rayos X de muestras extraídas del prototipo ADM-2 del automóvil volvo S40T 2000.----- | 142 |

Relación de Gráficas

| | |
|---|-----|
| Grafica 1.1 Contribución de emisiones por categoría.----- | 22 |
| Grafica 1.2 Porcentaje de gases de efecto invernadero de la ciudad de México.----- | 23 |
| Grafica 1.3 Transformación del ozono para obtener el IMECA.----- | 27 |
| Grafica 1.4 Aumento de la concentración deCO2 en función del tiempo.----- | 31 |
| Grafica 2.1. Isotermas experimentales pueden clasificarse en cinco tipos de acuerdo con S. Brunauer.----- | 59 |
| Grafica 2.2. Efecto de la temperatura sobre el equilibrio de adsorción.----- | 61 |
| Grafica 2.3. Limitaciones en la isoterma de Langmuir.----- | 62 |
| Grafica 2.4. Representación de las entalpías de adsorción física.----- | 64 |
| Grafica 2.5. Quimisorción.----- | 64 |
| Grafica 2.6 Entalpia de adsorción.----- | 65 |
| Grafica 2.7. Velocidad de superficie.----- | 66 |
| Grafica 4.1 Comportamiento del prototipo ADS-1 (GMC Jimmy 1996).----- | 139 |
| Grafica 4.2 Comportamiento del prototipo ADS-1 (Volvo S40T 2000).----- | 140 |
| Grafica 4.3 Comportamiento del prototipo ADS-1 (GMC Jimmy 1996).----- | 141 |
| Grafica 4.4 Comportamiento del prototipo ADM-2 (Volvo S40T 2000).----- | 142 |

RESUMEN.

El presente trabajo es una contribución para generar la existencia de tecnología aplicada en el país, referente al tema; disminución de la concentración de los gases de efecto invernadero específicamente en el campo de la captación y eliminación del CO₂ que es expulsado a la atmosfera como un gas de residuo producto de la combustión de los automóviles, de igual manera una disminución del CO₂ presente en el medio ambiente ya que el aumento de la concentración de dicho gas de efecto invernadero deteriora día a día la calidad de vida de los millones de seres vivos que soporta el planeta. Ello la necesidad de desarrollar prototipos que permitan la eliminación parcial del CO₂ que es producido por los millones de automóviles que circulan en la ciudad de México y a una mayor escala por todo tipo de sectores en el mundo entero. Para lograr la captación de esta fracción de CO₂ se utilizara un medio de adsorción, es decir la implementación de un material solido (escoria BOF), que no es sino un material de desperdicio sub producto de la refinación del acero la cual tiene pocos usos posteriores debido a que es un material cuyo costo de regeneración es muy elevado.

Para determinar las cualidades del material (caracterización de la escoria BOF) como base de adsorción para los prototipos; se llevaron a cabo distintas técnicas que permitieron una visualización más completa de la estructura física, composición y cualidades, su capacidad para la eliminación de la fracción de CO₂ contenida en la corriente de los gases de escape del automóvil y la fracción de CO₂ del medio ambiente.

Este trabajo está conformado por cuatro capítulos; en el primer capítulo se recopila toda la información teórica básica para el desarrollo de la metodología aplicada; fundamentos, datos estadísticos, escalas de contaminantes, equipos para el análisis de los gases de efecto invernadero y algunos técnicas para disminuir la concentración de CO₂.

En el segundo capítulo, se detallan las metodologías de captación de dióxido de carbono (CO₂), en su contenido esta la descripción de cada sistema, metodología de análisis técnico (Aspectos teóricos que describen el comportamiento, las bases de operación de cada tecnología así como una perspectiva de su eficiencia) y en donde puede ser implementada dicha técnica de captación.

En el tercer capítulo se detalla la caracterización de la escoria de fundición de acero (BOF), partiendo de los conceptos primarios como el saber que es una zeolita, las características en cuanto a su composición química y físicas y aparentes usos en la industria.

Para la caracterización de la escoria tipo BOF, se llevaron a cabo distintas técnicas de análisis para el material, algunas de estas técnicas son de tipo destructivas y otras de tipo no destructivas; las técnicas de caracterización

empleadas en el material fueron; ensayos térmicos, espectroscopia, fluorescencia de rayos X, Difracción de rayos X, contemplando las ventajas y limitaciones de cada técnica.

Para el cuarto y último capítulo se lleva a cabo el diseño, construcción y aplicación de los dos prototipos denominados ADS-1 Y ADM-2 aplicados a los automóviles. La validación y viabilidad de ambos prototipos es a nivel experimental en donde se contrastan los resultados simulados y experimentales obtenidos de los prototipos montados en el automóvil, realizando así la discusión de resultados.

Finalmente se describen las conclusiones y recomendaciones pertinentes para la implementación de los prototipos expuestos en el presente trabajo.

INTRODUCCION.

El Panel mundial para el Cambio Climático, propone la Captura y Almacenamiento de CO₂ como estrategia clave en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (especialmente el CO₂), esto debido al peligroso aumento de este tipo de emisiones durante las últimas décadas y a sus consecuencias en el cambio climático. En particular dado que una parte importante del CO₂ proviene de las emisiones de los vehículos motorizados de combustión los cuales en su mayoría usan como fuente de energía los combustibles fósiles y aunado el aumento en la población mundial que necesita movilizarse con mayor facilidad y comodidad origina como consecuencia que se tiene un aumento en el parque vehicular y por lo tanto un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Hoy en día, las principales tecnologías existentes para la captura de CO₂ solo se encuentran para escala industrial es decir solo nos ocupamos de las fuentes de emisiones a gran escala como son; por mencionar algunas las refinerías, llanteras, aceiteras, cementeras entre otras y descuidamos las de menor escala siendo que estas son las más numerosas porque por cada industria que emite CO₂ a la atmosfera existen miles de vehículos que emiten CO₂ en todo el mundo al mismo tiempo y con un rango mayor de horas al día.

En la actualidad, las principales tecnologías existentes para la captura de CO₂ están basadas en procesos de absorción en los que se emplean líquidos absorbentes con grupos amino, como por ejemplo la monoetanolamina (MEA), la dietanolamina (DEA) o la metildietanolamina (MDEA). No obstante, estos procesos presentan desventajas significativas, como son la evaporación y corrosividad de las aminas empleadas, la degradación de estos compuestos en presencia de oxígeno y especialmente la gran cantidad de energía necesaria para su regeneración.

La utilización de sólidos adsorbentes regenerables es una alternativa potencialmente válida para la captura de CO₂ en los gases de combustión. En las dos últimas décadas se han investigado numerosos tipos de materiales adsorbentes porosos, tales como carbones activados, arcillas pilareadas, óxidos metálicos, zeolitas, etc.

Los materiales del tipo zeolitas o carbones activos son capaces de adsorber físicamente una cantidad de CO₂ a temperatura ambiente. Por ello se optara como material para la absorción del CO₂ en el presente trabajo una escoria de tipo BOF, que no es sino el desecho que se obtiene en la fundición y purificación de metales y que en su mayor parte esta es sola tratada como un desecho inutilizable por las características ya que de ser un material complejo en su composición no es costeable su reintegración al proceso de fundición de acero, dicha escoria es rica en óxidos metálicos y rico en el CaO que es el óxido más abundante dentro de la escoria, dicho

elemento en contacto con el aire circundante el cual estará a temperatura, presión y humedad ambiente comenzara el proceso para la absorción de CO₂, dando como resultado la formación de CaCO₃

De igual manera se implementara la utilización de la escoria en el flujo directo de los gases de escape resultado de la combustión del motor a gasolina , observando el comportamiento de dicha escoria en cuanto adsorción de CO₂, cuando esta se encuentra en un flujo más concentrado de dicho gas observando así la afectación por los parámetros como son la temperatura, presión , la velocidad del flujo , las vibraciones entre otros factores que podrán modificar en mayor o menor medida el desempeño de la escoria.

Todo lo anterior se tomara en cuenta para la realización de los prototipos propuestos en este trabajo los cuales su primordial función será el ayudar en la eliminación de CO₂ que se emite a la atmosfera como resultado de la combustión de los motores y el que se encuentra dentro del medio ambiente que rodea a los millones de personas que habitan el planeta.

Una vez terminado su ciclo de vida de los prototipos estos deberán ser reciclados en casi su totalidad y la mayoría de los materiales con que están conformados darán origen a otro beneficio. Un ejemplo de ello es la utilización del material para la industria cementera; como puede ser como base de fabricación de morteros, asfaltos, bloques para la construcción, como relleno y la posibilidad de funcionar como fertilizante.

OBJETIVO.

El objetivo del presente trabajo tiene como finalidad. Por una parte la caracterización de la escoria aceraria tipo LD o BOF, al igual que el desarrollo de nuevas tecnologías que sean aplicadas para la adsorción de CO₂ por medio de la creación de prototipos, estos se basan en el método de adsorción sólido-gas. Dicha adsorción será por medio de una zeolita la cual es un subproducto de la fundición y purificación del acero; comprobando su desempeño como agente adsorbente. Para realizar la construcción de dichos prototipos se deberá tener en cuenta amplio conocimiento del funcionamiento de los automotores, técnicas de identificación de componentes por medio de difracción y fluorescencia de rayos x, conocimiento de mecanismos de adsorción y absorción de CO₂ y diseño mecánico de dispositivos.

HIPOTESIS CENTRAL

Se puede comprender el comportamiento de la zeolita (escoria de metalurgia) como un material capaz de adsorber el CO₂ del sistema de gases de escape de los automotores y del medio ambiente circundante, esto debido a su estructura conformada por óxidos como es el caso de CaO entre otros. Los gases de CO₂ producto de la combustión de los automotores serán adsorbidos parcialmente por la zeolita, para dar origen a la formación de carbonatos (CO₃) y bicarbonatos (HCO₃⁻)

La creación de prototipos que contengan, la zeolita (escoria de metalurgia) que ayuden en la eliminación del CO₂ que emiten los automotores a la atmósfera y el CO₂ que ya está contenido en la atmósfera proveniente de distintos sectores de emisión.

IMPLEMENTACION MECANICA.

El diseño de los prototipos tendrá como base un diseño funcional, que no afecte el desempeño de los sistemas del automotor, el desempeño de mecánico y potencial del automóvil y que este sujeto a los parámetros permitidos en cuanto a modificaciones al chasis y al sistema de escape del automóvil.

CAPITULO 1

PANORAMA DEL CO₂ EN EL MUNDO

1.-MARCO TEORICO – Problemática del incremento de CO₂ en la atmosfera y métodos para eliminación de CO₂.

1.1. ¡Que es el CO₂! y cómo afecta al planeta.

El dióxido de carbono, también denominado óxido de carbono (IV), gas carbónico y anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Su fórmula molecular es CO₂. Es una molécula lineal y no polar, a pesar de tener enlaces polares. Esto se debe a que, dada la hibridación del carbono, la molécula posee una geometría lineal y simétrica. Su representación por estructura de Lewis es: O=C=O.

Como parte del ciclo del carbono, plantas, algas y cianobacterias usan la energía lumínica del Sol para fotosintetizar carbohidratos a partir del dióxido de carbono y el agua, expulsando oxígeno como desecho de la reacción. Sin embargo, las plantas no pueden hacer la fotosíntesis por la noche o en oscuridad, desprendiendo una cantidad menor de dióxido de carbono debido a la respiración celular. No solo las plantas, la mayoría de los organismos en la Tierra que respiran expulsan dióxido de carbono como desecho del metabolismo, incluyendo al ser humano. El dióxido de carbono es producido también por la combustión del carbón y los hidrocarburos, y es emitido por volcanes, géiseres y fuentes volcánicas.

Los efectos ambientales del dióxido de carbono atmosférico generan un creciente interés. Actualmente existe una fuerte controversia sobre el calentamiento global y la relación que el CO₂ tiene con éste. El dióxido de carbono es un importante gas que regula el calentamiento global de la superficie de la Tierra, además de ser la primera fuente de carbono para la vida en la Tierra. Su concentración en la atmósfera se ha mantenido constante desde el final del Precámbrico hasta la Revolución Industrial, pero debido al crecimiento desmesurado de la combustión de combustibles fósiles la concentración está aumentando, incrementando el calentamiento global y causando un cambio climático antropogénico.

1.2. EL calentamiento global.

El calentamiento global (GEI), es causado por el aumento de los gases invernadero en la atmósfera que acumulan el calor procedente de la radiación solar. Uno de los gases más importantes del efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO₂) producido por la combustión del petróleo.

Algunos escépticos aseguraron que el dióxido de carbono no es un gas "muy poderoso", pero científicos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) de Naciones Unidas, ganadores del premio Nobel de la Paz en 2007, han probado que el CO₂ es el gas de efecto invernadero de origen antropogénico más importante.

Muestras "inequívocas" del cambio climático son el aumento de la temperatura del aire y del océano, la fusión generalizada de nieves y hielos, y el incremento del promedio mundial del nivel del mar, según un informe del IPCC de la ONU.

Las cifras hablan por sí solas: el nivel del mar ha aumentado 3,1 milímetros anuales entre 1993 y 2003; los hielos marinos árticos han disminuido en un 2,7% por decenio y los glaciares de montaña y la cubierta de nieve ha descendido en un 7% en el hemisferio norte desde 1900.

Las corrientes atmosféricas cambian y la temporada de ciclones tropicales y huracanes en el hemisferio norte ha aumentado desde 1970, según los datos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Once de los doce años del período 1995 - 2013 han sido los más cálidos de los registros de temperaturas observadas desde 1850, y este aumento "está distribuido por todo el planeta y es mayor en latitudes septentrionales altas", concluyeron más de 2.400 expertos del IPCC. Las temperaturas del hemisferio norte durante la segunda mitad del siglo XX fueron las más altas de los últimos 1.300 años.

1.3. Afectaciones y principales fuentes de emisión de CO2 en México.

En México, el sector transporte representa la segunda fuente de Gases Efecto Invernadero , tal es el caso de el dióxido de carbono (CO2), los cuales son los principales responsables del calentamiento global. Se estima que en el periodo de 2012-2014 las ventas de autos de pasajeros (ligeros) nuevos asciendan aproximadamente a 6 millones de vehículos. Estos autos se sumarían a los más de 22 millones que ya circulan por nuestras ciudades.

La población, puede hacer mucho para mejorar el aire que respiramos el uso excesivo del automóvil provoca un alto grado de contaminación y si a eso le sumamos que muchos de ellos se encuentran en mal estado y despiden gran número de contaminantes que afectan directamente a la salud de los individuos, podremos darnos cuenta de lo mucho que podemos contribuir al medio ambiente.

El aire que respiramos está compuesto por 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno, 0.093% de argón y una porción de vapor de agua, cuando hablamos de contaminación, nos referimos a la alteración de esta composición, producida por causas naturales o por el hombre, las primeras no se pueden evitar, pero las segundas, es nuestra obligación evitarlas.

Las fuentes que provocan la contaminación se clasifican en fijas que son toda instalación establecida en un sólo lugar que tenga como finalidad desarrollar operaciones y procesos industriales o comerciales y fuentes móviles,

que son todo equipo o maquinaria no fijos, con motores de combustión y similares que con motivo de su operación generan emisiones contaminantes a la atmósfera.

La industria y el transporte son las dos principales fuentes de contaminación atmosférica. Datos oficiales revelan que el transporte público de pasajeros, de carga y particulares, genera el 80 % del total de los contaminantes a la atmósfera, el 3% lo representa la industria y el 10% restante el comercio y los servicios. Se consumen 127 millones de litros de gasolina al día y 63 millones de diesel al día, el 10% del presupuesto oficial, se destina al sector salud, donde predomina la atención a enfermedades cardio vasculares y respiratorias, existen 4.0 millones de vehículos automotores que circulan diariamente en vialidades, carreteras y autopistas de la zona metropolitana.

Los principales contaminantes que despiden los vehículos automotores y que afectan la salud de la población, son: El monóxido de carbono (CO), que se forma debido a la combustión incompleta en los motores de los vehículos que usan gasolina, Los hidrocarburos, que se forman por componentes de la gasolina y otros derivados del petróleo, Los óxidos de nitrógeno, son contaminantes que por sí mismos no representan problema, pero al hacer contacto con la luz solar, producen compuestos tóxicos, El ozono, forma parte de la capa superior de la tierra, y ayuda a filtrar los rayos ultravioletas provenientes del sol, pero si se encuentra a nivel del suelo se convierte en un contaminante muy poderoso, El plomo, se origina a partir de los combustibles, es usado como aditivo antidetonante para gasolina y Las partículas, que pueden flotar o sedimentarse y se conocen como partículas suspendidas totales.

El primer Programa de Verificación Vehicular Obligatorio, tuvo carácter de voluntario a partir de 1982, pero en 1987 se convirtió en obligatorio y anual para autos particulares modelos 1976 a 1982, la intención de esta medida era que para fines de 1988, la aplicación del programa fuera gradual hasta abarcar todos los autos particulares. Desde 1988 el programa se convirtió en semestral y obligatorio.

Para tener un aire más limpio, es necesario que contribuyamos a mejorar nuestro entorno, la naturaleza es de todos y está en nuestras manos conservarla para legar a nuestros hijos un ambiente sano.

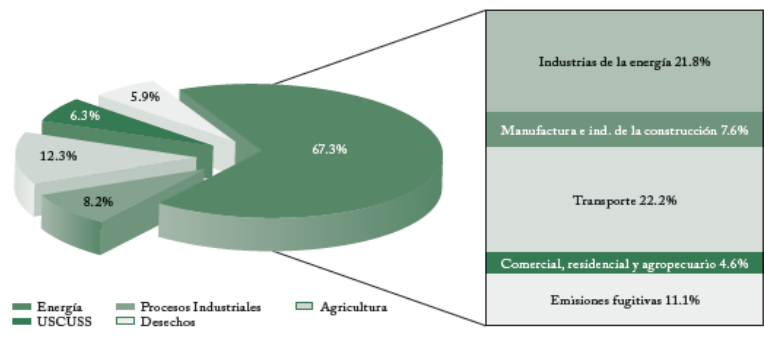
En la siguiente imagen se muestra la posición mundial de México en cuanto a emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera proveniente de distintos sectores. (Figura 1.1.)



Figura 1.1 Raking mundial de emisiones de CO2

Fuente .bancomundial.org

Las emisiones de GEI en 2012 estimadas en unidades de Dióxido de carbono equivalente (CO2 eq.) totalizaron 748 millones de toneladas, lo que indica un incremento de 33.4% con respecto al año base 1990, con una tasa de crecimiento media anual (TCMA) de 1.5% .La contribución de las emisiones de GEI en 2012 por categoría en términos de CO2 eq. Es la siguiente: Energía, represento 67.3% (503,817.6 Gg); agricultura, 12.3% (92,184.4 Gg); Procesos Industriales, 8.2% (61,226.9 Gg); Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura, 6.3% (46,892.4 Gg), y Desechos, 5.9% (44,130.8 Gg). Grafica 1.1



Grafica 1.1 Contribución de emisiones por categoría.

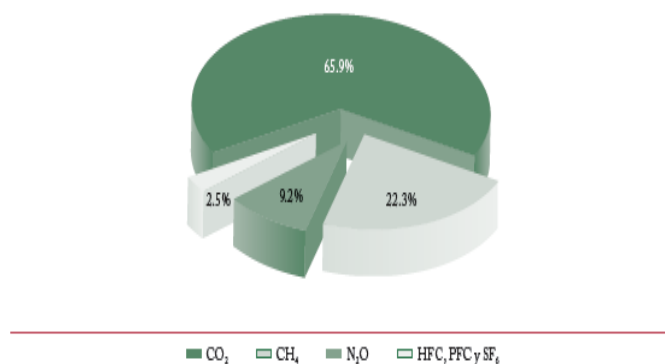
Como se puede observar, la categoría de Energía sigue predominando en el total de emisiones de GEI en México, principalmente por las emisiones de las industrias de la energía y el transporte, que representan 44% del total del inventario nacional.

En 2012, las emisiones per cápita en México fueron de 7.1 toneladas de CO2 eq. Del total de emisiones nacionales de GEI. En 2009 las emisiones de CO2 per cápita, considerando únicamente las emisiones por consumo de combustibles fósiles, fueron de 3.75 toneladas por habitante, mientras que el promedio mundial fue de 4.1 toneladas de CO2 per cápita (AIE, 2011).

Las emisiones de GEI en energía por unidad de PIB en 2010 fueron de 0.048 kg de CO2 eq. Por peso del PIB, referidos a precios constantes de 2003, lo cual representa una disminución de 5.8% con respecto a los 0.051 kg de CO2 eq. Por peso del PIB registrados en 1990.

A continuación se muestra la tabla donde se muestra la cantidad de CO2 producido en el periodo de 1990-2010, mostrándose de igual manera la cantidad de CO2 tratado por absorción y otros gases de efecto invernadero.

Figura 1.3



Gráfica 1.2 Porcentaje de gases de efecto invernadero de la ciudad de México.

| Año | Emisiones de CO ₂ | Absorción de CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | HFC | PFC | SF ₆ | Emisiones Totales |
|------|------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|----------|-------|-----------------|-------------------|
| 1990 | 407,148.6 | -8,070.7 | 104,325.7 | 56,178.7 | 776.5 | 646.8 | 29.6 | 561,035.2 |
| 1991 | 439,561.5 | -9,415.8 | 102,446.7 | 54,998.6 | 901.3 | 306.5 | 32.1 | 588,830.9 |
| 1992 | 432,955.6 | -10,760.9 | 101,189.9 | 54,158.2 | 618.6 | 271.0 | 35.9 | 578,468.3 |
| 1993 | 436,930.4 | -11,356.7 | 105,631.5 | 55,633.2 | 1,270.1 | 165.5 | 40.2 | 588,314.2 |
| 1994 | 454,782.5 | -11,952.5 | 107,018.3 | 55,847.7 | 1,173.7 | 0.0 | 41.1 | 606,910.8 |
| 1995 | 428,649.6 | -12,548.3 | 105,981.3 | 55,428.7 | 1,723.1 | 66.9 | 42.6 | 579,343.8 |
| 1996 | 437,695.5 | -13,144.1 | 111,325.0 | 55,441.4 | 3,135.9 | 394.3 | 50.2 | 594,898.2 |
| 1997 | 448,436.5 | -13,739.8 | 113,169.7 | 56,217.1 | 3,852.1 | 426.0 | 51.7 | 608,413.2 |
| 1998 | 465,734.7 | -14,335.6 | 115,873.4 | 57,453.8 | 4,075.9 | 432.4 | 53.1 | 629,287.8 |
| 1999 | 454,826.2 | -14,931.4 | 117,490.1 | 57,285.7 | 5,075.5 | 498.6 | 55.0 | 620,299.7 |
| 2000 | 471,784.0 | -15,527.2 | 118,978.6 | 58,142.0 | 5,686.2 | 543.3 | 56.9 | 639,663.8 |
| 2001 | 460,840.5 | -16,123.0 | 117,860.1 | 59,667.6 | 4,913.8 | 330.7 | 59.8 | 627,549.5 |
| 2002 | 446,241.9 | -17,091.0 | 120,219.9 | 60,722.4 | 5,824.6 | 250.4 | 69.8 | 616,237.9 |
| 2003 | 456,612.2 | -18,058.9 | 123,372.1 | 61,358.3 | 5,935.5 | 160.5 | 78.0 | 629,457.6 |
| 2004 | 487,948.1 | -19,026.9 | 123,970.0 | 63,329.3 | 6,404.8 | 128.4 | 84.2 | 662,837.9 |
| 2005 | 482,141.1 | -19,994.9 | 132,606.8 | 63,589.2 | 8,351.1 | 128.4 | 91.4 | 666,913.0 |
| 2006 | 495,126.3 | -19,617.7 | 142,139.6 | 64,694.9 | 12,496.9 | 128.4 | 90.9 | 695,059.3 |
| 2007 | 513,067.2 | -19,240.6 | 147,614.3 | 66,448.7 | 14,077.7 | 128.4 | 111.9 | 722,207.7 |
| 2008 | 526,121.8 | -18,863.4 | 158,330.2 | 68,332.0 | 15,189.5 | 128.4 | 110.1 | 749,348.6 |
| 2009 | 506,846.6 | -18,486.3 | 165,454.4 | 68,602.9 | 14,905.4 | 128.4 | 108.1 | 737,559.6 |
| 2010 | 511,559.8 | -18,109.2 | 166,716.4 | 69,140.1 | 18,692.3 | 128.4 | 124.4 | 748,252.2 |

Tabla 1.1 Tabla de resumen estimativo de emisiones del periodo 1990-2012.

1.4. Índice metropolitano de la calidad del aire.

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) funciona en México como valor de referencia para que la población de grandes ciudades como el Distrito Federal comprenda los niveles de contaminación del aire que prevalecen en su zona de residencia o trabajo.

El IMECA se obtiene a partir de las mediciones de la calidad del aire que realiza el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. El IMECA se emplea para comunicar a la población del Valle de México el grado de contaminación y el nivel de riesgo que este representa para la salud humana, así como las recomendaciones o acciones que pueden realizar para su protección. El IMECA se calcula empleando los promedios horarios de la medición de los contaminantes ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO) y partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀).

El IMECA se publica cada hora para la población de la Zona Metropolitana del Valle de México, que abarca la totalidad del Distrito Federal y la zona conurbada del Estado de México.

1.4. 1. Categorías del Índice Metropolitano de Calidad del Aire.

Para reportar la calidad del aire, el índice emplea cinco categorías:

*BUENA. Cuando el índice se encuentra entre 0 y 50 puntos IMECA, la calidad del aire se considera como satisfactoria y la contaminación del aire tiene poco o nulo riesgo para la salud.

*REGULAR. Cuando el índice se encuentra entre 51 y 100 puntos IMECA, la calidad del aire es aceptable, sin embargo algunos contaminantes pueden tener un efecto moderado en la salud para un pequeño grupo de personas que presentan una gran sensibilidad a las partículas suspendidas.

*MALA. Cuando el índice se encuentra entre 101 y 150 puntos IMECA, algunos grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. Hay algunas personas que pueden presentar efectos a concentraciones menores que el resto de la población, como es el caso de personas con problemas respiratorios o cardíacos, los niños y ancianos. El público en general puede no presentar riesgos cuando el IMECA está en este intervalo.

*MUY MALA. Cuando el índice se encuentra entre 151 y 200 puntos (IMECA), toda la población experimenta efectos negativos en la salud. Los miembros de grupos sensibles pueden presentar molestias graves. En este intervalo se activan las Fases de Pre contingencia y Contingencia Fase I del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) del Valle de México.

*EXTREMADAMENTE MALA. Cuando el valor del índice es mayor a 201 puntos (IMECA), la población en general experimenta problemas graves de la salud

1.5. Cálculo actual del IMECA.

A fines de 1977 la Dirección General de Saneamiento Atmosférico de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, desarrolló el Índice Mexicano de la Calidad del Aire "IMEXCA", con la finalidad de informar al público de manera precisa y oportuna.

El IMEXCA se comenzó a publicar el 6 de diciembre de 1977, su estructura técnica general se basó en el Pollutant Standard Index (PSI) utilizado en los Estados Unidos, es decir, funciones lineales segmentadas donde los puntos

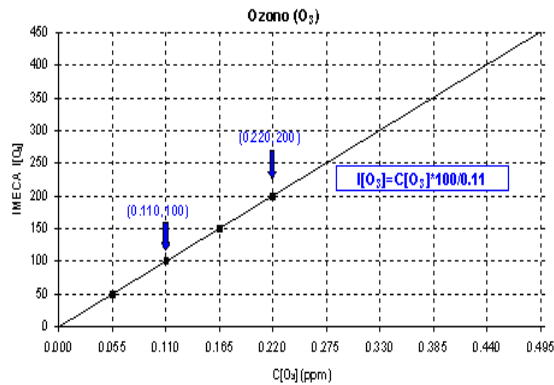
de quiebre correspondían a las normas primarias de calidad del aire de los Estados Unidos, debido a que en México no existían normas oficiales de calidad del aire, ni criterios de episodios, ni niveles de daño significativo.

En noviembre del año 2006 se publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal la Norma Ambiental NADF-009-AIRE-2006, que establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de los contaminantes criterio, ozono (O₃), partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO). Esta Norma Ambiental incluye los algoritmos para el cálculo del IMECA:

| INTERVALOS (IMECA) | CONCENTRACIONES | ECUACIONES |
|--|-------------------|--|
| Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) | | |
| IMECA | µg/m ³ | Ecuaciones |
| 0-50 | 0-60 | |
| 51-100 | 61-120 | $I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/6$ |
| 101-150 | 121-220 | |
| 151-200 | 221-320 | $I[PM_{10}] = 40 + C[PM_{10}] * 0.5$ |
| >200 | >320 | $I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/8$ |
| Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) | | |
| IMECA | µg/m ³ | Ecuaciones |
| 0-50 | 0-15.4 | $I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 50/15.4$ |
| 51-100 | 15.5-40.4 | $I[PM_{2.5}] = 20.50 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$ |
| 101-150 | 40.5-65.4 | $I[PM_{2.5}] = 21.30 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$ |
| 151-200 | 65.5-150.4 | $I[PM_{2.5}] = 113.20 + C[PM_{2.5}] * 49/84.9$ |
| >200 | >150.4 | $I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 201/150.5$ |
| Ozono (O₃) | | |
| IMECA | ppm | Ecuaciones |
| 0-50 | 0-0.055 | |
| 51-100 | 0.056-0.110 | |
| 101-150 | 0.111-0.165 | $I[O_3] = C[O_3] * 100/0.11$ |
| 151-200 | 0.166-0.220 | |
| >200 | >0.220 | |
| Dióxido de Nitrógeno (NO₂) | | |
| IMECA | ppm | Ecuaciones |
| 0-50 | 0-0.105 | $I[NO_2] = C[NO_2] * 50/0.105$ |
| 51-100 | 0.106-0.210 | $I[NO_2] = 1.058 + C[NO_2] * 49/0.104$ |
| 101-150 | 0.211-0.315 | $I[NO_2] = 1.587 + C[NO_2] * 49/0.104$ |
| 151-200 | 0.316-0.420 | $I[NO_2] = 2.115 + C[NO_2] * 49/0.104$ |
| >200 | >0.420 | $I[NO_2] = C[NO_2] * 201/0.421$ |
| Dióxido de Azufre (SO₂) | | |
| IMECA | ppm | Ecuaciones |
| 0-50 | 0-0.065 | |
| 51-100 | 0.066-0.130 | |
| 101-150 | 0.131-0.195 | $I[SO_2] = C[SO_2] * 100/0.13$ |
| 151-200 | 0.196-0.260 | |
| >200 | >0.260 | |
| Monóxido de Carbono (CO) | | |
| IMECA | ppm | Ecuaciones |
| 0-50 | 0-5.50 | $I[CO] = C[CO] * 50/5.50$ |
| 51-100 | 5.51-11.00 | $I[CO] = 1.82 + C[CO] * 49/5.49$ |
| 101-150 | 11.01-16.50 | $I[CO] = 2.73 + C[CO] * 49/5.49$ |
| 151-200 | 16.51-22.00 | $I[CO] = 3.64 + C[CO] * 49/5.49$ |
| >200 | >22.00 | $I[CO] = C[CO] * 201/22.01$ |

Tabla 1.2. Cálculo de intervalos de IMECAS.

En la siguiente ilustración se muestra la transformación del ozono para obtener el IMECA, donde el segundo punto de quiebre corresponde al valor de la Norma Oficial Mexicana de Calidad del Aire de 0.110 ppm como promedio horario homologado a 100 puntos del IMECA y el cuarto punto en 0.220 ppm corresponde a los 200 puntos del IMECA.



Grafica 1.3 Transformación del ozono para obtener el IMECA.

1.6. Equipos para la medición de la calidad del aire.

1.6.1. Tipos de equipos en una estación de medición de la calidad del aire.

Una estación de medición de la calidad del aire, además de la infraestructura básica, se compone de diferentes equipos y cada uno de éstos operan de manera individual o en conjunto para tomar una muestra, realizar una medición, transformar una señal, mostrar y almacenar los resultados y calibrar el resto de los equipos.

La gran variedad de equipos que existen actualmente en el mercado puede significar una dificultad en la selección de los mismos; sin embargo, en cuanto a monitoreo de gases contaminantes criterio se refiere, los principios de operación son los mismos y las características entre equipos de diferentes marcas son muy similares.

1.6.2 Analizadores automáticos.

Los analizadores automáticos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de un contaminante gaseoso para determinar su concentración. (Adaptado de US-EPA, 2008; Martínez, 1996; NZ, 2000; OMS-CEPIS, 2004; CENMA, 2003). Los métodos actualmente utilizados por los analizadores automáticos de gases contaminantes criterio se presentan en la tabla 1.4.

| contaminante | Método de medición | Tipo de medición |
|--------------------------|---|------------------|
| Ozono O3 | Fotometría ultravioleta | Equivalente |
| Monóxido de carbono CO | Fotometría infrarroja de filtro de correlación de gas | Equivalente |
| Bióxido de nitrógeno NO2 | Quimioluminiscencia en fase gaseosa | Referencia |
| Bióxido de azufre SO2 | Fluorescencia pulsante | Equivalente |

Tabla 1.3 Tipo de analizadores de calidad de aire de tipo automáticos.

Todos los analizadores automáticos cuentan con tres sistemas internos e interdependientes: electrónico, neumático y óptico.

*El sistema electrónico contiene el software de operación, controla el funcionamiento del analizador y realiza automáticamente los cálculos para el reporte de los resultados.

*El sistema neumático consta principalmente de la bomba de succión y de las conexiones y tuberías por donde circula la muestra de gas.

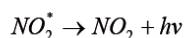
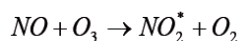
*El sistema óptico es donde se aplica el método de medición del analizador, mediante procesos físicos y/o químicos, dependiendo del gas a analizar.

1.6.3. Analizador de CO (Fotometría Infrarroja, IR).

Los analizadores de Monóxido de Carbono, CO, se sirven del principio de operación que se basa en la capacidad que tiene este gas para absorber energía en determinadas longitudes de onda. En los equipos de medición que utilizan este principio se mide la absorción de luz infrarroja, llevada a cabo por las moléculas de CO en intervalos relativamente pequeños de longitudes de onda centradas sobre la región de máxima absorción del contaminante.

1.6.4. Analizador de NOx (Quimiluminiscencia).

La quimiluminiscencia es una técnica analítica basada en la medición de la cantidad de luz generada por una reacción química. Los analizadores de Óxidos de Nitrógeno, NOx utilizan este principio a partir de la reacción que tiene lugar entre el óxido nítrico (NO) contenido en la muestra de aire y el ozono (O3) que genera, en exceso, un dispositivo que es parte de los componentes del instrumento. La luz emitida se encuentra en el intervalo del infrarrojo entre 500 y 3000 nm de acuerdo a la siguiente reacción:



El NO en una muestra de aire reacciona con el O3 para formar dióxido de nitrógeno en estado de excitación (NO2*). Posteriormente, cuando el dióxido de nitrógeno generado vuelve al estado inicial emite una luz característica en una cantidad proporcional a la concentración del NO contenido en la muestra (Jahnke, 1993).

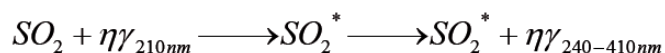
El NO2 no participa en la reacción de quimiluminiscencia por lo que los analizadores están provistos de un convertidor a través del cual pasa la muestra de aire en forma alternada para que el dióxido de nitrógeno se reduzca a NO.

La generación del O3 se lleva a cabo tratando oxígeno del aire con luz UV dentro de un tubo de cuarzo. El O3 generado se suministra en exceso a la cámara de reacción para asegurar una reacción completa de tal manera que la luz emitida sea directamente proporcional a la cantidad de NO presente.

La concentración de NOx se determina en dos etapas de medición. Cuando la muestra llega directamente a la celda de reacción sin pasar por el convertidor la concentración detectada corresponde a la concentración del NO existente y la lectura es guardada por el microprocesador. Cuando la muestra pasa por el convertidor y llega hasta la celda de reacción el NO2 se convierte en NO y la concentración detectada se suma a la del NO de la etapa anterior y se reporta como NOx total. La concentración de NO2 corresponde a la diferencia entre las lecturas registradas de NO y NOx.

1.6.5. Analizador de SO2 (Fluorescencia pulsante).

Los analizadores de Dióxido de Azufre emplean el principio de fluorescencia pulsante que se basa en el hecho de que las moléculas de SO2 absorben radiación ultravioleta (UV) a una longitud de onda en el intervalo de 210-410 nm, entrando en un estado instantáneo de excitación para posteriormente decaer a un estado de energía inferior, emitiendo un pulso de luz fluorescente de una longitud de onda mayor en el intervalo de 240 a 410 nm como se indica en la siguiente reacción:



Para reducir las interferencias, los analizadores de SO2 también cuentan con lavadores o con dispositivos filtrantes para la remoción de hidrocarburos.

1.6.6. Analizador de O3 (Fotometría UV).

El principio de operación que utilizan los analizadores de ozono, O₃, se conoce como el método de fotometría UV y consiste en medir la cantidad de luz ultravioleta, a una longitud de onda de 254 nm, absorbida por el ozono presente en una muestra. El principio de operación se basa en la Ley de Beer-Lambert. Cuando la muestra pasa por el interior de las celdas, la molécula de ozono absorbe una cantidad de luz (I), la cual se compara con la cantidad de luz medida en la celda de referencia (I₀) para calcular la concentración (C). La concentración obtenida se corrige a condiciones de temperatura y presión del interior de la celda de absorción, los cuales son medidos de manera independiente. La concentración del gas se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-\alpha LC}$$

(A condiciones estándar de P y T)

Donde:

I = La intensidad de la luz después de la absorción

I₀ = La intensidad de la luz antes de la absorción

α = Coeficiente de Absorción del O₃ a determinada longitud de onda

L = Longitud de la celda o tubo de absorción

C = concentración del gas absorbente

(O₃) Despejando la concentración de O₃ (C) en ppm:

$$O_3(ppm) = \frac{10^6}{\alpha * L} * \text{Log}_{10} \frac{I_0}{I} * \frac{760}{P} * \frac{T}{273}$$

1.6.7. Monitores de partículas suspendidas.

Los monitores de partículas (algunos modelos que utilizan el método de atenuación beta y de microbalanza oscilatoria), al igual que los analizadores de gases, reportan resultados en tiempo real. Sin embargo, a diferencia de los analizadores de gases, no llevan a cabo un análisis de la muestra, únicamente determinan la concentración de partículas aprovechando las propiedades físicas de las mismas.

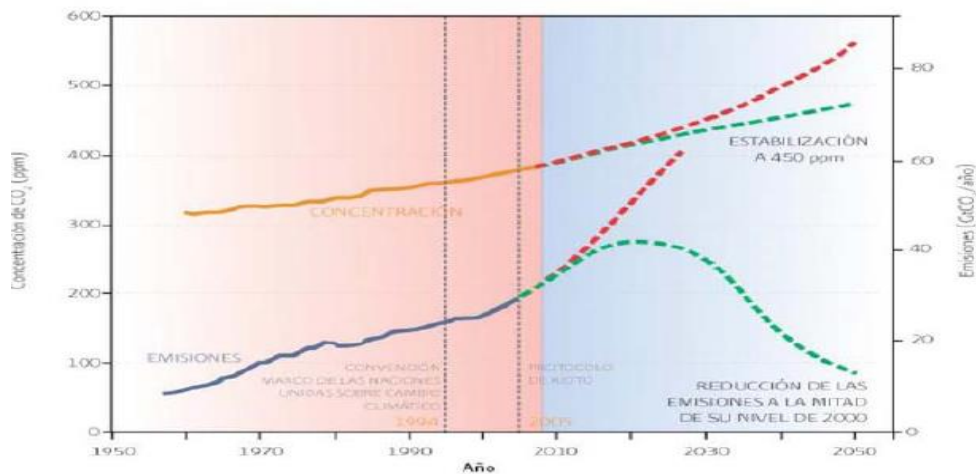
Estos equipos son utilizados para monitorear partículas suspendidas en aire ambiente, de diámetros menores a 10 y 2.5 micrómetros. Actualmente en México no existen métodos de referencia para el monitoreo de partículas de estos tamaños.

Los equipos que realizan este tipo de monitoreo son diseñados de tal manera que cumplen con las especificaciones técnicas que se encuentran en el Apéndice J del Código Federal de Regulaciones (CFR, por sus siglas en inglés) 40, parte 50, de los EEUU. Además cabe mencionar que éstos son evaluados y aprobados por la US-EPA y otras agencias internacionales.

Los principios de operación comúnmente utilizados para el monitoreo de partículas son: el de Microbalanza de Elemento Oscilante y el de Atenuación de Radiación Beta. El tamaño de partículas a monitorear depende de los fraccionadores de cada equipo, que son colocados en la entrada de muestra. Éstos aprovechan la dinámica de las partículas para que a cierta velocidad de flujo, las partículas de mayor tamaño sean impactadas en algún sistema de retención y no lleguen hasta el filtro.

1.7 Contribución de la captura y el almacenamiento de CO₂.

Los combustibles fósiles: carbón, gas y petróleo; son la fuente primaria dominante de energía en el mundo, para satisfacer la demanda actual de energía. Basándose en el uso actual y las estimaciones de la demanda, el uso de energía crecerá en el futuro. Esto supondrá una carga adicional sobre las economías, de maximizar las oportunidades para la producción de energía y el incremento de las emisiones de CO₂, en siguiente figura indica los volúmenes de emisiones de CO₂ tanto histórica como prospectivamente a nivel internacional.



Gráfica 1.4 Aumento de la concentración de CO₂ en función del tiempo.

Comúnmente, los yacimientos de petróleo y gas no pueden ser explotados económicamente a toda su capacidad, y algunas minas de carbón se encuentran a profundidades que impiden explotarlas. Como resultado de ello, importantes cantidades de recursos energéticos siguen sin aprovecharse en estos yacimientos. La labor consta del estudio, adquisición y construcción de sitios para operaciones futuras de producción de petróleo, gas y de carbón. Esto es una solución que permite que estos recursos sean mejor explotados económicamente.

El CO₂ puede ser utilizado con éxito para aumentar el potencial de extracción. A este tipo de almacenamiento se conoce como "valor agregado del almacenamiento de CO₂". El valor agregado del almacenamiento de CO₂ puede llevarse a cabo en una diversidad de maneras:

* Recuperación Mejorada de Petróleo (EOR) - El CO₂ se puede inyectar en baches miscibles en los yacimientos de petróleo depresionados. El CO₂ se disuelve en el aceite, reduce la viscosidad del aceite y éste se mueve hacia el pozo productor. Una reserva adicional de petróleo, de 10-12%, puede obtenerse a través de este proceso. Este uso del CO₂ es una tecnología probada. Una parte del CO₂ se mantendrá en el yacimiento, de manera efectiva "almacenado", en vez de ser liberado a la atmósfera. Hay una capacidad global estimada de 20 a 65 Gt C (giga toneladas carbono, capacidad de almacenamiento de CO₂) para la recuperación mejorada de petróleo. El uso de este conducto se limita a economías que tienen yacimientos de aceite, adecuados para técnicas de recuperación mejorada con CO₂ y su potencial económico debe ser sopesado frente al costo del petróleo, al costo del CO₂ para inyectar en el yacimiento y las características del yacimiento. Hoy en día se está llevando a cabo Recuperación Mejorada de Petróleo en 100 lugares en todo el mundo (Oil & Gas Journal, 2008).

*Recuperación Mejorada de Gas (EGR) - El CO₂ puede ser inyectado en la base de un yacimiento homogéneo depresionado, de gas natural, para desalojar el gas natural a la parte superior del yacimiento, para la producción. La simulación ha confirmado que esta podría ser una tecnología atractiva para yacimientos de gas adecuados, sin embargo, EGR, no está comprobada en la práctica en yacimientos de gas, tradicionalmente se puede aprovechar hasta un 90% de su producción potencial total a través de métodos de producción primaria.

*Recuperación Mejorada de Metano en Yacimientos de Carbón (ECBM) - Los yacimientos de carbón tienen cantidades importantes de gas metano, adsorbido en el carbón lo que le da el nombre de: metano en capas de carbón (CBM). Mediante la inyección de CO₂ en yacimientos de carbón, el CO₂ es absorbido en la matriz de los poros del carbón, liberando el metano para la producción de energía que de otro modo no podría haber sido extraída económicamente. Este es un método que aún está en fase piloto. Burlington Resources de los EUA en la actualidad ejecuta el primer gran proyecto de ECBM del mundo a escala piloto, situado en la cuenca de San Juan, Nuevo México. El Consejo de Investigación de Alberta (ARC, por sus siglas en inglés) está liderando un consorcio de gobiernos y socios de industria en una micro-prueba piloto de campo para recopilar datos de un

yacimiento para determinar la factibilidad de almacenamiento de CO₂, mientras que produce metano de los yacimientos de CBM de menor permeabilidad, en Alberta. ARC también está liderando una iniciativa de demostración ECBM en la provincia de Shanxi, China. Las estimaciones globales de recursos de metano en capas de carbón son del orden de 2,980 a 9,260 x 10¹² pies cúbicos estándar (84 - 262 x 10¹² metros cúbicos) o de 82 a 263 Gt C. La mayor parte de los recursos de metano en capas de carbón del mundo se produce en China, la parte asiática de Rusia, Kazajstán y la India. Australia, partes de África, y Europa Central, así como los Estados Unidos y Canadá también contienen cantidades variables de este recurso.

El CO₂ es producido a partir de una serie de fuentes, incluyendo la quema de petróleo, carbón y gas. El CO₂ también es un "gas de efecto invernadero". Cuando los GEI se liberan a la atmósfera, retienen tanto calor como el vidrio en un invernadero. El calor atrapado puede desencadenar el cambio climático - un cambio en el clima sufrido en una región. A nivel mundial, estos cambios podrían afectar el equilibrio climático de la Tierra. Puede dar lugar a temperaturas más cálidas, un mayor número de inundaciones, sequías, huracanes y otras tormentas intensas, e impactar en la salud humana y ecológica.

Las economías de todo el mundo han desarrollado un acuerdo internacional y la estrategia para afrontar el cambio climático llamado la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC). La CMCC subraya la necesidad de una mayor comprensión acerca de cómo operan los sistemas de clima mundial, un esfuerzo internacional para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (a través del acuerdo llamado Protocolo de Kioto), educación pública para mejorar la comprensión del cambio climático, y la evaluación de cómo las economías y regiones puede adaptarse a cualquier cambio climático que pueda ocurrir.

Se puede necesitar impedir la entrada a la atmósfera de alrededor de 1000 Gt C de gases de efecto invernadero, en un período de 300 años, para mantener las concentraciones atmosféricas por debajo de 550 ppm (Hepple y Benson, 2003). Esto sería estabilizar las emisiones a dos veces el nivel preindustrial de 270 ppm. A más largo plazo, como el uso de combustibles fósiles basados en carbono disminuye debido a la mengua de las reservas y su sustitución por otras formas de energía renovable o libre de carbono, el almacenamiento de CO₂ no formará parte integral de la estrategia.

Los depósitos de dióxido de carbono se pueden agrupar en tres categorías generales basadas en la naturaleza, localización y destino final del CO₂:

* Depósitos en la Biosfera - son activos, ambientalmente sensibles, yacimientos naturales para CO₂. Los ecosistemas tales como océanos, bosques y suelos (agrícolas), son miembros de esta clase. Estos depósitos (con exclusión de los océanos) son probablemente más adecuados para compensar las emisiones de fuentes difusas de CO₂ que no han podido ser capturadas, pero también podrían aplicarse como mecanismos de compensación

para las fuentes industriales de CO₂. Sin embargo, utilizar estos depósitos como mecanismos de reducción de emisiones puede resultar en un riesgo considerable, ya que estos están sujetos a procesos naturales de liberación de CO₂ y puede ser difícil validar la cantidad de CO₂ almacenado efectivamente. La viabilidad de usar a los océanos como depósitos se limita a las economías con zonas costeras y acceso a profundidades oceánicas de más de 3000 metros.

* Depósitos de materiales – El carbono que ha sido absorbido por los diferentes sistemas de vida, como los árboles, puede ser almacenado como material de depósito cuando el sistema de vida se crea como un producto material. Los depósitos de materiales incluyen productos de madera duradera (muebles, papel, etc.), productos químicos y plásticos. Estos almacenan carbono para diferentes longitudes de tiempo dependiendo de la vida del producto. Sin embargo, fuera de una extensa investigación, es poco probable que el almacenamiento de carbono en depósitos de material sea otra cosa que un papel muy secundario en las estrategias de mitigación de GEI.

* Depósitos en la Geósfera - Son yacimientos naturales de CO₂ que se encuentran en cuencas geológicas sedimentarias profundas. La actividad humana está obligada a almacenar carbono en este tipo de almacenes. Estos almacenes incluyen yacimientos de aceite, adecuados para la recuperación mejorada de petróleo (EOR), yacimientos de carbón, cuencas salinas, yacimientos depresionados ya sea de gas y/o aceite; y acuíferos profundos. En la actualidad, la cuestión más importante que limita el uso de los depósitos geológicos como opción de mitigación, es el costo. El costo de eliminación de CO₂ se compone de tres factores: costos de separación (es decir, la captura, separación de CO₂ de los gases de combustión), los gastos de transporte (es decir, la compresión, gasoductos) y gastos de inyección (compresión, pozos de inyección). Tendrían que ser desarrollados transportes eficientes, económicos y tecnologías de captura/separación para permitir el uso a gran escala de los depósitos geológicos. En la actualidad, los gastos de captura/separación representan el obstáculo financiero más grande.

Se deben considerar una serie de factores al evaluar la utilización de un depósito en una cartera integrada, de mecanismos de reducción de emisiones. Estos factores incluyen: el impacto ambiental del mecanismo almacenador propuesto; capacidad del depósito, el tiempo de retención/residencia del CO₂ en el almacén, posibilidad de fuga acelerada de CO₂, tasa de captación de CO₂ en el almacén, validación de almacenamiento en la cuenca, la utilidad de la relación almacenamiento con la fuente y tipo de emisión, y costo de aplicación/uso del mecanismo de almacenamiento. El impacto en el medio ambiente, la estabilidad/seguridad y la verificabilidad de almacenamiento de CO₂ para cada una de las categorías mencionadas anteriormente, se resumen en la Tabla 1.4.

| Depósito | Impacto ambiental | Estabilidad/Seguridad | Verificación |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| Biológico | | | |
| Océanos | Negativo | B | M |
| Bosques | Positivo | B-M | B |
| Agricultura | Positivo | B-M | B |
| Geológico | | | |
| EOR | Neutral | M | A |
| Yacimientos de carbón | Neutral | A | A |
| Yacimientos agotados | Neutral | A | A |
| Acuíferos profundos | Neutral | A | A |

Tabla 1.4. Evaluación de otras cuestiones relacionadas con el uso de depósitos biológicos y geológicos para el almacenamiento de carbono. Nota: B= bajo, M=medio, A=alto

1.7.1. Beneficios de la captura y almacenamiento de CO2.

La captura y almacenamiento de CO2, ofrece una alternativa adicional en el uso de energía a base de combustibles fósiles, mientras que gana un tiempo de transición para pasar a combustibles con reducciones considerables de carbono o libres de carbono, como las energías renovables. Además, hay una serie de beneficios económicos y sociales de la CCS, tales como:

- * La innovación, el acceso al estado del arte de las tecnologías más avanzadas, la creación de empleo y el desarrollo económico sostenido y sostenible.
- * Fuente de ingresos secundaria, como las emisiones de GEI son capturadas y almacenadas se pueden convertir en una mercancía negociable llamada: Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE) que se pueden vender en el mercado internacional.
- * Reducción de la contaminación del aire, como los procesos tienden a eliminar otros contaminantes potencialmente nocivos.
- * Oportunidad para la recuperación mejorada de petróleo (EOR)

1.7.2. Potencial de captura y almacenamiento de CO2.

Se han llevado a cabo diversos estudios durante la última década para estimar la cantidad de CO2 que puede ser almacenada en las cuencas sedimentarias y hay un acuerdo general en que la capacidad de almacenamiento global es mayor que 1000 Gt C (giga toneladas de carbono). Esto sugiere que tenemos la capacidad para almacenar la mayoría, si no toda, la necesaria para prevenir la acumulación de niveles de CO2 peligrosos en la atmósfera. El potencial para la captura y almacenamiento de CO2 de cualquier región y a cualquier escala se basa en los siguientes dos criterios generales:

* Disponibilidad de fuentes de CO2 - es necesaria la existencia actual y prevista de grandes fuentes estacionarias de CO2, tales como: la generación de energía térmica, refinerías, plantas de cemento, plantas petroquímicas y grandes complejos industriales, que permitan la captura del CO2 a gran escala para el suministro de CO2 a los sitios de almacenamiento. Generalmente es aceptada, una distancia de 300 km de una fuente de CO2 como límite económico viable. Sin embargo, fuentes de CO2 de extremada pureza, fuera de estos límites también deben ser considerados.

* Disponibilidad económica de los depósitos adecuados, también es necesaria la existencia de medios geológicos (cuencas sedimentarias) adecuados para el almacenamiento de CO2 dentro de la distancia económicamente viable que cumplan los criterios de capacidad y la seguridad.

Cuencas sedimentarias circundantes al pacífico son menos favorables para el almacenamiento de CO2, ya que se encuentran en zonas tectónicamente inestables, con defectos y en general tienen una capacidad menor de almacenamiento. El mayor potencial para el almacenamiento de CO2 en la región APEC2, es grande, del tamaño de las economías continentales. Los sitios más prometedores serían en zonas alejadas de la costa del Pacífico. Esto incluye: Australia, Canadá, México, la República Popular de China, Rusia y los Estados Unidos.

El potencial de las economías industrializadas en la región de APEC es de conocimiento general. Australia, Canadá, Nueva Zelanda y los Estados Unidos tienen el mayor potencial para almacenamiento. Estas economías son también, en general, líderes en el campo y tienen una fuerte investigación y aplicación de programas en apoyo a la captura y almacenamiento de CO2. Cuencas sedimentarias en Rusia (la parte de Asia), la República de Corea, la República Popular de China, Taipéi de China, Vietnam, las Filipinas, Tailandia, Malasia, Indonesia y México tienen el mayor potencial de las economías no industrializadas.

Con el fin de aprovechar esta oportunidad y aumentar la probabilidad de aceptación de la captura y almacenamiento de CO2, una serie de actividades deben llevarse a cabo:

* Educación y divulgación - La noción de captura y almacenamiento de CO₂ es relativamente nueva, y muchas personas no son conscientes de su papel como una estrategia de reducción de los GEI. Para lograr la aceptación de almacenamiento de carbono es necesario aumentar la educación y concientización en el público en general, los organismos reguladores, responsables políticos, y la industria, para permitir así el despliegue comercial del futuro de esta tecnología avanzada.

* Evaluación de riesgo/desempeño - Los modelos de riesgo deben ser establecidos para las fugas de CO₂ (lenta y rápida) del yacimiento de almacenamiento a través de roturas en los sellos y a lo largo de los pozos, tanto a corto plazo (durante el período de inyección) como a largo (durante todo el período de almacenamiento). Los problemas de seguridad y estrategias de control son componentes clave de la evaluación riesgo/desempeño.

* Análisis del ciclo de vida - El ciclo de vida debe ser identificado en el contexto del almacenamiento geológico en la evaluación de las emisiones de GEI en todo el producto completo o un sistema de ciclo de vida útil.

* Economía de almacenamiento de CO₂ – Deben tenerse en cuenta regulaciones de CO₂ sustraído, así como modificaciones.

* Marco jurídico/regulador - Esto puede tener que ser modificado a fin de abordar las cuestiones a largo plazo inherentes al almacenamiento geológico.

1.7.3. Situación de la captura y almacenamiento de CO₂.

El CO₂ ya está siendo capturado en las industrias del petróleo y gas y de las industrias químicas. De hecho varias plantas capturan CO₂ de los gases de combustión de las centrales eléctricas para el uso en la industria de alimentos. Sin embargo, sólo una fracción del CO₂ en el flujo de los gases de combustión es capturado - para reducir las emisiones de una planta de energía típica en un 75% el equipo tendría que ser 10 veces mayor.

Si la captura se utiliza para minimizar las emisiones de CO₂ procedentes de plantas de energía se añadiría al menos 1.5 centavos de dólar por kWh en el costo de la generación de electricidad. Además, la eficiencia de generación se reduciría de 10 a 15 puntos porcentuales (por ejemplo, del 55% al 45%), basado en la tecnología actual. Se espera que la amplia aplicación generalizada de esta tecnología resulte en la evolución que conduce a una mejora considerable en su rendimiento. El costo de evitar emisiones de CO₂ es de 40-60 dólares por tonelada de CO₂ (en función del tipo de planta y donde se almacena el CO₂), que es comparable a otros medios que logran grandes reducciones de emisiones.

Después de haber capturado el CO₂, tendría que ser almacenado de forma segura durante cientos o incluso miles de años, a fin de evitar que lleguen a la atmósfera. Los principales yacimientos, adecuados para el almacenamiento, se han identificado bajo la superficie de la tierra y en los océanos. El trabajo para desarrollar muchas de estas opciones, está en curso.

El almacenamiento subterráneo de CO₂ ha tenido lugar durante muchos años como consecuencia de la inyección de CO₂ en campos petroleros para aumentar la recuperación. Ahora, por primera vez, el CO₂ es deliberadamente almacenado en un yacimiento de agua salada en el Mar del Norte por motivos de cambio climático. La capacidad potencial para el almacenamiento subterráneo es grande. Otros sistemas de almacenamiento geológico están en desarrollo y los planes para su seguimiento están muy avanzados.

1.8. Panorama futuro para la captura de CO₂ y la tecnología de almacenamiento.

La utilización de energéticas no renovables a nivel global es cada vez más limitada por razones ambientales. Se prevé que las fuentes de energía en el futuro tendrán que evolucionar para reducir al mínimo la liberación de contaminantes. Al final los combustibles fósiles serán sustituidos gradualmente por tecnologías de conversión más limpias. Estas, a su vez, serán sustituidas por formas de energía renovables. Es probable que la captura y almacenamiento de CO₂ desempeñe un papel importante en esta transición.

Reducir las emisiones de GEI a la atmósfera mediante el almacenamiento de dióxido de carbono en formaciones geológicas es una tecnología potencial de transición para permitir el uso prolongado de combustibles fósiles y reducir al mínimo sus efectos sobre el medio ambiente sin embargo no es la única ni se debe depender en su totalidad de ello. El mundo está pasando de la actual economía basada en energía fósil hacia una economía basada en energía renovable. Teniendo en cuenta que el consumo de energía aumentará en el futuro, que el porcentaje actual de energías limpias renovables en la mezcla energética es pequeña, una cantidad significativa de tiempo se necesitará para hacer la transición de un mundo predominantemente dependiente de energía de combustibles fósiles a una basada en energía renovable. Sin embargo, dado el advenimiento del cambio climático y las graves consecuencias que podría tener para el medio ambiente mundial y la salud humana, no podemos seguir utilizando combustibles fósiles, especialmente carbón, como lo hemos estado utilizando en el pasado.

El concepto de almacenamiento de CO₂ (captura y almacenamiento en formaciones geológicas), permite una transición que se realizó entre los patrones actuales de uso de la energía y los que deben prevalecer en el futuro. Así, con combustibles fósiles con cero emisiones (ZEFF) se pueden generar menores emisiones de GEI.

CAPITULO 2

MÉTODOS DE CAPTACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂).

2. Captura de CO2 (Diferentes métodos de secuestro de CO2).

2.1. 1er. Generación: pre-combustión.

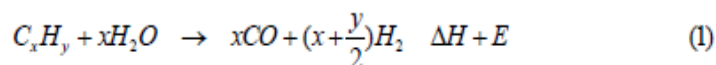
Los procesos de captura de CO2 previos a la combustión se basan de forma muy resumida en la transformación del combustible primario en una corriente de gases cuyos principales componentes son CO2 y H2, que pueden ser separados de forma relativamente sencilla por sus concentraciones y presiones disponibles. Las tecnologías de captura en pre-combustión pueden ser aplicadas a todos los recursos fósiles, tales como gas natural, fuel y carbón, haciéndose extensible también a la biomasa y residuos.

Se pueden distinguir tres pasos principales en el aprovechamiento de combustibles primarios con captura en pre-combustión:

* Reacción de producción de gas de síntesis.

Procesos que llevan a la generación de una corriente compuesta principalmente por hidrógeno (H2) y monóxido de carbono (CO) a partir del combustible primario. Los procesos comerciales actuales que se utilizan se basan en los siguientes procesos químicos, o sus combinaciones:

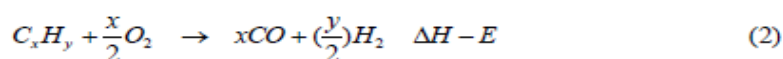
a) Reformado con vapor de agua. El agua actúa como agente oxidante. Reacción endotérmica que se puede sintetizar del siguiente modo:



Para mantener la reacción requiere un aporte energético, y para mejorar la cinética requiere catalizador de la reacción.

Es el proceso más extendido y estandarizado por la disponibilidad de gas natural principalmente

b) Reacción con oxígeno. El combustible primario se oxida con una cantidad limitada de oxígeno produciendo un gas formado principalmente por CO e hidrógeno. Cuando se aplica a combustibles gaseosos y algunos líquidos esta reacción se denomina „oxidación parcial“ y cuando se aplica a combustibles sólidos u otros líquidos se conoce como gasificación. Es una reacción exotérmica que se puede expresar del siguiente modo:

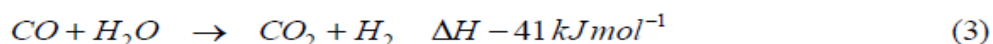


La oxidación parcial produce menos cantidad de hidrógeno por unidad de combustible primario aportado que el reformado, pero los tiempos de reacción son menores, los reactores son más reducidos, y no requiere catalizador ni aporte energético. El rendimiento en cuanto a “eficiencia de gas frío” (energía en el gas obtenido respecto a energía del combustible primario utilizado) es menor que en el reformado, pero admite un rango de combustibles primarios más amplio y la eficiencia térmica global puede ser similar a la obtenida con el reformado, dependiendo de la escala, procesos particulares, e integración.

También permite añadir agua como segundo agente oxidante, lo que incrementa el H₂ obtenido y la “eficiencia de gas frío”.

2) Reacción gas-agua (shift) para convertir el CO del gas de síntesis en CO₂. La reacción se puede expresar según la siguiente fórmula y su objetivo es convertir el CO del gas de síntesis que se obtuvo en el primer paso en CO₂ manteniendo la mayor parte de la energía del CO en la corriente gaseosa resultante. Al utilizar agua como agente oxidante se obtiene hidrógeno:

La reacción requiere catalizador que optimiza la cinética y la temperatura de trabajo.



3) Separación del CO₂. Esta etapa tiene como objetivo separar el CO₂ de la corriente de gas que está formada principalmente por CO₂/H₂, existiendo varios procedimientos. La concentración de CO₂ en esta corriente puede estar comprendida entre el 15-60% en base seca y la presión de la corriente entre 2- 7MPa. El CO₂ separado queda disponible para su almacenamiento.

Dependiendo del grado de captura que se aplique, del combustible primario utilizado, y del proceso seguido, la composición del gas producido es mayoritariamente hidrógeno, con alto contenido de nitrógeno solo si se utiliza aire como agente oxidante, y con otros componentes minoritarios que son básicamente CO y CO₂.

Esta corriente puede utilizarse:

- a) Como combustible descarbonatado directamente, en calderas o turbinas de gas.
- b) Como base para la obtención de hidrógeno puro como producto para otras aplicaciones.

c) Para producir nuevos combustibles o productos químicos líquidos con mayores ratios H/C a partir del gas de síntesis, por medio de otros procesos, de los que el más extendido es el proceso Fischer-Tropsch para producir diésel.

2.2. Tecnologías existentes.

2.2.1. Reformado con vapor de gas natural o hidrocarburos ligeros (SMR).

Es la tecnología dominante actualmente para producir hidrógeno en los países con disponibilidad de gas natural. Por ser el combustible de alimentación gas natural, el proceso se conoce como reformado de metano con vapor de agua (en inglés SMR), aunque se aplica también a hidrocarburos ligeros. Existen plantas que producen hasta 480 t/día de H₂, con sus correspondientes hasta 2.500 t/día de CO₂ que es venteado o utilizado en la industria alimentaria.

Como paso previo al reformado es necesaria la eliminación del azufre del combustible de alimentación, ya que es un veneno para el catalizador de base níquel que se utiliza para la reacción gas-agua. Esta reacción de reformado con adición de vapor de agua (1), se produce sobre el catalizador a alta temperatura (800-900 °C). El calor necesario para la reacción se aporta por medio de la combustión de una parte del combustible. La corriente de gas reformada se refrigera en una caldera de calor residual donde se genera el vapor necesario para las reacciones (1 y 3). Se genera vapor en exceso en relación al necesario para la planta; otra posibilidad es emplear el gas de síntesis caliente para aportar el calor necesario en un intercambiador que constituyese un segundo reactor de reformado tubular. Así se evita el exceso de producción de vapor, aumenta la producción de H₂, y sube el rendimiento.

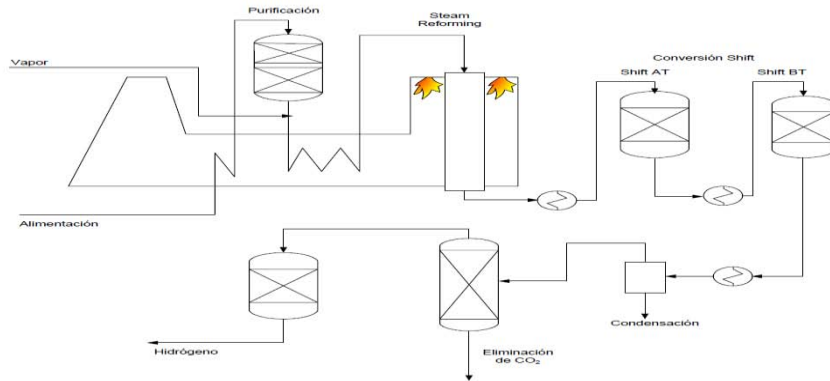


Figura 2.1. Proceso de reformado con vapor con captura de CO2. Fuente: Plataforma Tecnológica Española del CO2

La corriente de gas se lleva a un reactor shift, de una o dos etapas, donde la mayor parte del CO pasa a CO₂. Un reactor shift de dos etapas puede reducir la concentración de CO hasta un 0,2%. Los reactores shift de alta temperatura funcionan a temperaturas entre 400 y 550 °C, y usando catalizadores de hierro-cromo dejan entre un 2-3% de CO en la corriente de salida. También se usan catalizadores de base cobre a temperaturas entre 180 y 350 °C, que dejan entre el 0,2 -1% de CO en la salida.

Los procesos de separación de CO₂/H₂, que se utilizan son:

- * Absorción química: Alta eficiencia y utilizable a bajas presiones.
- * Absorción físico-química: Mejor eficiencia energética pero utilizable a presiones superiores a 2 MPa.
- * Adsorción: Requiere grandes cantidades de adsorbente, pero su selectividad al H₂ es alta, por lo que se utiliza en corrientes pequeñas o para purificar el H₂ obtenido en un proceso de separación anterior.
- * Membranas: Actualmente bajo porcentaje de recuperación del H₂, por lo que se aplican para separar una fracción del H₂ contenido en el gas, pero no se obtiene una corriente de CO₂ concentrado lista para almacenamiento.
- * Criogenia: Muy alto consumo energético. Solo es aplicable en procesos donde los productos del proceso criogénico tienen un valor añadido alto.

Lo más extendido actualmente es la separación del CO₂/H₂ por absorción físico-química, que produce una corriente de CO₂ lista para su almacenamiento o utilización, y una corriente rica en H₂ que puede utilizarse

directamente como combustible, o que se purifica en unidades PSA (Pressure Swing Adsorption) para conseguir purezas de entre 90 y 99,999 % según su especificación final.

Los procesos de separación de CO₂ e H₂ mencionados son aplicables en general a todos los procesos de separación en pre-combustión.

2.3. Separación de CO₂ - Procesos químicos con absorbentes.

Los absorbentes químicos también se usan para eliminar el CO₂ del gas de síntesis a presiones parciales por debajo de 1,5 MPa y son similares a los usados en los métodos de captura en postcombustión. Se elimina el CO₂ del gas de síntesis, tras el proceso shift, por medio de una reacción química que puede invertirse por reducción de presión y por calentamiento. El proceso más usado a nivel industrial es el basado en aminas MDEA (Metil DiEtanol Amina), por su alto rendimiento.

2.4. Separación de CO₂ - Procesos físicos con absorbentes.

Los procesos de absorción física son aplicables principalmente a corrientes con altas presiones totales o altas presiones parciales de CO₂. La regeneración del disolvente se produce por liberación de presión en una o más etapas. Si se necesita más regeneración se puede purgar el disolvente por calentamiento. El consumo energético es moderado, pues sólo es necesaria la presurización del disolvente (bombeo de líquido).

Los procesos comerciales más extendidos son el Rectisol y Selexol. Para el caso de captación conjunta del CO₂ y H₂S se ha desarrollado el Sulphinol.

2.5. Tecnologías emergentes para la separación de CO₂.

Se citan a continuación las diversas tecnologías que se están planteando como alternativas a las comercialmente existentes y que se encuentran generalmente en fase de ensayos de laboratorio o en plantas de demostración de escala de laboratorio.

2.5.1. Reacción de adsorción mejorada (SER).

Consiste en el uso de un lecho empacado que contiene una mezcla de catalizador y adsorbente selectivo para eliminar el CO₂ de la zona de reacción a alta temperatura. El adsorbente se regenera periódicamente utilizando un sistema de adsorción oscilante de presión o por temperatura (PSA, TSA) por medio de vapor.

Reactores de membrana para producción de hidrógeno con captura de CO₂

Algunas membranas inorgánicas ofrecen la posibilidad de combinar los procesos de reacción gas-agua y separación a alta presión y temperatura.

La combinación de la separación y de la reacción en reformado de vapor en membrana y/o conversión shift en membrana ofrece alto grado de conversión por el desplazamiento hacia la derecha en las reacciones (1) y (3) debido a la separación del hidrógeno. Con esta técnica se pueden reducir las temperaturas de reformado a 500-600 °C, produciéndose la conversión shift en ese mismo rango de temperaturas.

2.5.2. Reformado en micro canales.

Se puede aplicar la tecnología de micro reactores para llevar a cabo el SMR o POX de baja temperatura. Un reactor SMR consiste en conductos alternativos aleteados, revestidos de catalizador. El calor producido por la combustión catalítica de la mezcla de gas combustible y aire se transmite por conducción al conducto adyacente, que se alimenta con la mezcla vapor/hidrocarburo para que se produzca la reacción de reformado. Estas unidades se desarrollan actualmente a pequeña escala para producción de H₂ para celdas de combustible, pero pueden ser prometedoras para plantas grandes de H₂.

2.6. 1er. Generación: Oxidación.

Las tecnologías que pueden ser empleadas para la captura de CO₂ precisan todas ellas el empleo de técnicas de separación que permiten transformar las corrientes en las que actualmente el CO₂ aparece como un gas diluido en otras corrientes altamente concentradas en CO₂, con las condiciones adecuadas para su transporte e inyección en un almacenamiento profundo. Las concentraciones de CO₂ en los gases procedentes de los diferentes procesos varían entre el 4% (ciclo combinado de gas natural) y algo más del 30% (fabricación de cemento), siendo habitual una media de 12-15% en la combustión del carbón. En todos los casos será necesario someter esas corrientes a diversos tratamientos de separación para conseguir unas concentraciones mucho más elevadas, con la finalidad de reducir costes de compresión y transporte y para eliminar las impurezas hasta los niveles que exija la normativa para su almacenamiento geológico.

Una opción para concentrar el CO₂ presente en los gases de combustión consiste en retirar todo o gran parte del N₂ del aire comburente antes de su introducción en el proceso. Esta es la idea que sustenta la alternativa de captura denominada oxidación, que se caracteriza porque la combustión tiene lugar empleando oxígeno de pureza variable como corriente de comburente fresco, en vez de aire. No obstante, ésta corriente no puede utilizarse de forma directa en la combustión, pues las temperaturas de llama así obtenidas estarían muy por

encima de los límites tolerables por los materiales que conforman el recinto donde tiene lugar el proceso. Para evitar este problema se utiliza una corriente de atemperación consistente en gases recirculados de la propia combustión, que se mezcla con el comburente fresco para reducir la temperatura de hogar y facilitar la transferencia de calor. Con este procedimiento se consigue de forma directa una corriente que está constituida casi exclusivamente por CO₂ y H₂O a la salida de la instalación de combustión, de la que el H₂O puede ser fácilmente eliminado por condensación. En este caso el tratamiento de separación no se realiza directamente sobre los gases de combustión para capturar el CO₂, como ocurre en la postcombustión, sino que debe ser efectuada previamente sobre la corriente de aire para obtener O₂ puro, normalmente mediante técnicas criogénicas. En la alternativa de pre combustión es necesario el empleo de técnicas de separación tanto para el O₂ del aire como para el CO₂ de la corriente de reformado.

En la actualidad no existe ninguna instalación industrial operando en condiciones de oxicomustión con el fin de capturar CO₂. Todas las actuaciones en este ámbito se encuentran en fase de investigación y desarrollo.

La combustión convencional de los combustibles fósiles se lleva a cabo utilizando el aire ambiente como comburente. Ello conduce a que el nitrógeno presente en el aire en una proporción del 79% en volumen, constituya también el compuesto mayoritario de los gases de salida del proceso, reduciendo con ello la concentración del CO₂ presente en esos gases hasta valores que pueden variar entre el 4 y el 15%. En cualquier otro proceso industrial susceptible de aplicación de las tecnologías CAC, la concentración de CO₂ no suele sobrepasar el 30% en volumen. Esto encarece de manera significativa la captura de CO₂ mediante procesos de absorción química en postcombustión, que son los más próximos a estar disponibles en el mercado para este tipo de aplicaciones, dados los elevadísimos caudales de gas a tratar.

Una forma de reducir sustancialmente el caudal de gases de combustión consistiría por tanto en prescindir del N₂ en la corriente de comburente, que al fin y al cabo tiene un papel de mero acompañante del O₂, ya que no participa en el proceso de combustión. Se denominan procesos de oxicomustión a aquellos en los que la combustión tiene lugar cuando se alimenta como gas comburente oxígeno de alta pureza (típicamente 95% en volumen), en proporciones próximas a las estequiométricas en relación a la composición del combustible. De ello se deriva un gas de combustión que contiene fundamentalmente CO₂ (> 90-95% en base seca), vapor de agua, pequeñas cantidades de gases nobles y, en función de la composición del combustible, SO_x, NO_x y cenizas.

Para controlar la temperatura del hogar es necesario recircular una parte de los gases de salida, reintroduciéndolos en la caldera junto con el O₂ entrante. Se consigue con ello asegurar un flujo de gas suficiente para permitir la adecuada transferencia de calor al ciclo de agua-vapor en el caso de centrales de producción de energía eléctrica. La recirculación puede ser húmeda (si se toma de la corriente de gases de

combustión tras separación del NOx y/o las partículas) o seca (si se toma tras la condensación del agua y, según los diferentes esquemas, exenta o no de SOx y NOx).

La oxidación, asociada a la separación y compresión del CO₂ es una tecnología de emisiones próxima a cero, que puede ser potencialmente aplicada a instalaciones tanto existentes como nuevas, para cualquier tipo de combustible. Los esfuerzos en desarrollo han ido preferentemente dirigidos hacia su estudio con carbón y con gas natural, por ser los combustibles más abundantemente utilizados en la producción de energía eléctrica, que ha sido el campo pionero en la investigación de la CAC. Es evidente que se requieren algunas modificaciones de las configuraciones usuales para incorporar la separación de O₂, recirculación de gases, secado de gases, separación, compresión, transporte y almacenamiento de CO₂. Esta opción, según diversos estudios de análisis de costes, resulta más eficiente que la de combustión convencional dotada de captura en postcombustión.

En la Figura 2.3 se muestra el esquema de una instalación de captura vía oxidación aplicada a una caldera de carbón pulverizado, con indicación de las diferentes etapas de proceso y de las nuevas entradas de energía y necesidades de refrigeración que precisa la oxidación frente al caso de una instalación convencional que opera con aire. Se incluye una planta de separación de aire por vía criogénica (ASU), los sistemas de depuración de gases (DeSox, DeNox y eliminación de partículas) adaptados a las nuevas características de los gases efluentes, una eventual unidad de purificación final de los gases para adaptar su composición a los límites que finalmente marque la normativa para el transporte y almacenamiento y, finalmente, el sistema de compresión. Igualmente, la instalación deberá estar dotada de las corrientes de recirculación primaria (utilizada para el secado y transporte del combustible) y secundaria (introducida directamente en la caldera como corriente de comburente).

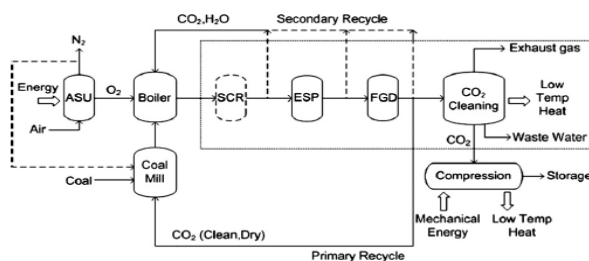


Figura 2.2. Diagrama simplificado de una central de oxidación para la captura de CO₂ térmica de

En la Figura 2.4 se recoge un esquema simplificado con la composición que presentarían los gases en caso de combustión convencional con aire, oxidación sin recirculación y oxidación con recirculación, en cada una de las filas. Tomando como referencia la composición y caudal de gases de un carbón tipo (primera fila de

combustión convencional), se puede apreciar la alta concentración en CO₂ que alcanzan los gases en el caso de oxicomcombustión con recirculación y la notable reducción de caudal que se consigue frente a la opción de combustión convencional, en torno al 35% (tercera fila).

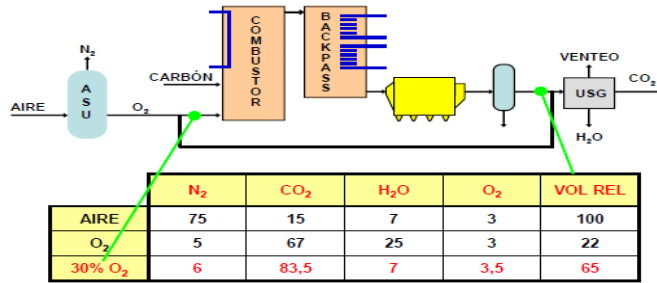


Figura 2.3. Composición de los gases de oxicomcombustión de carbón en comparación con la combustión convencional.

2.7. 1er. Generación: Post-combustión.

La idea principal de esta tecnología es separar el CO₂ tal y como se encuentra en los gases de salida al quemar aire y un combustible fósil o biomasa, sin haber realizado ninguna operación previa a la combustión. Actualmente, la infraestructura energética mundial se basa en procesos mayoritariamente de combustión con aire (centrales térmicas, cementeras, refinerías, cerámicas, etc.), por lo tanto esta opción es de gran relevancia dado que se puede añadir a instalaciones existentes que son grandes focos emisores de CO₂ (retrofitting).

Tras la combustión de un combustible fósil con aire, el CO₂ se encuentra bastante diluido dado que los gases de salida son fundamentalmente nitrógeno y oxígeno. El CO₂ tiene que ser separado del gas de salida antes de ser emitido a la atmósfera, por lo tanto en este proceso los gases de salida pasan a través de un equipo de separación de CO₂, instalado justo antes de la chimenea, que está basado en un ciclo de la absorción-desorción. La absorción de CO₂ se basa en la retención selectiva del CO₂ contenido en la mezcla de gases al entrar en contacto con un líquido absorbente o un sorbente sólido debido a las interacciones físicas o químicas de su molécula con un solvente.

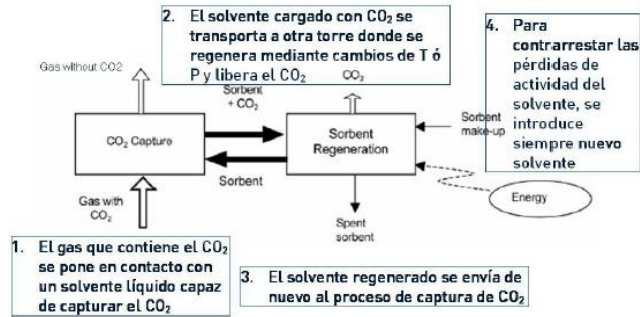


Figura 2.4. Ciclo de Absorción-Desorción.

Una vez que el CO₂ está retenido en el solvente o sorbente, el resto de los humos se ventean a la atmósfera. Posteriormente el CO₂ es separado del solvente o sorbente sólido formando un gas con una pureza de CO₂ mayor de 90% que está comprimido y deshidratado para su futuro transporte desde la central a un lugar de almacenamiento. La Figura 2.5 muestra el esquema de la captura en post-combustión en una Central Térmica de carbón pulverizado.

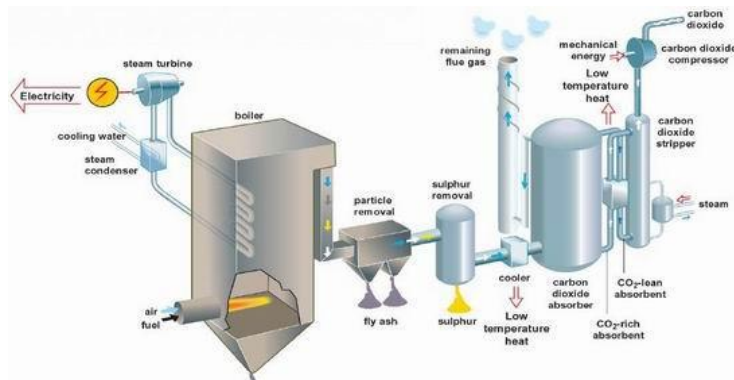


Figura 2.5. Esquema de la captura en post-combustión en una Central Térmica (fuente Vattenfall)

Como se ha mencionado anteriormente, el CO₂ aparece diluido en los gases de salida que se emiten a la atmósfera debido al gran contenido de nitrógeno del aire utilizado en la combustión. Por ejemplo el CO₂ está a una concentración de 12% a 15% en centrales térmicas de carbón o de 3% a 5% en ciclos combinados. El principal problema de la captura en post-combustión es debido al hecho que el CO₂ está diluido en una corriente de gas con muy alto flujo y sin presión que resulta más difícil de separar que si estuviera concentrado. El reto principal para la tecnología es minimizar el consumo de energía que repercute en una pérdida de eficiencia para separar el CO₂ del solvente y concentrarlo, y en el alto coste de la inversión requerida para la

planta de captura dado que la planta tiene que ser dimensionada para el 100% de flujo de los gases de salida. Hay que tener en cuenta que una central térmica de carbón pulverizado, emite ~750 kg de CO₂ para cada MWh de electricidad generada, es decir una central térmica de 550MWe emite ~10.000 t/día de CO₂.

Con respecto a los solventes o sorbentes sólidos previstos para la primera generación de plantas de captura en post-combustión, la Plataforma Tecnológica Europea de Plantas sin Emisión de CO₂ (ZEP, en inglés) ha completado su trabajo de definición de las opciones que deben contemplarse para el conjunto de las 10-12 plantas demo a escala completa a construir en Europa previsto para entrar en operación en el 2015 y concluye que el proceso de absorción con un solvente de aminas o amoniaco enfriado (Chilled Ammonia) son los únicos suficientemente maduros para poder ser escaladas y probadas con garantía dentro de las primeras generaciones de plantas. Coherentemente con este análisis se han dejado fuera ciertas tecnologías de I+D con un plazo mayor de desarrollo tales como los adsorbentes con un solvente (tales como los líquidos iónicos, que también pueden llegar a tener absorción química), los sólidos regenerables como carbones activos, arcillas pilareadas, óxidos metálicos y zeolitas, las membranas de separación y el ciclo de carbonatación calcinación.

2.8. Absorción química empleando aminas.

Los procesos de absorción química de CO₂ empleando disoluciones acuosas de alcanolaminas, como la monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), trietanolamina (TEA) y metildietanolamina (MDEA) constituyen el método más utilizado industrialmente para la separación de CO₂ de un flujo de gases, siendo una tecnología madura en el campo de la purificación de gas natural y la producción de CO₂ para usos comerciales (industria alimentaria, producción de NH₃ y urea para la producción de fertilizantes).

La base de todos estos procesos es la reacción de una base alcalina, normalmente aminas, en medio acuoso con un gas ácido. El layout y un diagrama del proceso típico para un sistema de aminas se puede observar:

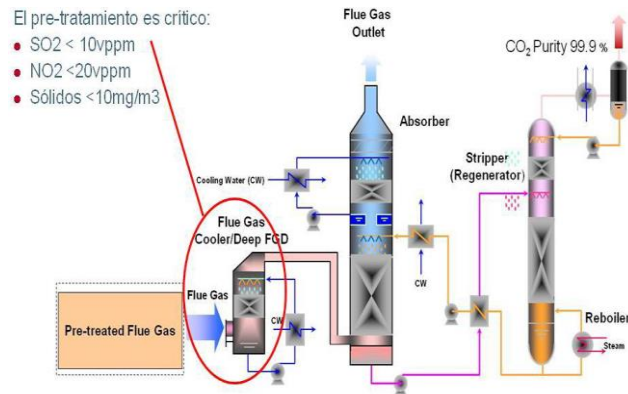


Figura 2.6. Layout de proceso de absorción Fuente: Mitsubishi

En el caso de aminas la etapa de purificación de gases antes de la separación del CO₂ es crítica y consiste en un lavado de agua. Posterior a la purificación de gases, es probable que haya que enfriar el gas entre 40°C a 60°C antes de ponerlo en contacto con el absorbente en la columna de absorción. Es necesario introducir un ventilador para vencer la caída de presión que se produce en el proceso. Los gases de salida que contienen el CO₂ se introducen por la parte inferior del absorbedor y ascienden por éste, pasando a contracorriente con la disolución de absorbente. En esta columna se encuentran en la parte superior con un lavado con agua para eliminar cualquier partícula de absorbente que haya sido arrastrada antes de salir del absorbedor.

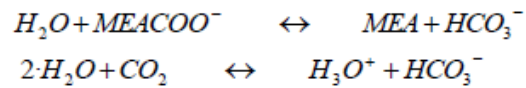
La principal ecuación química que ocurre en el proceso de absorción es la siguiente:



Es posible reducir la concentración de CO₂ a la salida a valores muy bajos, pero los valores de concentración muy bajos conllevan aumentos en la altura de la columna de absorción.

La solución rica en CO₂, denominada absorbente rico, sale por la parte inferior de la torre y se calienta mediante un intercambiador de calor a contracorriente con la disolución de absorbente regenerado proveniente de la columna de regeneración. Posteriormente está solución enriquecida es bombeada a la parte superior del regenerador, que funciona por intercambio térmico. La regeneración del solvente se lleva a cabo a elevadas temperaturas (100 - 140°C) y presiones no mucho mayores que la atmosférica. La regeneración implica una penalización de energía térmica en el calentamiento del solvente, para conseguir la desorción del CO₂ atrapado previamente. El vapor se recupera en un condensador y se devuelve a la columna de regeneración. El solvente se devuelve a la columna de absorción atravesando un intercambiador de calor regenerativo.

Las principales ecuaciones químicas que rigen el proceso de regeneración son las siguientes:



En la práctica se pueden conseguir recuperaciones típicas de entre 80% y 95%. La elección de la recuperación exacta es un parámetro con una influencia económica muy grande, ya que a medida que se aumenta la recuperación es necesario aumentar la altura de la columna de absorción. Otro beneficio de este proceso es que la concentración del CO₂ recuperado de un proceso de absorción química basado en aminas es del 99,9% en volumen, dado que se han removido los otros contaminantes antes de la separación. Una vez separado el CO₂ hay que comprimirlo de condiciones ambientales a condiciones supercríticas.

El EPRI (Electric Power Research Institute) de Estados Unidos ha identificado más de 20 diferentes procesos de absorción basados en aminas, no obstante en este momento los siguientes dos procesos de absorción están disponibles comercialmente para sistemas de captura después de la combustión:

*Fluor Daniel, ECONAMINE FG: Este proceso está basado en la utilización del MEA con una concentración del 30% en peso. Incorpora un inhibidor para resistir la corrosión del acero y otros compuestos. Está especialmente pensado para corriente con un alto contenido de oxígeno. La capacidad más grande existente es de 320 tCO₂ diarios y está utilizado en más de 20 plantas en los sectores químico y alimentario. La empresa ha introducido una versión Plus en una central de lignito en Cañada.

*Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, KS1: Este proceso se basa en la utilización de una amina con impedimento estérico, conocido como KS1. Fue comercializado en aplicaciones para la producción de urea. La capacidad más grande existente es JEPSCO en Malasia, que forma parte de una planta de amoniaco/urea de Petronas, Su capacidad de captura de CO₂ de 210 T/día. Se trata de una tecnología que es interesante para bajas presiones parciales de la corriente de gases a tratar y parece más eficiente que MEA. Precisa, sin embargo, de una mínima presencia de impurezas en los gases a tratar, el límite de SO₂ es <1vppm.

Además de las dos ofertas comerciales, los siguientes tres suministradores han terminado programas extensivos de pruebas y están a punto de ofrecer diseños comerciales:

*Aker Clean Carbon, Noruega; es la tecnología utilizada en Sleipner para separar el CO₂ del gas. En Sleipner el solvente es MEA, pero Aker ya ha anunciado que tiene un nuevo solvente optimizado. La empresa trabaja con IBERDROLA en el proyecto de Longannet en Escocia.

*CANSOLV, Cañada: El proceso utiliza dos solventes para eliminar SO₂ y CO₂ al mismo tiempo. E.ON está construyendo una planta piloto de esta tecnología en Heyden Alemania.

* HTC Pureenergy: Ciclo de absorción-desorción empleando solventes propios,

Adicionalmente destacan los desarrollos de Alstom (con BASF) y Siemens que tienen en marcha programas de desarrollo de nuevos solventes. Las dos empresas dicen que sus tecnologías van a estar disponibles en el 2015.

2.9. Tecnologías basadas en óxidos de calcio.

Son sistemas de pre-combustión basados en la reacción de carbonatación de la cal a altas presiones y temperaturas, que integra además la gasificación del combustible, la reacción de conversión shift y la eliminación in-situ del CO₂ con CaO.

La regeneración del sorbente por medio de la calcinación de la caliza produce CO₂ de alta pureza.

Los desarrollos basados en este concepto pueden diferir bastante dependiendo de las tecnologías usadas en los procesos, y del producto final buscado. Este sistema está en las etapas iniciales de desarrollo, y se dirigen a la producción de electricidad y/o H₂ y cemento a gran escala.

Gasificación o reformado por “chemical looping”

Otro sistema que se está investigando para la producción de gas de síntesis es el de “chemical looping”. Cuando la cantidad de oxígeno aportada por los óxidos de metal al reactor reductor está por debajo de la estequiometría, se produce la reacción del combustible hacia CO y H₂. Luego se convierte el CO a CO₂ de forma similar al proceso general (shifting).

2.10. Adsorción de CO₂ (sólido-gas).

2.10.1. Fenómenos de superficie.

Adsorción.

Los procesos en las superficies gobiernan muchos aspectos de la vida cotidiana, incluyendo la vida misma. Aunque se limite la atención a las superficies sólidas, la importancia de los procesos apenas se reduce. La viabilidad de una industria está determinada bien constructivamente, como en la catálisis, o bien destructivamente, como en la corrosión, por procesos que tienen lugar en las superficies sólidas. Por otra parte, en los sistemas biológicos, la transferencia de materiales hacia el interior y hacia el exterior de las células tiene

lugar mediante adsorción sobre la membrana celular, penetración en la misma y desorción en la superficie opuesta de la membrana.

Se llama adsorción al fenómeno de acumulación de partículas sobre una superficie. La sustancia que se adsorbe es el adsorbato y el material sobre el cual lo hace es el adsorbente. El proceso inverso de la adsorción es la desorción.

* La adsorción es altamente selectiva. La cantidad adsorbida depende en gran medida de la naturaleza y del tratamiento previo al que se haya sometido a la superficie del adsorbente, así como de la naturaleza de la sustancia adsorbida. Al aumentar la superficie de adsorbente y la concentración de adsorbato, aumenta la cantidad adsorbida.

* Es un proceso rápido cuya velocidad aumenta cuando aumenta la temperatura, pero desciende cuando aumenta la cantidad adsorbida.

* Es un proceso espontáneo, es decir, que ΔG es negativa, y en general está asociada con un aumento en el orden del adsorbato, lo que significa que ΔS es negativa, por lo cual, y de acuerdo con la ecuación $G = H - T \Delta S$, es generalmente exotérmica, lo que quiere decir que ΔH es negativo. El cambio en la entalpía cuando un mol de adsorbato es adsorbido por la cantidad apropiada del adsorbente se conoce como la entalpía de adsorción.

Son muchos los tipos de adsorción existentes (sólido-gas, sólido-líquido, líquido-gas...), pero esta práctica se ceñirá al estudio de la adsorción sólido-líquido. Los sólidos son capaces de adsorber uno o más componentes de una mezcla líquida, o bien el soluto o el disolvente de una solución.

Atendiendo a las fuerzas de interacción entre las moléculas de adsorbente y adsorbato, se acepta la existencia de dos tipos fundamentales de adsorción. Cuando estas fuerzas son del tipo dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido o fuerzas de dispersión, se usa el término de adsorción física o fisorción. Cuando las fuerzas son enlaces covalentes se aplica el término de adsorción química o quimisorción.

La adsorción física está asociada con una entalpía de adsorción numéricamente inferior a -40 kJ mol^{-1} , mientras que valores numéricamente mayores a -80 kJ mol^{-1} son característicos de la quimisorción. La entalpía de adsorción física es comparable a la entalpía de condensación, mientras que la entalpía de quimisorción es comparable a la entalpía de las reacciones químicas.

La adsorción física es la más frecuente, mientras que la quimisorción se manifiesta, únicamente, cuando el adsorbente y el adsorbato tienden a formar un compuesto.

En general, el proceso de adsorción física puede invertirse con facilidad; por el contrario, la quimisorción es difícil de revertir y generalmente tiene lugar con mayor lentitud que en el caso anterior.

La capa adsorbida en la adsorción física puede variar en espesor, desde una molécula a muchas moléculas, debido a que las fuerzas de Van der Waals se pueden extender desde una capa de moléculas a otras. En cambio, la quimisorción no puede, por sí misma, dar lugar a una capa de más de una molécula de espesor, debido a la especificidad del enlace entre el adsorbente y el adsorbato. Sin embargo, cabe que capas subsiguientes de varias moléculas puedan estar físicamente adsorbidas sobre la primera capa.

Algunas de las reacciones industriales más importantes comprenden la catálisis heterogénea - i.e., el uso de un catalizador presentado en una fase distinta a las especies reaccionantes, usualmente un catalizador sólido en contacto con una disolución gaseosa o líquida de los reactivos. Tal catálisis, superficial o heterogénea, se cree que se efectúa por adsorción química de los reactivos sobre la superficie del catalizador.

Los catalizadores de superficie se emplean en los convertidores catalíticos de los automóviles para convertir sustancias que pueden ser contaminantes atmosféricos, por ejemplo CO y NO en sustancias inocuas, por ejemplo CO₂ y N₂.

A temperatura constante, la cantidad adsorbida aumenta con la concentración adsorbato y la relación entre la cantidad adsorbida (x) y la concentración (C) de la disolución en el equilibrio, se conoce como isoterma de adsorción. Sólo a muy bajas concentraciones x es proporcional a C. Por regla general, la cantidad adsorbida se incrementa menos de lo que indicaría la proporcionalidad a la concentración, lo que se debe a la gradual saturación de la superficie y, en muchos casos, la isoterma se puede representar por una ecuación de la forma:

$$\frac{x}{m} = K C^n$$

Siendo m la cantidad de sustancia adsorbente, K y n constantes para el sistema y temperatura dados. La constante n es, generalmente, menor que la unidad.

Esta expresión se conoce como isoterma de adsorción de FREUNDLICH.

Si tomamos logaritmos, quedará:

$$\log \frac{x}{m} = \log K + n \log C$$

Por lo tanto, al representar log x/m en función de log C dará una recta de pendiente igual a n y ordenada en el origen log K.

2.10.2. Adsorción de gases sobre sólidos.

Cuando una molécula de gas golpea una superficie sólida, puede rebotar o quedar fijada sobre la superficie, es decir, sufrir adsorción. En ese último caso a continuación, la molécula adsorbida puede difundirse (moverse) sobre la superficie, quedarse fija, sufrir una reacción química o disolverse en el interior del sólido (proceso conocido como absorción y del que es un conocido ejemplo el empleo de CaCl_2 anhidro como desecador: el agua de la atmósfera es adsorbida y a continuación absorbida para formar un hidrato). En este tema vamos a centrar nuestro estudio en el proceso de adsorción y a continuación los procesos de reacción (catálisis heterogénea) que pueden derivarse. Podemos definir el primero de estos procesos como:

* Adsorción: proceso de unión de una molécula procedente de otra fase sobre la superficie de un sólido.

* Desorción: proceso inverso a la adsorción.

Podemos distinguir dos comportamientos límites de adsorción, fisisorción y quimisorción, aunque es frecuente observar comportamientos intermedios

Adsorción física o fisisorción: las moléculas del gas se mantienen unidas a la superficie del sólido por medio de fuerzas de Van der Waals (interacciones dipolares, dispersión y/o inducción). Este hecho define todas las características propias de la fisisorción:

* Es una interacción débil.

* Es un proceso exotérmico (las fuerzas de van der Waals son atractivas) en el que los calores liberados, ΔH_{ads} (aprox. 20-40 kJ/mol) son semejantes a las entalpías de condensación de la sustancia adsorbida.

La energía liberada es adsorbida en forma de vibración por la red del sólido y $\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$ se puede medir por el aumento de temperatura de la muestra.

* La molécula fisisorbida mantiene su identidad ya que la energía es insuficiente para romper el enlace aunque su geometría puede estar distorsionada.

* La fisisorción es un proceso no específico ya que las fuerzas que intervienen no lo son y no existe una selectividad marcada entre adsorbato y adsorbente. En general, los gases muy polarizables son adsorbidos más fácilmente.

* La fisisorción se produce en multicapas. Sobre una capa de gas fisisorbida puede adsorberse otra. La ΔH_{ads} para la primera capa viene determinada por las fuerzas entre adsorbente (M) y adsorbato (A), mientras que la ΔH_{ads} para las capas siguientes depende de las interacciones A-A y por tanto es similar a la entalpía de condensación.

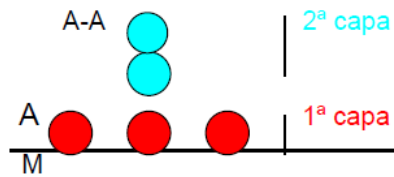


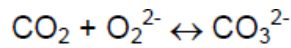
Figura 2.7. Modelo de adsorción de gas-sólido.

2.10.3. Adsorción química o quimisorción.

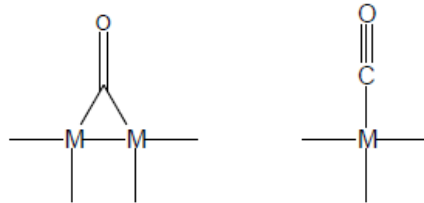
Fue propuesta por Langmuir en 1916. En este caso las moléculas de gas se mantienen unidas a la superficie formando un enlace químico fuerte. Este hecho define las características propias de la quimisorción:

- * Se trata de una interacción más fuerte que la fisisorción.
- * Las entalpías de quimisorción son mucho mayores que las de fisisorción y del orden de las que se liberan en la formación de enlaces químicos, $\Delta H^{\circ}_{ads} = - (100-500) \text{ kJ/mol}$. Si en la quimisorción se produce formación y rotura de enlaces podrían esperarse valores de ΔH°_{ads} tanto positivos como negativos (al igual que en las reacciones químicas ordinarias). Sin embargo, la quimisorción es exotérmica normalmente. La razón es que un proceso espontáneo requiere $\Delta G < 0$ y dado que la libertad de traslación del adsorbato se reduce, ΔS es menor que cero y necesariamente ΔH debe ser menor que cero. Puede haber excepciones si el adsorbato se disocia y tienen una movilidad elevada sobre la superficie. Ejemplo: el H_2 se adsorbe endotérmicamente sobre vidrio ya que aumenta la entropía $H_2 (g) \rightarrow 2H (vid) \Delta S > 0$
- * La quimisorción es específica. Por ejemplo el N_2 es quimiadsorbido a temperatura ambiente sobre Fe, W, Ca y Ti, pero no sobre Ni, Zn, Ag, Cu o Pb. El Au(s) quimisorbe O_2 , C_2H_2 y CO pero no H_2 , CO_2 o N_2 .
- * Dado que implica la formación de un enlace entre adsorbato y el adsorbente, el proceso se detiene tras la formación de una monocapa sobre la superficie. Aunque sólo una capa puede estar quimisorbida puede producirse adsorción física de nuevas capas de adsorbato sobre la primera.
- * En general, la quimisorción implica la rotura y formación de enlaces, por lo que la molécula quimisorbida no mantiene la misma estructura electrónica (enlaces) que en fase gaseosa.

La quimisorción de CO₂ sobre óxidos metálicos se produce por formación de iones carbonato.



El CO sobre metales puede formar dos tipos de enlace en función de la presión y del metal.



Las especies que tienen pares de electrones no compartidos o enlaces múltiples pueden ser quimisorbidas sin disociar, por ejemplo: CO₂, NH₃, C₂H₄.

2.11. Isotermas de adsorción.

En el caso de los líquidos, la adsorción de una sustancia en la interface se estudia a través de la variación de la tensión superficial con la concentración de tensioactivo:

$$d\gamma = -\Gamma_{2(1)}d\mu_2 \quad (1)$$

En el caso de los sólidos la tensión superficial no es una magnitud fácilmente determinable. Resulta mucho más sencillo medir directamente la cantidad de gas adsorbido a una temperatura dada en función de la presión P del gas.

¿Cómo se realiza esta medida experimentalmente?

Por lo dicho al principio del tema la superficie del sólido debe encontrarse inicialmente limpia, para lo que se calienta el sólido en alto vacío. Alternativamente puede evaporarse y recondensar el sólido en alto vacío, bombardear la superficie con iones o romper el cristal sólido en el vacío generando así una superficie limpia. El sólido se introduce entonces en un equilibrio con el sólido recipiente con una cantidad conocida de gas (a través de la presión por ejemplo) y se deja que se alcance el equilibrio.

¿Cómo conocer la cantidad adsorbida?

* Por la diferencia de presión del gas en ausencia o presencia de la superficie

* Por gravimetría

* Desorción en flash: se calienta rápidamente la superficie, desorbiendo el gas y midiendo el aumento de la presión

* Mediante trazadores radiactivos

* Métodos de flujo: se hace circular un gas y se determina la diferencia entre lo que entra y lo que sale.

Repetiendo el experimento a distintas presiones se obtienen datos de cantidad de gas adsorbido frente a la presión en equilibrio a una temperatura dada. Estos datos de cantidad de gas adsorbido frente a la presión de gas que queda en equilibrio tomados a una misma temperatura constituyen la Isoterma de adsorción. En las isotermas de adsorción de sólido se representa la presión de gas en equilibrio (P) en el eje X, mientras que en el eje Y se representa la cantidad adsorbida. Esta magnitud puede darse de diferentes formas:

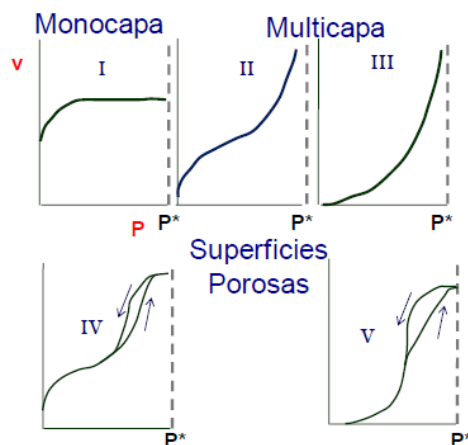
* Moles adsorbidos/gramos de adsorbente (n/m).

* Volumen de gas adsorbido/gramos de adsorbente (v), que es proporcional a la cantidad anterior.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{nRT}{mP} = \frac{RT}{P} \frac{n}{m}$$

(Por cuestiones históricas el volumen suele expresarse como el volumen que ocuparía el gas adsorbido si estuviese en condiciones normales T=273,15 K, P= 1 atm).

Con muy pocas excepciones las isotermas experimentales pueden clasificarse en cinco tipos de acuerdo con S. Brunauer.



Grafica 2.1. Isotermas experimentales pueden clasificarse en cinco tipos de acuerdo con S. Brunauer.

Antes de entrar en la descripción de cada una de ellas, hemos de darnos cuenta que las isotermas se detienen cuando se llega a la presión de vapor (P^* o P_{v} en la figura). A esta presión, cualquier pequeño aumento en la cantidad de gas produciría su condensación, aumentando entonces verticalmente la cantidad de gas “adsorbida” sobre el sólido (la presión en equilibrio sería siempre igual).

Tipo I: denominado isoterma de Langmuir, corresponde a una adsorción en monocapa. La cantidad adsorbida aumenta con P hasta alcanzar un valor límite correspondiente al recubrimiento de la superficie por una monocapa. Es la isoterma característica de un proceso únicamente de quimisorción.

Tipo II: es indicativo de una adsorción física en multicapa. El rápido ascenso inicial corresponde a la formación de la primera capa, que tiene en este caso una constante de formación mayor que para el resto de capas (la entalpía de formación de la primera capa es más negativa que para el resto de capas). Al seguir aumentando la presión se forma la segunda capa de moléculas adsorbidas, seguida de otras más.

Tipo III: corresponde también a una adsorción física en multicapas pero donde la constante de equilibrio de formación de la primera capa es igual que para las siguientes (no se observa diferencia entre el llenado de la primera capa y del resto).

Tipos IV y V: corresponde a adsorción en multicapas sobre materiales porosos. Difieren del Tipo II y III por la presencia de una rama horizontal (saturación) y un ciclo de histéresis (las curvas de adsorción y desorción difieren). El ciclo de histéresis es debido a la condensación por la forma irregular de los capilares.

2.12. Efecto de la temperatura sobre el equilibrio de adsorción.

Una vez deducido el modelo de la isoterma de Langmuir para la adsorción en monocapa, podemos discutir, desde diferentes puntos de vista, cuál es el efecto de la temperatura sobre dicho equilibrio.

- Dado que $\Delta H^{\circ}_{\text{ads}} < 0$, según el principio de Le Chatelier, al aumentar la temperatura el equilibrio se desplaza hacia los reactivos disminuyendo Θ . - A nivel molecular significa que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la movilidad de las moléculas adsorbidas sobre la superficie del sólido, con lo cual aumenta la probabilidad de que escapen de esta superficie. - También se puede razonar con la ecuación de Van't Hoff que nos da la variación de la constante de equilibrio con la temperatura como:

$$\left(\frac{\partial \ln K}{\partial T}\right)_P = \frac{\Delta H_f^0}{RT^2}$$

En el caso en el que la reacción es una adsorción, la ecuación de Van't Hoff se particulariza como:

$$\left(\frac{\partial \ln K}{\partial T}\right)_\theta = \frac{\Delta H_{\text{ads}}^0}{RT^2} \quad (19)$$

Si, como es habitual, $\Delta H_{\text{ads}}^0 < 0$ al aumentar la temperatura la constante de equilibrio disminuye.

¿Cómo se puede determinar ΔH_{ads}^0 utilizando la isoterma de Langmuir?

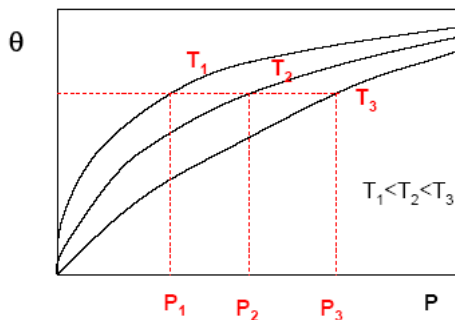
$$KP = \frac{\theta}{1-\theta} \quad \text{y tomando logaritmos} \quad \ln K + \ln P = \ln \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) \quad \text{Si mantenemos } \theta$$

Constante y variamos la temperatura, se obtiene:

$$\left(\frac{\partial \ln K}{\partial T}\right)_\theta + \left(\frac{\partial \ln P}{\partial T}\right)_\theta = 0 \quad (20)$$

$$\left(\frac{\partial \ln P}{\partial T}\right)_\theta = -\left(\frac{\partial \ln K}{\partial T}\right)_\theta = -\frac{\Delta H_{\text{ads}}^0}{RT^2} \quad (21)$$

De acuerdo con esta última expresión, podemos determinar la entalpía de adsorción isostérica (con grado de recubrimiento constante) midiendo la presión necesaria para alcanzar un cierto grado de recubrimiento a distintas temperaturas, tal y como se indica esquemáticamente en la siguiente grafica 2.2



Gráfica 2.2. Efecto de la temperatura sobre el equilibrio de adsorción

A medida que aumenta la temperatura, si la adsorción es exotérmica, hará falta una presión mayor para conseguir un mismo grado de recubrimiento. De esta gráfica podemos ir tomando parejas de valores (P, T) Θ . Como:

$$\left(\frac{\partial \ln P}{\partial 1/T}\right)_{\Theta} = -T^2 \left(\frac{\partial \ln P}{\partial T}\right)_{\Theta} = \frac{\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}}{R} \quad (22)$$

Si $\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$ es constante la representación de $\ln P$ frente a $1/T$ debe dar una línea recta cuya pendiente es $\Delta H^{\circ}_{\text{ads}} / R$.

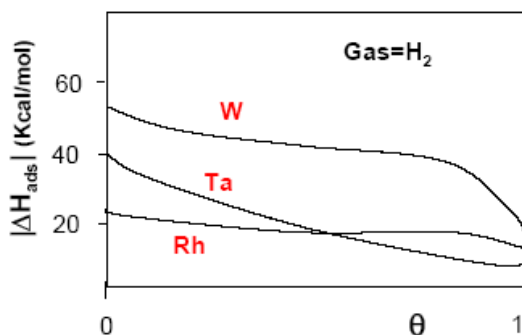
2.13. Limitaciones en la isoterma de Langmuir.

Las suposiciones usadas en la deducción de Langmuir no son completamente verdaderas:

*Las posiciones de adsorción no son totalmente equivalentes, en la superficie aparecen bordes, esquinas. Se ocuparán primero aquellas posiciones que den lugar a la formación de un enlace más estable.

* La interacciones entre las moléculas adsorbidas pueden ser significativas, influyendo el grado de ocupación sobre la afinidad entre adsorbato y adsorbente.

Como consecuencia de los dos puntos anteriores la entalpía de adsorción disminuirá a medida que Θ aumenta ya que primero se ocupan las posiciones de mayor energía de enlace y también a que a medida que la superficie se llena aumentan las repulsiones entre especies adsorbidas. Por lo tanto, la entalpía de adsorción no será constante, tal y como muestran las mediciones experimentales que aparecen en la siguiente grafica 2.3.



Gráfica 2.3. Limitaciones en la isoterma de Langmuir

*Puede existir movilidad de las moléculas adsorbidas a lo largo de la superficie, dando lugar a la ocupación de posiciones distintas.

* Sobre la monocapa quimisorbida pueden formarse otras capas de fisisorción.

2.14. Velocidad de procesos superficiales.

Para estudiar la velocidad a la que ocurren los procesos de adsorción y desorción podemos utilizar el concepto de superficie de energía potencial. La energía del estado de transición es una magnitud clave para conocer la energía de activación de un proceso y por lo tanto su velocidad. En este caso, la coordenada de reacción puede ser la distancia a la superficie de la molécula que va a adsorberse. Vamos a suponer un proceso de adsorción lo más completo posible: una molécula A_2 que puede sufrir fisisorción y también quimisorción disociativa sobre la superficie, $A_2(g) \rightarrow 2A(ads)$, y estudiemos como puede variar la energía potencial de la molécula a medida que se aproxima a la superficie.

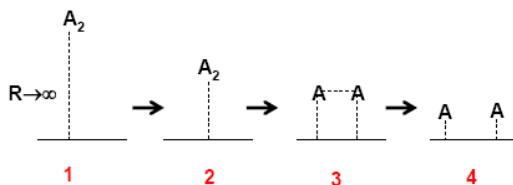
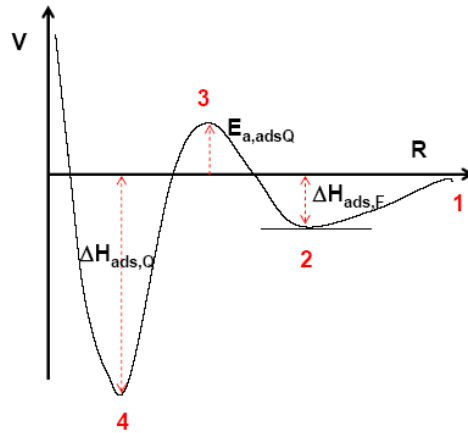


Figura 2.8. Velocidad de adsorción de procesos superficiales.

Nuestro punto de partida es la molécula en estado gaseoso, es decir, a una distancia infinita de la superficie. Esta situación (estructura 1) será nuestro origen de energías. A medida que la molécula A_2 se aproxima a la superficie disminuye la energía potencial debido a las fuerzas de Van der Waals (siempre atractivas) hasta que se alcanza un mínimo de energía correspondiente a la fisisorción (estructura 2). Este mínimo de energía tendrá una energía menor que el punto de partida pero el pozo será poco profundo. A partir de esta estructura, si queremos alcanzar la estructura correspondiente a la quimisorción (estructura 4) debemos pasar por una estructura de transición donde comience a romperse el enlace $A-A$ y a formarse los enlaces con la superficie. Esta es la estructura 3. A partir de ella la energía comenzaría a bajar a medida que nos acercamos a la superficie hasta llegar al mínimo de quimisorción (estructura 4), mínimo significativamente más profundo que el anterior.

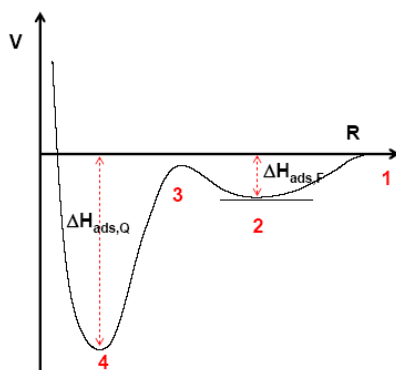
Una representación esquemática de la energía potencial en función de la distancia a la superficie para el proceso que acabamos de describir aparece en la siguiente figura:



Grafica 2.4. Representación de las entalpías de adsorción física.

En esta grafica 2.4 aparecen representadas las entalpías de adsorción física (ads, F) y química (ads, Q) junto a la energía de activación del proceso de quimiadsorción. El proceso de fisisorción es no activado (no tiene energía de activación) pues en él sólo se ponen en juego fuerzas atractivas. Entre el mínimo de fisisorción y el de quimiadsorción existe, por tanto, una barrera de energía. Entre dos mínimos debe de haber un máximo. En el caso representado, el máximo de esta barrera queda por encima de la energía de la molécula situada a distancia infinito de la superficie y por lo tanto tenemos una cierta energía de activación para la quimiadsorción.

Alternativamente, este máximo (estructura 3) puede quedar por debajo de la energía de la molécula situada a distancia infinito de la superficie. En este segundo caso tendríamos un proceso no activado (sin energía de activación) y por lo tanto muy rápido. En la siguiente figura se da una representación esquemática de la superficie de energía potencial para una quimiadsorción sin energía de activación.



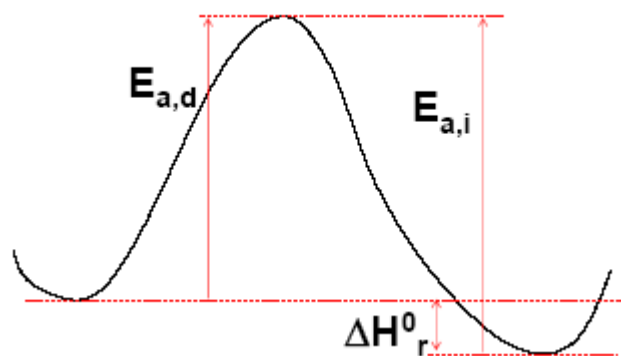
Grafica 2.5. Quimiadsorción.

Resumiendo, podemos decir que:

*La fisisorción es un proceso rápido, normalmente sin energía de activación.

*La quimisorción puede ser: a) rápida si E_a es pequeña o cero (en ese caso la velocidad no depende significativamente de la temperatura); b) lenta si E_a es grande, la velocidad aumenta con la temperatura.

En general, para cualquier reacción existe una relación entre las energías de activación del proceso directo e inverso: $\Delta H^{\circ}_r = E_{a,d} - E_a$



Grafica 2.6.

Así pues, para la adsorción podríamos escribir: $\Delta H^{\circ}_{ads} = E_{a,ads} - E_{a,des}$, siendo $E_{a,des}$ la energía de activación del proceso de desorción. Por lo tanto:

$$E_{a,des} = E_{a,ads} - \Delta H^{\circ}_{ads}$$

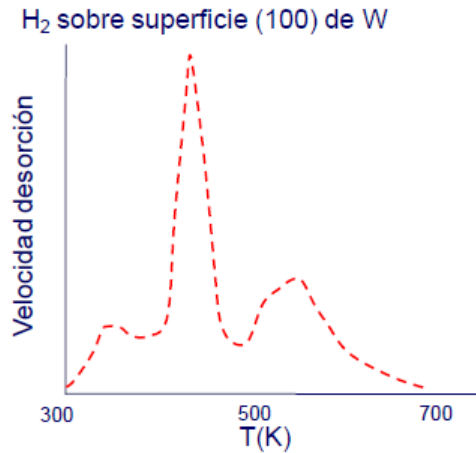
Como la adsorción (física y química) es normalmente exotérmica, $E_{a,des} \geq E_{a,ads}$; es decir, la constante de velocidad de desorción de una partícula será menor que la de adsorción. Para una adsorción con energía de activación nula:

$$E_{a,des} = -\Delta H^{\circ}_{ads}$$

La desorción será por tanto, un proceso con una cierta energía de activación. Para una partícula fisisorbida, la energía de activación de la desorción será pequeña ya que el pozo de energía potencial no es muy profundo.

La cinética de desorción puede estudiarse por experimentos de desorción térmica. A medida que T aumenta, aumenta la velocidad de desorción, apareciendo bruscos aumentos de velocidad cuando la energía térmica de las moléculas adsorbidas es mayor que la energía de activación de la desorción. Si aparecen varios picos indica la presencia de diferentes posiciones de adsorción, con diferentes entalpías de adsorción. La siguiente grafica,

donde se representa la velocidad de desorción de H₂ en una superficie 100 de W frente a la temperatura, es un claro ejemplo de este tipo de comportamiento. El análisis de los datos permite diferenciar hasta tres posiciones de adsorción distintas.



Grafica 2.7.

2.15. Modelos de carbonatación.

Para describir el proceso de difusión del CO₂ en el material, la mayoría de los modelos de carbonatación propuestos parten de la ley de Fick, cuya formulación matemática básica puede expresarse como la ecuación de transmisión del calor.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Siendo C, en este caso, la concentración de CO₂, D el coeficiente de difusión, t el tiempo, y x la profundidad de penetración del CO₂. La solución general de esta ecuación es la siguiente:

$$C_x = C_0 + C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (2)$$

Siendo C_x la concentración de CO₂ a una profundidad x y a un tiempo t, C₀ la concentración inicial de CO₂, C_s la concentración superficial en el material, D el coeficiente de difusión efectivo y erf(x) la función error de Gauss.

El modelo más sencillo propuesto, basado en la raíz cuadrada del tiempo, está definido por la siguiente expresión:

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Donde x es la profundidad de penetración del agresivo (mm), k es la velocidad de avance del agresivo (mm/año^{1/2}), característica del tipo de material y de la clase de exposición, y t es el tiempo (año).

Basados en el coeficiente de difusión del CO₂, Tuutti, Bakker y Papadakis, han propuesto sus respectivos modelos.

2.15.1. Modelo de Tuutti.

El modelo de Tuutti está basado en la difusión de fronteras móviles. El modelo estima que el frente de carbonatación avanza también proporcional a la raíz del tiempo y supone que todo el CO₂ reacciona con las fases sólidas de forma que detrás del frente de carbonatación, la concentración de CO₂ es cero, mientras que delante de él es 100% (frontera móvil). Es decir, la zona de reacción está bien definida por un frente abrupto.

La ecuación que propone Tuutti es la siguiente:

$$\frac{C_x}{C_s} = \sqrt{\pi} \cdot \left(\frac{x/\sqrt{t}}{2 \cdot \sqrt{D}} \right) \cdot \exp\left(\frac{x^2/t}{4 \cdot D} \right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x/\sqrt{t}}{2 \cdot \sqrt{D}} \right) \quad (4)$$

Donde C_s es la concentración ambiental de CO₂ (kmol/m³), C_x es la concentración de CO₂ ligado en el material (kmol/m³), x es la profundidad de carbonatación (m), t es el tiempo (s) y D es el coeficiente de difusión (m²/s).

Para calcular el CO₂ ligado en el material utiliza la siguiente fórmula:

$$C_x = \frac{C_a \cdot HD \cdot c}{56} \quad (5)$$

Donde C_a es la concentración de CaO en el cemento (kg CaO/kg cemento), HD es el grado de hidratación, c es la cantidad de cemento por m³ de material (kg/m³) y 56 es el peso molecular del CaO.

Para calcular el grado de hidratación Tutti propone una tabla en la cual relaciona el grado de hidratación con la relación a/c.

Este modelo asume que la difusión tiene lugar en estado no estacionario y que el coeficiente de difusión es constante y varía sólo en función del contenido de humedad del material. Para estimar el coeficiente de difusión Tuutti propone diagramas complementarios para la difusión efectiva del oxígeno en función de la relación a/c y de la humedad relativa.

2.15.2. Modelo de Bakker.

El modelo propuesto por Bakker asume condiciones de difusión en estado estacionario y tiene en cuenta las diferencias de humedad calculando los períodos secos, considerando que la carbonatación sólo progresa si el material está seco.

La formulación del modelo es la siguiente:

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \cdot D_C}{a} \cdot (c_1 - c_2) \cdot \left[t_{d1} + t_{d2} - \left(\frac{x_1}{B}\right)^2 + t_{d3} - \left(\frac{x_2}{B}\right)^2 + \dots + t_{dn} + \left(\frac{x_{n-1}}{B}\right)^2 \right]} \quad (6)$$

Donde B se calcula mediante la siguiente expresión:

$$B = \sqrt{(2D_v/b) \cdot (c_3 - c_4)} \quad (7)$$

x_n es la profundidad de carbonatación después del ciclo n-ésimo (m), D_C es el coeficiente de difusión del CO_2 para una distribución determinada de humedad en los poros (m^2/s), t_{dn} es la duración del período n-ésimo (s), $(c_1 - c_2)$ es la diferencia de concentración de CO_2 entre el aire y el frente de carbonatación (kg/m^3), y a es la cantidad de sustancia alcalina en el material ($kg CaO/m^3$) que puede calcularse mediante la expresión siguiente:

$$a = C_a \cdot HD \cdot c \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (8)$$

Donde C_a es la concentración de CaO en el cemento ($kg CaO/100kg$), HD es el grado de hidratación, c es la cantidad de material por m^3 de material (kg/m^3) y M_{CO_2} y M_{CaO} son las masas moleculares del CO_2 y el CaO respectivamente.

D_v es el coeficiente de difusión efectiva del vapor de agua en una distribución de humedad en los poros determinada (m^2/s), y puede calcularse dividiendo el coeficiente de difusión libre en el aire por el factor de resistencia del vapor de agua μ .

B es la cantidad de agua libre que puede evaporarse del material (kg/m^3). La cantidad de agua libre es igual al agua total en la mezcla menos el agua ligada química y físicamente en el gel y en los poros capilares.

(C3-C4) es la diferencia de concentración de vapor de agua entre el frente de secado y fuera del material (kg/m^3). Una simplificación de este modelo, considerando todo el período como seco, es decir, considerando un hormigón seco a una temperatura constante y a una humedad constante, y tomando la concentración de CO_2 en el frente de carbonatación como cero, sería la siguiente:

$$x = \sqrt{\frac{2D \cdot C_s}{a}} \sqrt{t} \quad (9)$$

Donde x es la profundidad de carbonatación (m), D es el coeficiente de difusión efectiva en el hormigón para una distribución de humedad en los poros determinada (m^2/s), C_s es la concentración superficial de CO_2 , es decir, la concentración en la atmósfera (kg/m^3), t es el tiempo (s) y a es la cantidad de sustancia alcalina en el material (kg/m^3).

2.15.3. Modelo de Parrott.

La estimación de la carbonatación se realiza a partir de medidas de permeabilidad al oxígeno, ajustándolas al contenido de humedad en el hormigón para cada humedad. La expresión propuesta es la siguiente:

$$x = 64 \cdot \frac{K^{0,4} \cdot t^n}{c^{0,5}} \quad (10)$$

Donde K es el coeficiente de permeabilidad al oxígeno (m^2/s), x es la profundidad de carbonatación (m), t es el tiempo (s), y c es el material alcalino en el material, el cual se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$c = \frac{C \cdot C_a \cdot HD}{\left(\frac{C}{3.12}\right) \cdot 10^{-3} + (w \cdot 10^{-3})} \quad (11)$$

Siendo C los kg/m^3 de material, C_a los kg de CaO por kg de material compuesto, w los kg de agua por m^3 de material, y HD el grado de hidratación, el cual se puede calcular en función de la humedad relativa.

2.16. Carbonatación natural y acelerada.

Los procesos de carbonatación natural son generalmente muy lentos a causa del bajo contenido en CO₂ de la atmósfera, del orden de 0,03% en volumen, de forma que en determinados materiales muy densos el fenómeno de la carbonatación puede aparecer al cabo de varios años o decenios. El porcentaje de CO₂ en la atmósfera es variable en función de las condiciones ambientales, pudiendo llegar hasta el 1% en determinadas zonas. La lentitud del proceso de carbonatación natural ha llevado a numerosos investigadores a realizar estudios mediante carbonatación acelerada, es decir, utilizando cámaras de carbonatación con porcentajes de CO₂ que pueden llegar hasta el 100%.

Los resultados de estos estudios en relación con la profundidad de carbonatación han demostrado no ser siempre coherentes con los obtenidos mediante carbonatación natural, por lo que los mecanismos de carbonatación natural y acelerada parecen ser diferentes.

En cuanto a las cantidades de CO₂ que se combinan, el estudio asume que el 100% del CaO presente en la portlandita y en las fases AFt y AFm, así como el 50% del CaO presente en el gel C-S-H, puede transformarse en carbonato cálcico, lo cual significa que el 75% de todo el CaO presente en el c original puede carbonatarse, de forma que la cantidad de CO₂ absorbido la calculan mediante la fórmula:

$$CO_{2abs} = 0,75 \cdot C \cdot CaO \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (12)$$

Siendo C la cantidad total, CaO la cantidad de CaO en la muestra y M las masas moleculares.

Para llegar a esta estimación realizaron ensayos en el laboratorio de carbonatación acelerada en muestras molidas a diferentes tamaños de grano, siempre inferiores a 16 mm. El hecho de utilizar muestras molidas se fundamenta en el propósito del estudio de determinar la cantidad de CO₂ que absorben las estructuras de hormigón a lo largo de toda su vida, incluyendo la demolición, ya que consideran una vida de 100 años, de los cuales 70 son de vida en servicio y 30 de vida secundaria.

CAPITULO 3

CARACTERIZACION DE LA ESCORIA DE
FUNDICION DE ACERO LD o BOF (ZEOLITA).

(Basic Oxigen Furnace slag BOF slag)

3.1. ¿QUÉ ES LA ZEOLITA?

La Zeolita es una roca compuesta de aluminio, silicio, y oxígeno. Se halla en una variedad de regiones del mundo donde la actividad volcánica prehistórica ocurrió cerca del agua, o donde el agua ha estado presente por milenios desde las erupciones. En 1756, el mineralogista sueco Barón Axel Fredrick Cronstedt descubrió la zeolita. Se relata que su perro sacó la piedra mientras escarbaba, y el mineralogista la llamó zeolita debido a que significa “perro” en sueco.

En otro relato, se dice que descubrió que cuando la zeolita (la cual era realmente Stilbite) se calentaba, emitía vapor. Zeolita significa “piedra hirviente” en griego. Como no sé sueco ni griego, tendrán que juzgar por su cuenta cuál de estas dos historias son ciertas. Sabemos a ciencia cierta que la zeolita fue descubierta.

La zeolita tiene una porosidad natural debido a que tiene una estructura cristalina con ventanas, jaulas, y supe jaulas. Las zeolitas naturales tienen ventanas de tamaño limitado (tamaño de poro) y todas son hidrofílicas (tienen afinidad por el agua). Algunas zeolitas sintéticas separasen al carbón absorbente, dado que ambas pueden considerarse hidrofóbicas (tienen afinidad por los compuestos orgánicos, con poca o ninguna afinidad por el agua), y pueden adsorber vapores orgánicos con moléculas de tamaño más pequeño que el de sus poros. Tanto el carbón como la zeolita pueden adsorber agua y moléculas orgánicas; sin embargo, aquello por lo que tenga mayor afinidad, desplazará las demás moléculas. La zeolita tiene un tamaño de poro uniforme, lo cual hace que se le denomine como un tamiz molecular, mientras parece que los carbones tienen poros que se comunican con poros más pequeños que a su vez se comunican con poros todavía más pequeños *ad infinitum*.

El carbón absorbente, el cual es en realidad un adsorbente, también tiene afinidad por el agua en algunos sitios, lo que disminuye su capacidad para adsorber las moléculas orgánicas de las corrientes que contienen moléculas de agua. Esto puede ser cierto o no en el caso de la zeolita, dependiendo del tipo de zeolita que se seleccione. Generalmente, entre mayor sea la razón de silicio y aluminio, más hidrofóbica es la zeolita. Las zeolitas hidrofóbicas tienen que ser sintetizadas, ya que no se encuentran en la naturaleza. ¡Por lo cual, la carrera para sintetizar zeolitas con características específicas ha comenzado!



Figura 3.1 Muestra de escoria tipo BOF procedente de refinación de acero.

3.2. ¿POR QUÉ SINTETIZAMOS LA ZEOLITA?

La síntesis es importante debido a que permite a los científicos e ingenieros predecir las propiedades de la zeolita, producir una zeolita con un “tamaño de poro” más grande, y producir zeolita hidrofóbica. Los intentos iniciales para sintetizar la zeolita simulaban las condiciones volcánicas. Finalmente en 1949 se sintetizó la zeolita hidrofílica bajo condiciones hidrotérmicas (por ejemplo, a menos de 100 C^0) por los químicos Milton, Breck, y otros investigadores. En 1985, los investigadores Bibby y Dale reportaron la síntesis de una zeolita de sílice pura. Otros investigadores han sintetizado una gran variedad de zeolitas hidrofílicas e hidrofóbicas.

Al sustituir otros elementos por aluminio o sílice durante la síntesis, se han producido estructuras cristalinas como las de la zeolita, pero la zeolita de la que vamos a hablar aquí es un aluminosilicato puro.

Se han descubierto 40 zeolitas naturales; el Comité de Estructura de la Asociación Internacional de Zeolita ha catalogado 118 zeolitas; más de 600 zeolitas han sido identificadas, y si se incluyeran las estructuras cristalinas similares a las de las zeolitas (pero que utilizan otros elementos), el número aumentaría diariamente. Ninguna zeolita es exactamente igual a otra.

La estructura de un cristal de zeolita se basa en un tetraedro que está formado por cuatro átomos de oxígeno enlazados con un átomo de silicio por medio de sus cuatro electrones de valencia. Estos tetraedros se conectan en las esquinas de los oxígenos para formar los cristales.

Cuando el aluminio está presente durante la formación de los cristales, se sustituye el silicio por los átomos de aluminio, el cual tiene solamente tres electrones de valencia. El electrón de valencia que falta es proporcionado

generalmente por un átomo de hidrógeno o de sodio debido a que estos elementos se encuentran típicamente en el agua hidratante. Esto distorsiona el tetraedro y hace un sitio ácido para el intercambio de otros iones. Esto además hace que la estructura sea hidrofílica. Si la zeolita se forma en una mezcla que contenga un catión orgánico (por ejemplo, un catión que tenga un núcleo de carbón), la estructura se puede formar alrededor del catión orgánico, utilizándolo como patrón. Esto ha dado lugar a zeolitas hidrofílicas ricas en silicio con un tamaño de poro (o tamaño de ventana) lo suficientemente grande como para dejar pasar todo salvo las moléculas de petróleo que son más grandes.

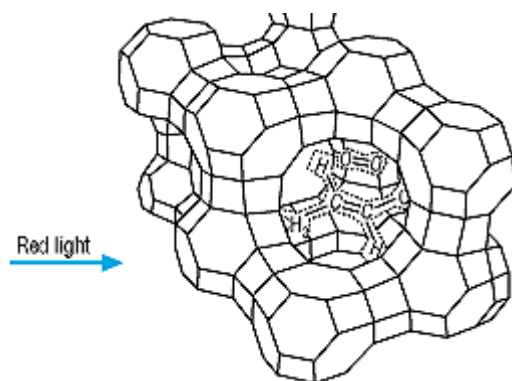


Figura 3.2 -- Estructura en Y del Cristal de Zeolita - Mostrando Ventanas, Jaulas, y Superjaulas. Reimpresa con permiso de CHEMTECH, Junio de 1996, 26(6), pp 24-30. Derecho de copias 1996, *American Chemical Society* (Sociedad Química Americana).

Red light = luz roja

La activación de una zeolita consiste en el calentamiento o evacuación de la zeolita para desorber el agua hidratante u otro material del área de adsorción, tal como se hace con el carbón.

3.3. ¿CUALES SON LAS CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE LA ZEOLITA?

- * La zeolita es capaz del intercambio selectivo de iones.
- * La zeolita puede adsorber moléculas en su gran área interna, siempre que puedan pasar por las ventanas. La zeolita y el carbón son iguales en este aspecto, y se diferencian solamente en el área de adsorción a la que puede tener acceso una molécula dada que pase por sus “poros.

* La zeolita puede ser un catalizador ácido sólido. Puede funcionar como un ácido fuerte (aunque se mantiene como un sólido) cuando la hidratación ha sustituido un hidrógeno, por un electrón de valencia adicional, o un intercambio isoelectrónico con el aluminio.

* La zeolita es metaestable; quiere decir, es estable siempre que se mantenga a una temperatura y a un pH adecuado. Dentro de este rango, no se ve afectada por oscilaciones grandes de temperatura, presión, o radiación ionizante.

La zeolita natural existe como una roca natural, y puede alcanzar el tamaño de una roca grande. Sin embargo, los cristales de zeolita sintetizada siempre miden menos de un milímetro -- esto es debido a que estos cristales crecen muy lentamente. Estos pequeños granos pueden transportar rápidamente la molécula adsorbida al área de adsorción. El flujo de aire por el lecho de zeolita en polvo crea una gran pérdida de presión. Se han desarrollado zeolitas granulares en las cuales los granos se adhieren entre sí para crear canales más grandes, y como resultado hay menos resistencia al flujo de aire.

3.4. ¿CÓMO SE PUEDE UTILIZAR LA ZEOLITA PARA CONTROLAR LOS CONTAMINANTES DEL AIRE?

Se pueden elaborar las zeolitas hidrofóbicas por medio de: controlar la proporción de silicio a aluminio, dealuminizando la zeolita. Los diferentes tipos de zeolita tienen ventanas de 0.3 a 3.0 nanómetros (3 a 30 Ångstroms), pero cualquier tipo específico tiene su propio tamaño de ventana nominal. Un cambio en la relación Si/Al puede afectar el tamaño de ventana. Un intercambio de iones puede también afectar el tamaño de ventana.

Actualmente se utiliza la zeolita hidrofóbica para concentrar los CO₂ antes de destruirlos. Estos concentradores se muestran esquemáticamente en la Figura 3.2. En esencia son adsorbedores de oscilaciones de temperatura (temperature swings) con el lecho montado en un rotor, el cual se regenera con cada rotación (de dos a cinco veces por hora). El flujo aire-vapor del diseño de un vendedor es axial por los sectores en el rotor. El diseño de otro vendedor dirige el flujo aire-vapor radialmente hacia adentro por segmentos ubicados a lo largo del exterior del rotor.

El costo y tamaño de un incinerador están relacionados al flujo de aire, y el flujo de aire del concentrador al incinerador se reduce aproximadamente en 90%. Los ahorros mayores vienen de la reducción del flujo de aire que pasa por el incinerador, lo cual reduce la cantidad de combustible que se necesita para subir la temperatura del flujo de aire.

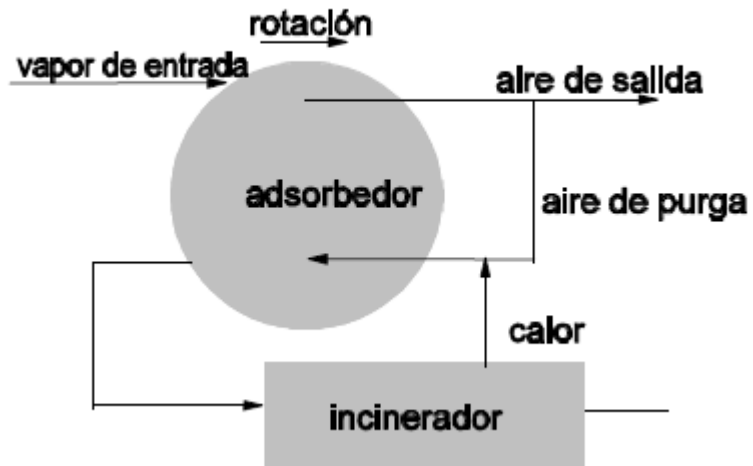


Figura 3.3 Concentrador de CO₂.

Debido a esto, la concentración de los CO₂ también se incrementa por un factor de aproximadamente diez, al igual que el “valor de calentamiento” (heating value) de los CO₂. De esta manera, el concentrador se utiliza para reducir el tamaño y costo del incinerador que se usa para destruir los CO₂, y para reducir la cantidad de combustible que debe agregarse para obtener con seguridad la eficiencia destructiva completa del incinerador.

Por seguridad, el nivel de CO₂ una vez concentrado, debe mantenerse por debajo de la cuarta parte del Límite Inferior de Explosividad (LIE); por lo tanto, la concentración a la entrada al concentrador no debe ser mayor a aproximadamente 500 partes por millón (ppm). Típicamente, la concentración a la entrada es solamente de unos cuantos cientos de ppm. Tomando esto en cuenta, se debería utilizar el concentrador para concentraciones de CO₂ entre los niveles que son económicos para el adsorbedor de lecho fijo y el condensador.

Las zeolitas hidrofóbicas pueden ser muy eficientes para adsorber y desorber CO₂, como se muestra en el informe “Sorption and Diffusion of CO on Hydrophobic Zeolites” Paper 83f, 1996 Annual Meeting, American Institute of Chemical Engineers.” Las zeolitas se pueden utilizar con un rango de temperatura más grande que el del carbón, y son superiores a éste como adsorbente.

Cuando están fríos, los motores que usan gasolina emiten CO en sus gases de escape. La zeolita hidrofóbica es utilizada en los convertidores catalíticos para adsorber estos CO. Cuando el motor se calienta y los gases calientes desorben los CO de la zeolita, la zeolita hace entonces el papel de catalizador para la oxidación de los CO. La zeolita no se altera por los 530 °C de temperatura que alcanzan los gases de escape.

Los motores diesel tienen un problema enteramente diferente. Emiten óxidos de nitrógeno (NOx) los cuales pueden ser reducidos catalíticamente a nitrógeno y oxígeno (como en el aire limpio) por medio de una zeolita con intercambio de cerio que utiliza urea o amoníaco como agente reductor.

La separación de bióxido de carbono de los gases de escape fue investigado en Corea (Industrial Engineering Chemical Research, 1995, 34, pp. 591-598). Los autores descubrieron que la zeolita 13X era superior a un “carbón absorbente” en un sistema con oscilaciones de presión (pressure swing). Puesto que el bióxido de carbono es un gas de invernadero que se asocia con el calentamiento global de la Tierra, esto puede ser muy importante para reducir tales emisiones.

Otra zeolita denominada Chabazite, ha sido utilizada como un tamiz molecular para remover bióxido de azufre de los gases de escape. Los óxidos de azufre también son producto del procesamiento de algunos minerales. Los óxidos de azufre son constituyentes de la lluvia ácida. La reducción de tales emisiones podría tener un efecto profundamente beneficioso sobre el medio ambiente.

La zeolita natural Clinoptilolite puede remover amoníaco de aguas residuales. Se ha utilizado para controlar el amoníaco de la orina en camas para gatos (kitty litter) y en los establos de caballos. Se utiliza además para adsorber los CO que causa malos olores por humedad y hongos, y en alfombras. Se regenera con la luz del sol y el aire limpio. Hay que destacar que la zeolita se puede utilizar también para catalizar la oxidación de hidrocarburos en la presencia de luz. Sin embargo, puede ser muy selectiva en estas reacciones según CHEMTECH, 1996, 26(6), 24-30 American Chemical Society.

3.5. ¿TIENE LA ZEOLITA UN USO FUERA DEL CAMPO DE CONTROL DE CONTAMINANTES DEL AIRE?

En una sola palabra, SI. En el tratamiento de desechos radiactivos, la zeolita se utiliza para remover el cesio y el estroncio radiactivos de las aguas residuales. Como la zeolita es impermeable hasta a niveles altos de radiación, se usa para intercambiar y atrapar estos iones. Es capaz de remover estroncio radiactivo a una concentración de 1 microgramo por litro mientras el sodio esté presente a 150.000 veces esta concentración. En esta aplicación la zeolita está en forma de polvo o del tamaño de granos de arena, la cual es entonces agregada al concreto como relleno. El concreto a su vez se deposita en tambores para su disposición. Se considera que este método de disposición es impermeable a la lixiviación de agua salada, y por tanto se pueden disponer los desechos radiactivos en un confinamiento o en el fondo del océano.

La zeolita se ha utilizado para suavizar agua. Cuando se pasa agua dura por un lecho de zeolita, se intercambian los iones del calcio y magnesio, evitando que formen jabones insolubles que se ven como “residuos de jabón.” La zeolita puede regenerarse pasando agua salada a través de ella.

Los cloruros de los iones intercambiados son solubles en el agua y por tanto su disposición es fácil. Debido a que el agua acida cruda ataca a las zeolitas naturales, ahora se utiliza materiales más resistentes, aunque por décadas se usó la zeolita hidrofílica.

Los constituyentes base de los detergentes, también suavizan el agua, aunque no sufren tal ataque debido a que se utilizan solamente una vez. La zeolita se utiliza como “constructor” y reemplaza la mayor parte del tripolifosfato de sodio, el cual fue muy utilizado anteriormente y que resultó ser nocivo al medio ambiente. Aquí también la zeolita remueve los iones de calcio y magnesio del agua. Setecientos millones de toneladas de zeolita por año se utilizan de esta manera. La zeolita pulverizada no tiene efectos nocivos en el medio ambiente salvo el de ser un polvo molesto de vez en cuando.

El uso de catalizadores de zeolita en el “craqueo catalítico” (catalytic cracking) en las refinerías de petróleo dependió del descubrimiento de una zeolita con ventanas grandes que fuera hidrofóbica. Los investigadores Charles J. Plank y Edward J. Rosinski inventaron tal zeolita y su síntesis. Los catalizadores de zeolita ahora reducen nuestro consumo de petróleo importado por 8 a 16 mil millones de dólares por año. Hay que agregar a estos ahorros la reducción en las emisiones de bióxido de carbono de las reducciones en la demanda energética de las refinerías.

Investigadores de la University of the West Indies están investigando utilizar la zeolita para producir gasolina a partir de etanol. Nueva Zelanda ya utiliza la zeolita como catalizadora para producir un gran porcentaje de su combustible para autos a partir de metanol, debido a que no cuenta con reservas de petróleo.

La zeolita se utiliza para secar aire comprimido. Funciona como desecante para adsorber humedad. Puede retener hasta una cuarta parte de su peso en agua sin un incremento significativo en la presión de vapor.

La zeolita también se utiliza en los refrigeradores para reseca el refrigerante. Esto previene la formación de cristales de hielo que pudieran obstruir el flujo y las válvulas.

Los fertilizantes de lento desprendimiento utilizan la zeolita para controlar su emisión al suelo.

Las bacterias en el suelo convierten la urea a amoníaco. La Clintoptilolite adsorbe el amoníaco, y previene que las bacterias del suelo lo conviertan a nitrato. La lixiviación subsiguiente del amoníaco permite que esta nitrificación ocurra a lo largo de un período de meses. De otro modo, los nitratos acumulados se enjuagarían del suelo y contaminarían tanto las aguas subterráneas como las superficiales.

La zeolita se utiliza para separar el nitrógeno del oxígeno del aire. La leve diferencia en tamaño entre una molécula de nitrógeno y una molécula de oxígeno, junto con la polarización y una zeolita adecuada, permite que el oxígeno pueda ser adsorbido selectivamente del aire. Se deja escapar el nitrógeno, para después desorber el oxígeno. Esta técnica se usa para generar oxígeno para las tripulaciones de aviones, procesos industriales y en los acuarios.

Se han sintetizado las zeolitas en forma de membrana, lo cual permite su uso como tamices moleculares. Los tamices moleculares dejan pasar las moléculas para las cuales tienen afinidad, y que son más pequeñas que su tamaño de poro (ventana). Se está utilizando esta propiedad para los transductores químicos en las mezclas donde las especies moleculares sean conocidas. Si una molécula de diámetro conocido pasa por el transductor y causa una respuesta del mismo, la respuesta puede ser calibrada a la concentración de la especie molecular conocida. Así, tenemos ahora transductores que detectan la concentración química sin necesidad de una reacción química.

Similarmente, la Universidad de Greenwich en Londres, Inglaterra ha desarrollado una zeolita que se utiliza como un tamiz molecular que deja pasar las moléculas de agua -- pero no permite el paso de CO. Esta es una zeolita hidrofílica, la cual se halla en forma de una membrana delgada que debe dejar que las moléculas de agua se adsorba/desorba y de este modo pasar por la membrana.

3.6. Escoria de Acería.

La escoria de acería, también llamada escoria LD o escoria BOF (Basic Oxygen Furnace) se produce en el convertidor: el arrabio procedente de los Hornos Altos se carga junto con la chatarra y otros aditivos en el convertidor de acero, oxidando el carbono, el silicio y el fósforo presentes mediante la inyección de oxígeno. El carbono se elimina por oxidación en forma de gas (CO y CO₂) y el resto de impurezas en forma de escoria semipastosa que sobrenada por encima del acero, lo que permite separarla de este y enviarla a un foso donde se riega hasta alcanzar las temperaturas inferiores a 50 o C.

Una vez que alcanza la temperatura adecuada para el transporte, se conduce a la planta de procesado de escorias. En esta parte de la gestión de la escoria, se procede en primer lugar a la separación de la chatarra contenida en la escoria mediante electroimanes, recirculándose esta parte de nuevo al convertidor como aporte de chatarra y clasificándose la escoria en distintas granulometrías que pueden ser del orden de 0/3, 3/7 y mayor de 7 mm.

3.7. Propiedades.

3.7.1. Propiedades Físicas aparentes.

La escoria de acería LD o BOF es un material de tipo granular, de color gris claro en estado seco que tiene una cierta porosidad y textura rugosa. Las partículas tienen forma cúbica, con escasa presencia de lascas. Tiene una densidad aparente elevada, del orden de 3 t/m³ o algo superior, consecuencia de su contenido en hierro, que se da tanto en la forma de metal libre como combinado en óxidos. La granulometría aproximada es 0/300. La absorción de agua es moderada (inferior al 3%).

3.7.2. Propiedades Químicas

La escoria de acería LD o BOF tiene una composición química muy diferente de la de las escorias de alto horno; en particular, contiene menos alúmina y sílice y bastante más cal, una parte de ella en forma libre; además, contiene una importante proporción de óxidos de hierro. El contenido en CaO está comprendido entre el 45 y 50%, siendo ésta, quizá, la propiedad química más importante desde el punto de vista de su utilización en la construcción de carreteras, pues hace que las escorias presenten alta higroscopicidad, lo que favorece la hidratación de la cal y su posterior expansión. Las escorias de acería contienen más hierro, tanto en su forma libre como combinada en óxidos, que las escorias de alto horno, lo que incrementa la densidad de este material. Por el contrario, el contenido de azufre total es bajo. El pH de las escorias de acería LD o BOF es alcalino.

3.7.3. Propiedades Mecánicas

Las escorias de acería tienen muy buena angulosidad y una elevada dureza (6-7 en la escala de Mohs), así como una elevada resistencia al corte y a la abrasión.

3.8. Procesamiento.

La escoria, que se encuentra en forma semipastosa sobrenadando por encima de acero, se separa de éste y se envía a un foso, donde se riega hasta alcanzar temperaturas inferiores a 50 °C, y se transporta a la planta de procesado. Allí se separan, mediante electroimanes, las chatarras superiores a 80 mm, pasando el material restante a la instalación de machaqueo.

Mediante machacadoras de mandíbulas y molinos de conos se reducen a tamaños inferiores a 50 mm. De esta escoria se elimina de nuevo el hierro mediante electroimanes y se clasifica en distintos tamaños. El procesamiento se completa, en su caso, con el envejecimiento de la escoria en parque, regándola con agua para conseguir hidratar los elementos inestables.

3.9. Propiedades del material procesado.

3.9.1. Composición química y mineralógica.

Desde el punto de vista mineralógico la escoria LD presenta en su composición diferentes fases: silicatos bicitréclicos, la wustita combinación de óxido de hierro, manganeso (FeO y MnO), ferrito bicitréclico y cal, más o menos impregnada de óxidos metálicos, responsable de la presencia de cal libre.

3.9.2. Inestabilidad volumétrica.

La presencia en la escoria de cal libre, y de magnesia en menor medida, constituye un factor potencial de inestabilidad. Estos óxidos tienden a hidratarse desprendiendo calor y produciendo un hinchamiento que puede provocar la disgregación del material, evolucionando la granulometría de la escoria hacia tamaños más pequeños. Este fenómeno puede producirse en el transcurso de pocas semanas o de varios meses, según se produzca la hidratación de la cal o magnesia libre.

El procedimiento más utilizado para reducir al mínimo los fenómenos de inestabilidad volumétrica es el de envejecer la escoria en parte, machacada y en su estado final, regándola con agua natural, salada, acidulada o agua caliente para conseguir hidratar los elementos inestables. Se ha comprobado que el envejecimiento al aire sin riego de agua no ofrece garantías y que los montones deben tener una altura máxima de 1,5 – 2 m

El contenido de la cal libre puede variar para distintas escorias entre el 1% y el 15%. Los límites por debajo de los cuales puede considerarse segura la utilización de la escoria dependen de en qué se vaya a emplear. Si se utiliza en capas granulares, los límites oscilan, según los países, entre el 4% y el 7%; para aplicaciones en capas bituminosas, en las que los áridos quedan impermeabilizados por una película de betún, algunos países permiten el empleo de escoria sea cual sea el contenido de cal.

3.9.3. Propiedades físicas.

La escoria de acería LD o BOF se caracteriza por ser un árido muy limpio, pesado, anguloso, poco pulimentable y de gran dureza.

En la tabla 3.1 se resumen las características físicas de la escoria BOF-01 ensayada en el IIM, sobre las fracciones 5/10 y 10/20 suministradas por **ENSIDESA**, adecuadamente combinadas para obtener las granulometrías y tamaños especificados en los ensayos. Los resultados que se presentan no son de aplicación general a todas las escorias de acería, que si bien tienen en común su gran dureza pueden presentar coeficientes de pulido acelerado mucho menores.

| ENSAYO | RESULTADO |
|--|-----------------------|
| Partículas con dos o más caras de fractura | 100% |
| Limpieza superficial | 0.02% |
| Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina A540 | 14.6% |
| Pulimento acelerado de los áridos | 0.55% |
| Índice de lajas | 7.0% |
| Peso específico de las partículas | 3.45 t/m ³ |
| Porosidad (Aceite de parafina) | 4.33 % |
| | |

Tabla3.1Características físicas de la escoria BOF-01, sobre las fracciones 5/10 y 10/20.

3.10. Aplicaciones de la escoria tipo LD o BOF.

Las escorias de acería LD están siendo utilizadas en nuestro país y en otros países con acerías como: Alemania, Austria, Bélgica, Canadá, Francia, Inglaterra, Japón y USA. En Japón, la tasa de reciclado es cercana al 100% (fuente: Nippon Slag Association)

Las aplicaciones más importantes de la escoria de acería son en agricultura y en obra civil como árido de calidad.

Obras de tierra y terraplenes

El escombros de acería LD se utiliza en la construcción de rellenos y terraplenes.

Carreteras

En la técnica de carreteras, las escorias de acerías LD se utilizan como áridos para bases y sub-bases granulares, mezclas bituminosas, lechadas o tratamiento superficiales.

Este material no debe emplearse en capas tratadas con conglomerantes hidráulicos o en aplicaciones donde vaya rígidamente confinado en las que pequeñas expansiones producirán deterioros importantes.

En su aplicación como árido en capas granulares, y especialmente en bases de carreteras, debe someterse el material a un proceso de envejecimiento previo, con la granulometría con la que vaya a ser empleado, de forma que el contenido de cal libre no rebase un porcentaje entre el 4% y 5%; antes de su utilización deberá controlarse la estabilidad volumétrica de la escoria mediante un ensayo de hinchamiento.

La aplicación más clara en la técnica de carreteras es como árido en capas de rodadura de mezclas bituminosas o tratamientos superficiales, donde no sólo saca el mayor partido a su gran dureza y alto coeficiente de pulimento acelerado, sino que el riesgo de desperfectos por expansión se reduce sensiblemente.

El proceso de dosificación en laboratorios de las mezclas bituminosas con escorias, así como su fabricación y puesta en obra, es análogo al de las mezclas convencionales. No obstante, se pueden resaltar varios aspectos que las diferencian:

Las mezclas bituminosas fabricadas con estos áridos han demostrado que su adhesividad al ligante es buena (superior al obtenido generalmente con áridos silíceos), el coeficiente de resistencia al deslizamiento se conserva mejor que en otros áridos y la resistencia mecánica de las mezclas es superior a la obtenida con los áridos silíceos de referencia.

Debido al elevado peso específico de la escoria de acería, hay que adoptar precauciones a la hora de dosificar el porcentaje de betún en las mezclas, siendo recomendable, para poder comparar dosificaciones, referirlas a porcentaje sobre volumen de áridos.

La mayor porosidad de las escorias respecto a los áridos convencionales hace que para conseguir unos contenidos adecuados de huecos en mezcla se deba ir a una dosificación superior de ligante que en la mezcla de referencia.

3.11. Consideraciones ambientales.

Las escorias LD o BOF pueden ser sometidas a distintos tratamientos para ser acondicionadas a los requerimientos de los clientes o necesidades internas, como son, por ejemplo, enfriamiento y recuperación magnética u otros tratamientos adicionales como clasificación, molienda y cribado para alcanzar las granulometrías demandadas.

Las escorias LD o BOF que son sometidas a los tratamientos de enfriamiento y recuperación magnética, pero que no se reciclan internamente en las instalaciones productoras o no se procede a su comercialización, tienen la destinación a tiraderos al aire libre donde se envejecen de forma natural.

Ventajas.

Las escorias de acerías LD están compuestas principalmente por Ca, Si, Fe, Mg y Mn junto con cantidades menores de otros elementos. No están presentes en las escorias producidas en México cantidades representativas de elementos considerados como nocivos en las legislaciones ambientales, como el arsénico, el cadmio, el cobalto y el mercurio.

En nuestro país existe una amplia experiencia en la utilización de la escoria de acería LD o BOF como corrector de suelos de cultivos. La escoria no solo es capaz de aportar una serie de micronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas sino que también mejora la densidad, porosidad y permeabilidad de los suelos.

El aprovechamiento de las escorias, produce un ahorro importante de otros recursos naturales que serían necesarios para las distintas aplicaciones a las cuales se destina.

La escoria es producida simultáneamente con el acero, y permitir su aprovechamiento evita la gestión de las mismas por otro medio, como por ejemplo, destino vertedero.

Inconvenientes.

Los lixiviados de las escorias de acerías pueden llegar a tener un pH superior a 11. No obstante si se usa en áreas en contacto con aguas de flujo lento o estancado, se debe airear el agua para evitar que debido al pH de escoria, pueda afectar a la fauna y la flora. En otros casos, no se ve afectado por su uso.

En la bibliografía técnica se han recogido casos de obstrucción de tuberías del sistema de drenaje del firme, al precipitarse el carbonato cálcico procedente de la combinación de los lixiviados de la escoria con el dióxido de carbono del aire.

Las escorias de acería, especialmente las producidas en el procedimiento basado en el empleo de oxígeno, tienen cal libre (CaO) y magnesia (MgO). Estos óxidos pueden reaccionar con el agua y formar hidróxidos en una reacción expansiva. La expansibilidad hidráulica de las escorias de acería es más frecuente que la que puede producirse en las escorias de alto horno por la presencia de sulfatos solubles. La primera expansión en el tiempo corresponde a la hidratación de la cal, y tiene lugar en el plazo de semanas, mientras que la hidratación

del óxido de magnesio se efectúa a más largo plazo, y después de la anterior. Para reducir el riesgo de expansión de las escorias de acería, se recomienda una maduración o envejecimiento de entre 3 y 12 meses. A este respecto conviene señalar que, en nuestro país, la práctica habitual con las escorias 5/10 y 10/20 es regar con agua y dejar madurar de 3 a 6 meses.

3.12. Técnicas de caracterización.

El conocimiento de los diferentes ensayos y la información que se puede obtener de ellos son indispensables en varios aspectos de la Tecnología de Materiales. Entre los ensayos, cabe señalar los reconocidos por organismos oficiales como la American Society for Testing and Materials (ASTM), la International Standard Organization (ISO), y la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR-UNE), y los que no lo están.

Algunos ensayos representativos pueden ser los ensayos eléctricos, magnéticos, ópticos, ensayos espectroscópicos, mecánicos, etc.

3.12.1. Ensayos térmicos.

Entre los ensayos térmicos se encuentra la calorimetría diferencial de barrido (DSC), que consiste en someter al material a un ritmo programado de variación de la temperatura y registrar los eventos térmicos. El concepto diferencial indica que se mide la diferencia de comportamiento entre la muestra de estudio y un material inerte de referencia. Esta técnica permite, en general, determinar la temperatura y el contenido entálpico de cualquier evento que suponga la absorción o la cesión de calor como ocurre en los cambios de fase o en las reacciones químicas.

Otro ensayo térmico es el análisis termogravimétrico (TGA), que mide la variación de la masa de una muestra al someterla a un ritmo de temperatura programada y controlada. Las gráficas masa temperatura que se obtienen se llaman termogramas.

La técnica consta de un micro balanza situada en el interior de un horno y protegida de la corrosión mediante una cámara que a su vez proporciona inercia térmica. La balanza debe calibrarse con frecuencia, con una masa de valor conocido.

La termogravimetría permite estudiar los cambios de masa y la cinética de fenómenos de adsorción, desorción, deshidratación, vaporización, oxidación, descomposición, etc. No es válida para transformaciones polimórficas.

Junto a la técnica FTIR (espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier), es un excelente método de identificación de polímeros indicando incluso si se trata de un material puro, o si es una mezcla de polímeros.

Un termograma y las temperaturas a las que se manifiestan las pérdidas de peso ayudan a identificar la presencia de un compuesto en una muestra. La pérdida de peso, además, se puede usar para cuantificar el contenido molar de cualquier analito en particular.

Se conoce como análisis termogravimétrico diferencial (ATD) cuando se obtiene la derivada de la masa en función de la temperatura o del tiempo, si el proceso se realiza de forma isoterma. Es decir, que la única diferencia respecto al TGA estriba en un tratamiento adicional de los datos.

Los termogramas típicos del análisis termogravimétrico (TGA) tienen forma de escalera, fáciles de comprender en su concepto pero a veces pueden ser difíciles de interpretar por completo. Esto es particularmente válido si las pérdidas de peso son muy pequeñas debido a un volumen limitado de muestra, o bien, si la muestra contiene varios compuestos distintos que se descomponen a temperaturas parecidas o incluso, en algunos casos, iguales.

Es aconsejable entonces graficar la primera derivada del diagrama peso-temperatura. La forma del diagrama obtenido con la técnica ATD es una serie de picos. Si no se observa pérdida de peso durante el ensayo, la pendiente del termograma es cero, una línea horizontal. La identificación de un pico es mucho más fácil si hay dos o más procesos de degradación térmica que sucedan a intervalos de temperatura traslapados.

3.12.2. Técnicas espectroscópicas.

En la emisión o absorción de la radiación electromagnética, se basan las técnicas espectroscópicas.

Las técnicas espectroscópicas sirven principalmente para determinar la composición química del material, tanto a nivel de compuestos como de elementos. Dada su rapidez y tipo de información que proporcionan, suelen ser los primeros ensayos de control de materiales.

La espectroscopia de infrarrojo se basa en las vibraciones internas de los átomos y las moléculas, que presentan frecuencias en la región del infrarrojo cercano ($10.000 - 4.000 \text{ cm}^{-1}$) o medio ($4.000 - 200 \text{ cm}^{-1}$) del espectro electromagnético. Mediante un fenómeno de resonancia, cada material absorbe de la radiación incidente las frecuencias que corresponden a sus vibraciones atómicas y moleculares, y transmite todas las demás. Por lo tanto, dado que las frecuencias son específicas de cada enlace químico y del grupo funcional, esta técnica permite identificar materiales, particularmente polímeros.

Además, la intensidad de los picos de absorción está relacionada con la concentración de las especies, lo que permite realizar un análisis cuantitativo.

Es decir, que se trata de una técnica basada en la absorción de la radiación IR por las moléculas, que permite identificar grupos funcionales de la estructura molecular de los materiales a estudio, a partir de su espectro de absorción.

La energía total de un sistema molecular viene dada por:

$$E_T = E_{\text{trans}} + E_{\text{rot}} + E_{\text{vibr}} + E_{\text{electr}}$$

Todas las moléculas poseen un movimiento vibracional continuo. Los átomos vibran a una distancia interatómica media. Una molécula absorbe la energía de un haz incidente de luz infrarroja cuando dicha energía sea igual a la necesaria para que se dé una transición vibracional de la molécula.

Existen dos modos principales de vibración, y ambos están cuantizados:

*alargamiento o tensión (stretching).

*flexión o deformación (bending).

Los movimientos de alargamiento implican el cambio continuo de la distancia interatómica a lo largo del eje de enlace. En contraste, las vibraciones de flexión implican cambios de ángulo entre los enlaces. Los principales tipos de oscilaciones de flexión son el tijereteo, el balanceo, el aleteo, y la torsión.

Se pueden asignar frecuencias características de tensión y deformación a grupos funcionales específicos. Viendo a qué longitudes de onda absorbe en la zona del infrarrojo, se puede identificar el tipo de molécula. Pero sólo se observarán bandas en el espectro de infrarrojo en el caso de que el movimiento de vibración (alargamiento o flexión) vaya acompañado de un cambio en el momento dipolar. Por tanto, cuanto más polar sea el enlace, mayor intensidad tendrá el pico correspondiente a su frecuencia de vibración.

Excepto las especies diatómicas homonucleares como el O₂ y el B₂, todas las moléculas presentan un espectro IR característico, que será su huella dactilar.

Los espectros de IR se suelen graficar con el porcentaje de transmitancia en el eje de ordenadas, y el número de onda en el eje de abscisas. En la práctica, esto se traduce en que la línea base de los espectros está en la parte

superior de los mismos (transmitancia máxima), y que los picos de absorción se dirigen hacia abajo. Los números de onda son el inverso de la longitud de onda, y sus unidades son cm^{-1} . Se debe notar que los números de onda crecientes corresponden a frecuencias crecientes y, por consiguiente, a radiación progresivamente más energética.

Existen dos variantes en función de que la medida se haga por transmisión o por reflexión. Los espectros de infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), se miden por transmisión.

Cuando los materiales objeto de estudio se presentan en forma de polvo, la preparación de la muestra consiste en fabricar unas pastillas con bromuro potásico (KBr), que es un producto transparente a los infrarrojos.

Si la medida es por reflexión, algunas de las técnicas son el ATR (Attenuated Total Reflection) que utiliza reflexión total, y el DRIFT que utiliza la reflectancia difusa.

Se puede afirmar entonces que existen dos tipos de espectrómetros infrarrojos, los dispersivos y los de Transformada de Fourier. Estos últimos tienen una serie de ventajas, entre las que cabe destacar las siguientes:

- *Permiten medir la longitud de onda de forma absoluta sin necesidad de hacer medidas de referencia o calibrados.

- *No emplean elementos dispersores para determinar el espectro, por lo que al detector le llega una cantidad de luz mucho mayor logrando una relación señal / ruido superior, más favorable para espectros de fuentes débiles que con otras técnicas.

En el espectrómetro por Transformada de Fourier, el haz de radiación infrarroja, incide sobre un divisor de haz que lo divide en dos haces perpendiculares de igual energía. Uno incide sobre un espejo móvil, y el otro sobre un espejo fijo. Ambos son reflejados y se recombinan dando lugar a una interferencia constructiva o destructiva dependiendo de la posición relativa de los espejos. El haz resultante pasa a través de la muestra y es absorbido selectivamente. Luego pasa al detector.

Entre sus aplicaciones en análisis cualitativo están el control de calidad de las aguas, en la industria de piensos, tabaqueras, análisis de plásticos, pinturas, suelos, caracterización de catalizadores, de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, estudios electroquímicos in-situ, etc.

3.12.3. La fluorescencia de rayos X.

La fluorescencia de rayos X es una técnica analítica excelente a la hora de ejecutar un análisis elemental de una amplia gama de materiales. Además, en general, no supone la destrucción de la muestra a analizar.

La emisión de fotones (luz) como resultado de un proceso de estabilización electrónica se llama fluorescencia.

Las transiciones electrónicas en bandas de valencia son el corazón teórico de la espectroscopía de absorción y de fluorescencia.

Para entenderlo mejor, se puede explicar de manera más sencilla si se piensa en un objeto irradiado por la luz solar, que a lo largo de un tiempo más o menos breve, se calienta. Es lógico puesto que dicho objeto, al ser irradiado, absorbe la radiación, lo que provoca su calentamiento. Las moléculas que se encontraban en estado electrónico excitado en el interior del objeto, se relajaron permitiendo que sus electrones cayeran al estado fundamental, provocando en este proceso una pérdida de energía en forma de calor. Sin embargo, hay casos en los que parte de la energía se pierde como calor y otra parte se pierde por emisión de un fotón de menor energía, menor frecuencia y mayor longitud de onda. Se llama fluorescencia a este efecto de emitir luz de una longitud de onda determinada al ser irradiado por luz de otra longitud de onda.

En Química Analítica, las reacciones de fluorescencia pueden ser muy útiles, ya que la emisión de radiación fluorescente es específica de cada compuesto. Además, la intensidad de la radiación se puede relacionar de forma directa con la concentración de un analito. En realidad, son muy pocos los compuestos que fluorescen. Algunos otros, pueden fluorescer agregándoles o “marcándolos” con una molécula que sí lo haga.

Esta técnica consiste en irradiar el material con un haz de rayos X primarios de mayor energía que la radiación UV o visible, provocando la expulsión de un electrón interno de los átomos presentes en la matriz. El electrón expulsado es sustituido por otro de una capa superior, y este proceso genera la emisión de fotones de rayos X característicos de cada elemento presente en la muestra. Como el haz de rayos X con que se irradia la muestra no se filtra, los elementos emitirán sus líneas fluorescentes características.

La longitud de onda o energía de cada una de estas radiaciones emitidas es característica de cada elemento, permitiendo, por tanto, al identificarlas, conocer los elementos que componen la muestra. La intensidad de dichas radiaciones nos da también información sobre la concentración de cada uno de los elementos.

Es una técnica de alta sensibilidad y gran precisión, rápida y que permite el análisis de materiales conductores y no conductores, líquidos, sólidos, inorgánicas, orgánicas, etcétera, cuya preparación es bastante sencilla.

Interesa trabajar con el mayor voltaje posible en el tubo de rayos X para asegurar que el mayor número de elementos de la muestra produzcan una excitación fluorescente. También interesa con vistas al análisis cuantitativo. En general, la alta frecuencia en la región de los RX se genera por bombardeo de un material blanco con un haz de electrones de alta velocidad. Los tubos de blanco de tungsteno y el de hierro 55 radiactivo, son los más comunes. Ambos producen rayos X con la suficiente energía para la mayor parte de los usos.

Se ha de tener en cuenta cuando se emplea esta técnica, que sólo se pueden identificar elementos con pesos atómicos mayores que 20. La razón es que sólo los elementos más pesados poseen suficientes electrones para poder originar las transiciones electrónicas desde capas interiores.

Los espectros de fluorescencia con rayos X se pueden medir con instrumentos basados en principios de energía dispersiva o no dispersiva. En los últimos, la radiación fluorescente pasa por un filtro y se dirige a un fotomultiplicador contador. No es el caso del equipo utilizado en este proyecto.

3.12.4. Difracción de rayos X.

La red cristalina es una distribución tridimensional periódica de átomos en el espacio. Cada red puede describirse especificando la posición de los átomos en una celda unidad que se repite.

La difracción de rayos X es una técnica de uso cotidiano para la determinación de fases cristalinas y de su orientación espacial.

La disposición regular de los átomos dentro de una red cristalina da lugar a un fenómeno colectivo de interferencia, es la difracción que se detecta como cambios en la dirección del haz de rayos X emergente de un material respecto del haz incidente. La dependencia de la intensidad con la orientación espacial permite determinar la composición de los planos atómicos y las distancias entre éstos. Así se caracteriza la red cristalina en su totalidad.

Cuando la interferencia de ondas es constructiva, se cumple la condición de difracción y la ley de Bragg:

$$n\lambda = 2dhkl \sin\theta$$

n = número entero que representa órdenes de difracción

θ = ángulo entre la dirección incidente y el conjunto de planos atómicos paralelos de índices (hkl)

$dhkl$ = distancia interplanar

λ = longitud de onda

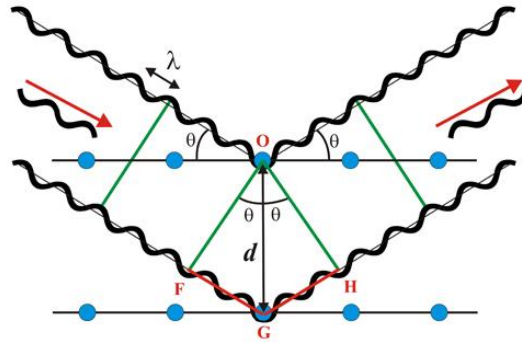


Figura 3.4. Representación geométrica de la ley de Bragg.

Para producir rayos X en difracción se aplica un voltaje entre un cátodo y un ánodo metálicos, ambos en el vacío. Cuando se calienta el cátodo se liberan electrones, que al chocar con el anticátodo, se emiten rayos X.

Hay dos formas de llevar a cabo el análisis por difracción de rayos X. Una de ellas emplea rayos X de espectro continuo dejando inmóvil la muestra y detectando las reflexiones en cierta región del espacio. La otra, emplea radiación monocromática, rotando la muestra y detectando reflexiones en una posición fija o en una combinación de rotaciones y desplazamientos del detector.

Cuando la muestra es en polvo o policristalina, se recurre a la radiación monocromática y la instrumentación más habitual son los difractómetros de Bragg-Brentano, en los que la muestra debe ser plana y se coloca en el interior de un círculo en el plano formado por la fuente, la muestra, y el detector.

En la difracción en polvo, para cada dirección del haz incidente y cada posición del detector (cada ángulo θ), se obtiene la contribución de todos los pequeños monocristales que conforman la muestra del material objeto de estudio. Con el haz de rayos X monocromático, y dado que la distribución de los granos es aleatoria, habrá un cierto número de cristales con la orientación correcta para que el conjunto de planos (hkl) muestre la difracción en el ángulo θ correspondiente. Se obtiene un difractograma, de intensidad frente al ángulo θ de difracción, cuya información a menudo es suficiente para determinar completamente la estructura cristalina.

Cuando el material es semicristalino, es decir, con zonas que no presentan orden atómico de largo alcance, su parte amorfa no produce reflexiones en difracción. Se manifiesta en el difractograma como un máximo redondeado sobre el que aparecen las reflexiones de la parte cristalizada. La comparación entre el área integrada de este máximo, y la de los picos debidos a la parte cristalina, proporciona el grado de cristalinidad del material. Esta técnica es muy útil en polímeros semicristalinos como el polietileno.

El tamaño de los granos de un material afecta a la anchura de los picos de difracción. La anchura crece al disminuir el tamaño de grano. A partir de las anchuras de picos, es posible determinar el tamaño promedio de grano gracias a diversos modelos de cálculo.

3.13. Procedimiento experimental para el análisis de la escoria tipo LD o BOF.

El procedimiento experimental desarrollado en este trabajo se ha dividido en dos partes. Cada una de ellas corresponde a un ensayo diferente, y se denominarán a partir de este punto: ensayo 1 y ensayo 2.

En ambos ensayos se ha partido del mismo material, escoria de acería LD o BOF procedente de la empresa Acerera Su origen data del año 2009, habiendo sido trasladadas a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Campus Dos y almacenadas en el área de ingeniería química correspondiente.

Una vez en el laboratorio, la escoria fue molida y tamizada, con tamiz manual CISA de 250 μm . La granulometría final de la escoria LD o BOF utilizada en este trabajo es entonces inferior a 250 μm .

3.14. Caracterización de la escoria aceraría tipo LD o BOF.

El primer paso ha sido caracterizar la escoria de partida con el fin de conocer su composición química y sus propiedades mineralógicas y texturales. Es la mejor forma de iniciar la búsqueda de posibles aplicaciones de la escoria como precursor de compuestos químicos, con una caracterización lo más completa posible.

La escoria molida y tamizada se secó en estufa a 120 $^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Durante todo el proceso de caracterización ésta se llamará muestra BOF-1.

Para estudiar la solubilidad y movilidad en condiciones neutras de los distintos componentes de la escoria, se separó una fracción de la misma y se lavó repetidas veces con agua destilada. A continuación se filtró y se secó a 120 $^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Será la muestra BOF-Lab.

3.14.1. Caracterización química.

Se hizo un análisis elemental de carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre a las dos muestras de escoria (BOF y EBOF-Lab), y se obtuvieron los siguientes resultados.

| MUESTRA | % C | % N | % H | % S |
|---------|------|------|------|------|
| BOF | 0.06 | 2.59 | 1.2 | 0.2 |
| BOF-lab | 0.05 | 2.58 | 1.16 | 0.18 |

Tabla 3.2 caracterización química de escoria

El análisis elemental realizado a la escoria lavada (BOF-Lab) muestra valores de N, C, H y S similares a los obtenidos para la escoria de acería (BOF).

El equipo utilizado para el análisis elemental. Analizador Elemental micro muestra de C, H, N y S marca LECO modelo CNHS-932.



3.5.



3.6.

Figura 3.5 y 3.6 Analizado marca LECO modelo CNHS-932.

- * Tamaño nominal de muestra: 2 mg
- * Tiempo de análisis (C, H, N y S): 3 minutos
- * Sistema de detección: Detectores independientes de IR de estado sólido no dispersivo para C, H y S y de conductividad térmica para N
- * Automuestreador automático para 50 muestras
- * Balanza analítica Sartorius M2P
- * PC interno de control con pantalla Touchscreen

Mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) se hizo un análisis químico elemental tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos mayoritarios presentes en las muestras y de los elementos traza. Para ello fue necesario preparar las muestras.

El equipo utilizado en esta técnica es un espectrofotómetro Philips PW2404 con cargador automático PW2504, tubo con ánodo de rodio de 5 kW de potencia, y cristales analizadores. Consta de 3 detectores, uno de sellado de xenón, otro de centelleo, y otro de flujo gaseoso.



Figura 3.7 Espectrofotómetro Philips PW2404 con cargador automático PW2504

La composición química de los componentes mayoritarios correspondiente a las dos muestras de escoria (BOF y BOF-Lab), determinada por la técnica FRX, se detalla en la tabla 3.4

En la tabla 3.5, se muestran los valores correspondientes a los componentes traza. Aparece en esta tabla junto a cada elemento, el límite de detección del equipo (LOD^a) para la determinación de cada uno de ellos.

| | |
|--------------------------------|----------------|
| R.M.S | 0.000 |
| Sum before normalization: | 129.2% |
| Normalised to : | 100.0% |
| Sample type: | Pressed powder |
| Initial simple weight (g): | 2.006 |
| Weight after pressing (g): | 5.027 |
| Correction applied for medium: | No |
| Correction applied for film: | None |
| Used compound list: | OXIDES |

| | Compound name | Conc. (%) |
|-----------|--------------------------|----------------------|
| 1 | CaO | 57.56 |
| 2 | FE2O3 | 13.67 |
| 3 | SiO2 | 12.04 |
| 4 | MgO | 7.19 |
| 5 | Al2O3 | 3.41 |
| 6 | SO3 | 2.12 |
| 7 | MnO | 1.41 |
| 8 | V2O5 | 0.66 |
| 9 | P2O5 | 0.63 |
| 10 | Na2O | 0.54 |
| 11 | TiO2 | 0.45 |
| 12 | Cl | 0.15 |
| 13 | K2O | 0.09 |
| 14 | ZnO | 0.04 |
| 15 | SrO | 0.02 |

Tabla 3.3 Valores correspondientes

En conjunto, todos los componentes le confieren un carácter básico (pH 12.5), por lo que sus suspensiones tendrán una alta capacidad de neutralización de medios fuertemente ácidos.

Respecto a la muestra de escoria lavada (BOF-Lab), el análisis por FRX refleja que su composición química es análoga a la de la muestra BOF, lo que indica que al lavar la escoria no se disuelven de forma significativa los constituyentes mayoritarios de la misma, ni lixivian sus elementos traza. En el caso de estos últimos, se debe probablemente a que se encuentran formando fases cristalinas estables en el material, al igual que ocurre con los minerales en la naturaleza.

3.14.2. Caracterización estructural.

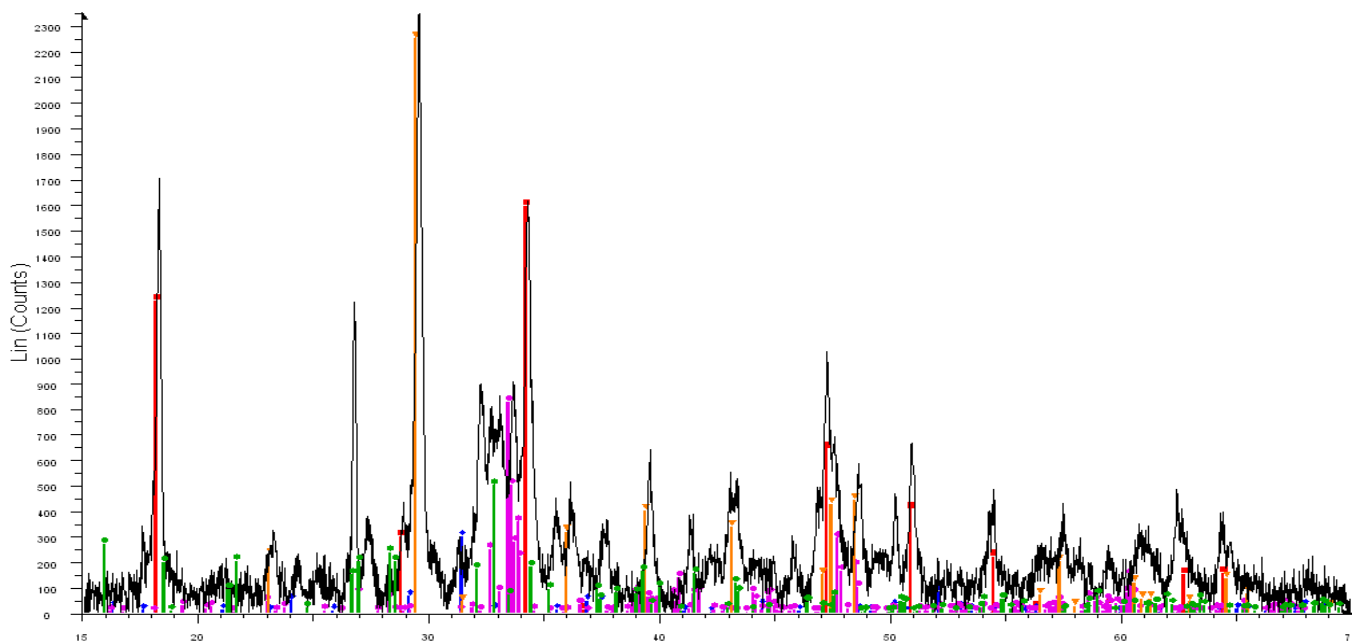
El patrón de difracción de rayos X de la escoria refleja de forma muy clara su heterogeneidad, constituida por una mezcla de fases cristalinas.

El equipo utilizado para llevar a cabo esta técnica es un difractómetro Philips modelo XPERT PRO, tubo con ánodo de cobre y óptica de haz incidente con rendija programable de divergencia y atenuador de haz directo.



Figura 3.8 Difractómetro Philips modelo XPERT PRO

El difractograma obtenido se muestra a continuación:



Las conclusiones del análisis de los datos de difracción indican que la escoria presenta la siguiente composición mineralógica.

Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Iarnita (Ca_2SiO_4), merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), ferrita de calcio y magnesio ($\text{Ca}_2\text{MgFe}_2\text{O}_6$), calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), hematita (Fe_2O_3) y cuarzo (SiO_2), como constituyentes mayoritarios.

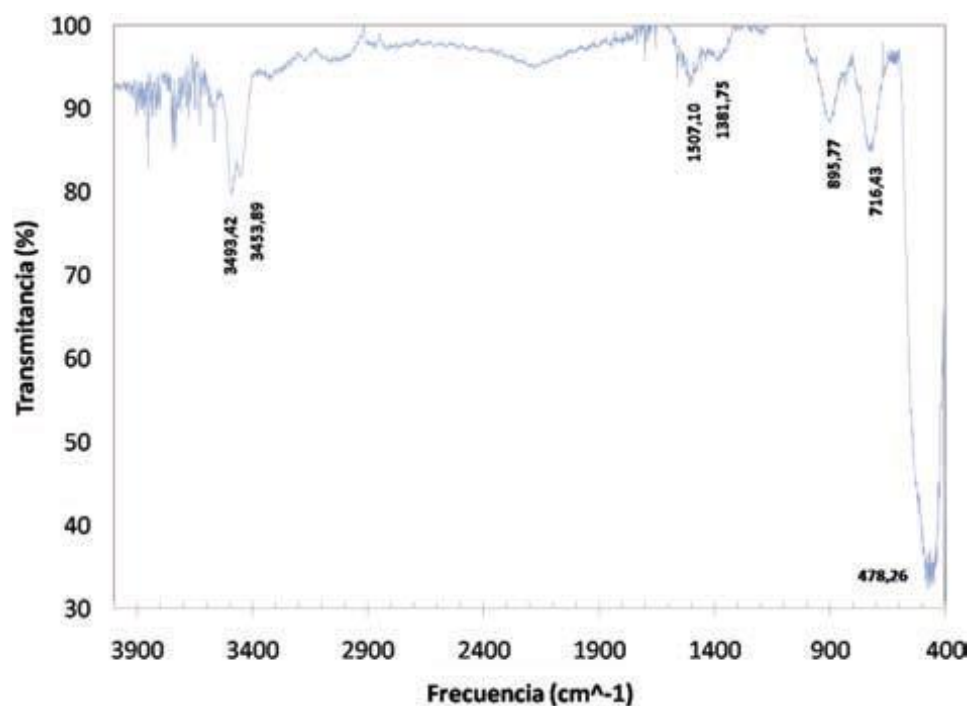
La escoria también contiene cal libre (CaO) y hierro elemental. Los componentes minoritarios son difíciles de asignar por esta técnica debido a la baja intensidad de sus líneas de difracción. Dada la complejidad de la interpretación del difractograma anterior, se decide hacer un análisis con la técnica de espectroscopia infrarroja, que aporta información sobre la naturaleza de los grupos funcionales presentes en la red cristalina, ayudando así a entender la estructura de los compuestos que forman la escoria.

El equipo de espectroscopía infrarroja que se ha utilizado es un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Frontier L128-0044 que opera con Transformada de Fourier. La preparación de la muestra fue por pastilla de bromuro potásico.



Figura. 3.9. Espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Frontier L128-0044.

El espectro FTIR (Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier) se muestra a continuación:



Grafica 3.1. espectro FTIR de la escoria LD o BOF.

En la región comprendida entre 3695 y 3530 cm^{-1} se observan bandas intensas que corresponden a las vibraciones de tensión de grupos hidroxilos, la banda que aparece a 945 cm^{-1} corresponde a los modos de deformación.

Ambas bandas confirman la presencia de hidróxidos y oxihidróxidos en la escoria. Asignar los distintos compuestos presentes en la escoria, las bandas de tensión características de los grupos OH no resulta fácil,

debido a la superposición de dichas bandas en la correspondiente zona del espectro. La banda observada a 3692 cm^{-1}

Y el hombro a 3624 cm^{-1} se puede asignar a vibraciones de tensión de los grupos hidroxilos presentes en silicatos de aluminio que contienen grupos hidroxilos estructurales.

La banda muy intensa y estrecha que aparece a 3644 cm^{-1} es característica de la vibración de tensión de los grupos OH del hidróxido de calcio. La banda observada a 3538 cm^{-1} se puede asignar a vibraciones de tensión de los grupos hidroxilo presentes en los compuestos de aluminio hidratados

Los carbonatos de calcio y magnesio hidratados también muestran bandas intensas a 3435 cm^{-1} y 3629 cm^{-1} .

El hombro ancho que aparece a 3442 cm^{-1} puede asignarse a vibraciones de tensión de los grupos hidroxilos de carbonatos hidratados o bien a moléculas de agua fisisorbida o coordinada. La banda a 1638 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de deformación de los grupos OH presentes en los hidróxidos y en las fases hidratadas de la escoria.

Las intensas bandas que aparecen a 1797 cm^{-1} y 1425 cm^{-1} corresponden a la vibración del enlace C-O del ión CO_3^{2-} y las bandas a 873 y 715 cm^{-1} pueden ser asignadas a la vibración producida por la deformación del enlace C-O.

En la región comprendida entre 1100 y 950 cm^{-1} se encuentran las bandas de tensión Si-O características de la sílice y de los silicatos. En esta zona también aparecen las bandas de absorción debidas a vibraciones de grupos hidroxilo presentes en los oxihidróxidos de aluminio y en los oxihidróxidos de hierro.

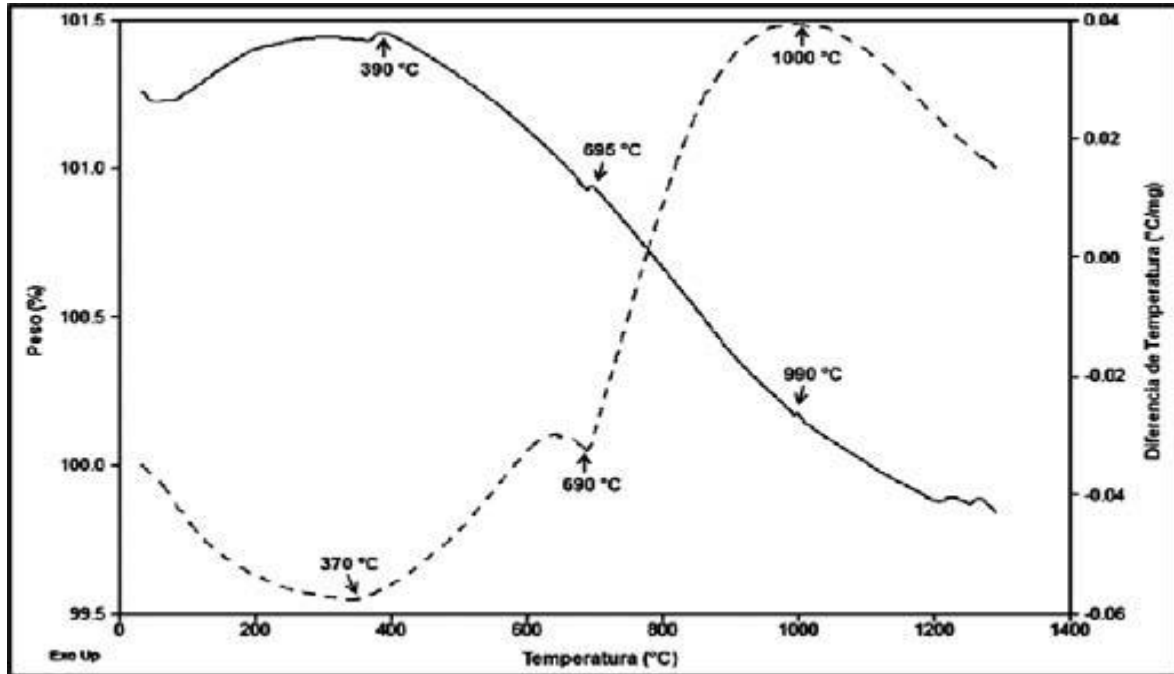
La banda a 753 cm^{-1} corresponde a la vibración de tensión del enlace Al-O indica la presencia de compuestos de aluminio en la escoria, tales como silicatos, óxidos y aluminatos. Estos compuestos no se habían detectado como componentes mayoritarios en el análisis de FRX.

Las absorciones en la región entre 600 y 450 cm^{-1} son típicas de la mayoría de los óxidos metálicos Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , y ferritas. Debido a la heterogeneidad de la escoria es muy difícil obtener información adicional de esta región del espectro, ya que las bandas características de los distintos constituyentes.

Caracterización en función del comportamiento térmico.

Los equipos de análisis térmicos utilizados son Mettler SDTA851e y DSC822e. El programa de calentamiento al que se sometió la muestra fue de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar los 1000°C en atmósfera de nitrógeno.

Las curvas obtenidas con el análisis térmico (gravimétrico y diferencial) muestran las distintas etapas en las que tiene lugar la descomposición térmica de la escoria (BOF). Se adjuntan a continuación:



Grafica 3.2. de comportamiento térmico de la escoria de tipo LD o BOF

La escoria objeto de estudio, comienza a descomponerse entre 80 y 220 °C, en ese intervalo la escoria pierde el agua físicamente adsorbida, dando lugar a una reducción de peso del 1%. Entre 220 y 340 °C se produce un pequeño efecto endotérmico acompañado de una pérdida de peso de 1.6%, que puede ser debido a la pérdida del H₂O estructural de los carbonatos hidratados. Un segundo pico endotérmico aparece entre 340 y 420 °C, implica una pérdida de peso del 1.8%, y puede ser debido a la deshidratación de los hidróxidos de hierro y magnesio.

Entre 420 y 560 °C se produce una pérdida de peso del 6.5%, debida a la deshidratación parcial de los silicatos y a la deshidroxilación del Ca (OH)₂ que da lugar al CaO.

Finalmente, entre 600 y 900 °C se producen la descomposición endotérmica de los carbonatos con liberación de CO₂, y la deshidratación total de los silicatos. A esta etapa le corresponde una pérdida de peso del 3.4%.

CAPITULO 4

DISEÑO, CONSTRUCCION Y APLICACIÓN DE
PROTOTIPOS PARA ADSORCION DE CO₂.

La energía mecánica, indispensable para poner en acción diferentes máquinas se puede obtener utilizando energía térmica, hidráulica, solar y eólica. La que más se utiliza es la energía térmica obtenida de los combustibles de naturaleza orgánica. Los equipos energéticos que más aceptación han tenido son los motores de combustión interna, a ellos corresponde más de un 80 % de la totalidad de la energía producida en el mundo. Los medios de locomoción son responsables únicamente de un 5 % de las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), son responsables del 25 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), del 87 % de las de monóxido de carbono y del 66% de dióxidos de nitrógeno (NO_x).

Por estas razones se está intentando por todos los medios posibles la reducción de los gases de escape producidos por los millones de automotores que actualmente circulan en todo el mundo que producen al año millones de toneladas de emisiones contaminantes que afectan la vida de todos los organismos que habitan el planeta, por ello la necesidad de construir dispositivos (prototipos) que ayuden a la eliminación de uno de los gases de escape como es el caso del CO₂ que es uno de los principales gases de efecto invernadero que más impactan al medio ambiente ya que genera cambios drásticos al medio ambiente, los organismos y al clima en general.

Para llevar a cabo la construcción de los dispositivos (prototipos) es fundamental conocer el problema de la contaminación ambiental por emisiones de gases de combustión ya que de esto dependerá el diseño de dispositivos (prototipos) que ayuden a la eliminación parcial de estos. Todos estos tienen como fin lograr una mejor calidad del aire y por consiguiente una mejora en la calidad de vida de todos los organismos y una menor degradación del planeta.

Para lograr todo esto es necesaria la construcción de prototipos que puedan ser aplicados a los automóviles que circulan en la actualidad no solo en México sino en todo el mundo. Estos prototipos deben contar con las características de que ayuden a la eliminación parcial de los gases de escape producidos por los motores de combustión interna, para el caso de los prototipos construidos en este caso la eliminación de una fracción del CO₂ que se produce por acción de la combustión de motor del automóvil.

Dicho lo anterior los prototipos propuestos en este trabajo tienen como finalidad el adsorber una fracción de el CO₂ producido por el automóvil, de manera que el CO₂ sea adsorbido por un compuesto sólido para este caso se utilizó la escoria tipo LD o BOF que es un desperdicio de la extracción y purificación del acero, a la cual la mayoría de esta solo es tratada como desperdicio y poco utilizada como un materia prima sino como un producto de segunda.

Dicha zeolita es rica en CaO que es el principal precursor para la eliminación del CO₂ y forma parte fundamental de los prototipos construidos y aplicados a algunos modelos de automóviles, algunos de estos modelos de automóviles fueron:

| MARCA | MODELO | AÑO | #CILINDROS | LITROS DE COMBUSTIBLE |
|-------|--------|------|------------|-----------------------|
| GMC | JIMMY | 1996 | 6 | 4.3 L |
| VOLVO | S40T | 2000 | 4 | 2.0L |

La integración de los dispositivos en los modelos anteriormente mencionados tubo como base la mínima modificación del sistema de escape con que el auto cuenta desde su fabricación en planta así como también, que los prototipos cumplan con ciertas características como son; el peso ya que este no debe de afectar el consumo de combustible, que soporte las condiciones ambientales a las que el automóvil sea expuesto entre otras.

Para lograr lo anterior en los prototipos construidos y aplicados a los automóviles ya mencionados fue necesario tener conocimientos de mecánica automotriz, mecánica de fluidos y comportamiento real del automóvil, ya que fue fundamental en la toma de decisiones para la elección de materiales, diseño, construcción y aplicación de los prototipos.

4.1. Componentes de los gases de escape.

El aire está compuesto básicamente por dos gases: nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂). En un volumen determinado de aire se encuentra una proporción de nitrógeno (N₂) del 79 % mientras que el contenido de oxígeno es aproximadamente de un 21 %.

El nitrógeno durante la combustión, en principio, no se combina con nada y tal como entra en el cilindro es expulsado al exterior sin modificación alguna, excepto en pequeñas cantidades, para formar óxidos de nitrógeno (NO_x). El oxígeno es el elemento indispensable para producir la combustión de la mezcla.

Cuando se habla de la composición de los gases de escape de un vehículo se utilizan siempre los mismos términos: monóxido de carbono, óxido nítrico, partículas de hollín o hidrocarburos. Decir que estas sustancias representan una fracción muy pequeña del total de los gases de escape. Debido a ello, antes de describir las diferentes sustancias que integran los gases de escape, le mostramos a continuación la composición aproximada de los gases que despiden los motores diésel y de gasolina.

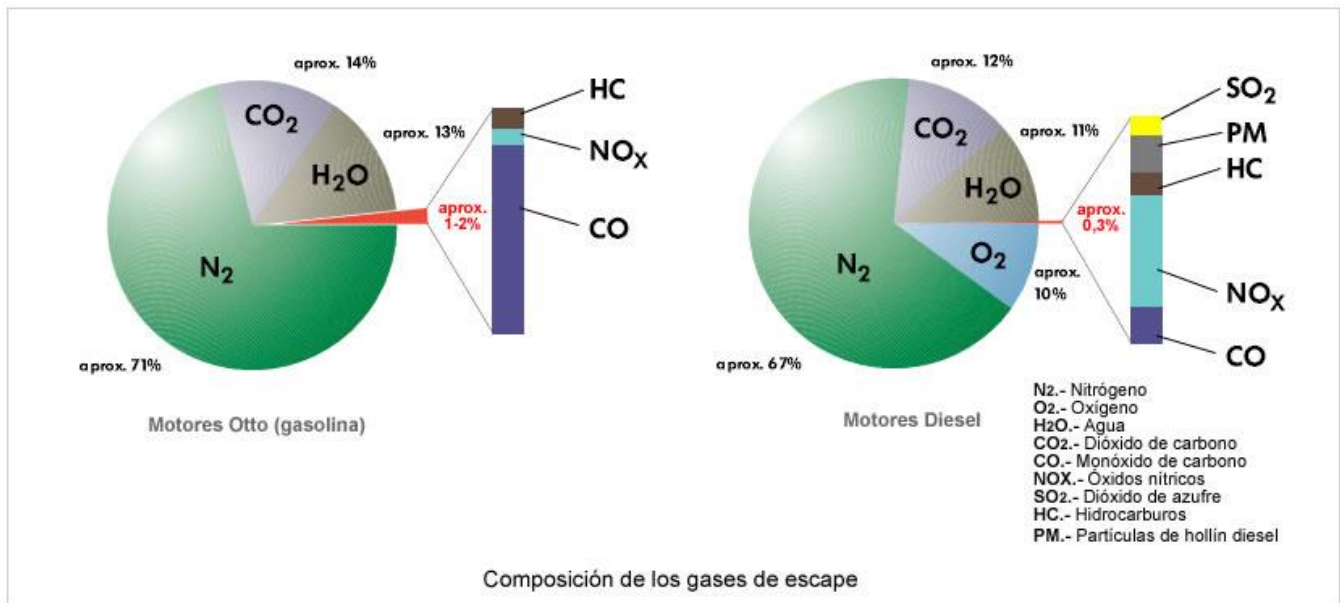


Figura 4.1 Composición de los gases de escape.

4.1.1. Descripción de las sustancias que integran los gases de escape.

El motor de combustión interna, por su forma de funcionar, no es capaz de quemar de forma total el combustible en los cilindros. Pero si esta combustión incompleta no es regulada, mayor será la cantidad de

sustancias nocivas expulsadas en los gases de escape hacia la atmósfera. Dentro de los gases generados en la combustión, hay unos que son nocivos para la salud y otros no.

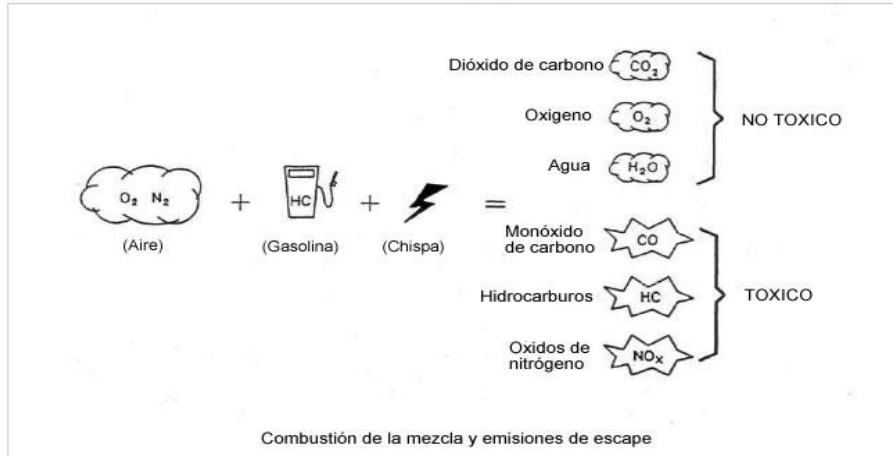


Figura 4.2 componentes de la combustión-residuos de la combustión.

Nitrógeno.

El nitrógeno es un gas no combustible, incoloro e inodoro, se trata de un componente esencial del aire que respiramos (78 % nitrógeno, 21 % oxígeno, 1 % otros gases) y alimenta el proceso de la combustión conjuntamente con el aire de admisión. La mayor parte del nitrógeno aspirado vuelve a salir puro en los gases de escape; sólo una pequeña parte se combina con el oxígeno O_2 (óxidos nítricos NO_x).

Oxígeno (O_2)

Es un gas incoloro, inodoro e insípido. Es el componente más importante del aire que respiramos (21 %). Es imprescindible para el proceso de combustión, con una mezcla ideal el consumo de combustible debería ser total, pero en el caso de la combustión incompleta, el oxígeno restante es expulsado por el sistema de escape.

Agua (H_2O).

Es aspirada en parte por el motor (humedad del aire) o se produce con motivo de la combustión "fría" (fase de calentamiento del motor). Es un subproducto de la combustión y es expulsado por el sistema de escape del vehículo, se lo puede visualizar sobre todo en los días más fríos, como un humo blanco que sale por el escape, o en el caso de condensarse a lo largo del tubo, se produce un goteo. Es un componente inofensivo de los gases de escape.

Dióxido de carbono (CO₂).

Se produce al ser quemados los combustibles que contienen carbono (gasolina,). El carbono se combina durante esa operación con el oxígeno aspirado. Es un gas incoloro, no combustible.

El dióxido de carbono CO₂ a pesar de ser un gas no tóxico, reduce el estrato de la atmósfera terrestre que suele servir de protección contra la penetración de los rayos UV (la tierra se calienta). Las discusiones generales en torno a las alteraciones climatológicas (efecto “invernadero”), el tema de las emisiones de CO₂ se ha hecho consciente en la opinión pública.

Monóxido de carbono (CO).

Se produce con motivo de la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono. Es un gas incoloro, inodoro, explosivo y altamente tóxico. Bloquea el transporte de oxígeno por parte de los glóbulos rojos. Es mortal, incluso en una baja concentración en el aire que respiramos. En una concentración normal en el aire ambiental se oxida al corto tiempo, formando dióxido de carbono CO₂.

Óxidos nítricos (NO_x).

Son combinaciones de nitrógeno N₂ y oxígeno O₂ (p. ej. NO, NO₂, N₂O,...). Los óxidos de nitrógeno se producen al existir una alta presión, alta temperatura y exceso de oxígeno durante la combustión en el motor. El monóxido de nitrógeno (NO), es un gas incoloro, inodoro e insípido. Al combinarse con el oxígeno del aire, es transformado en dióxido de nitrógeno (NO₂), de color pardo rojizo y de olor muy penetrante, provoca una fuerte irritación de los órganos respiratorios.

Las medidas destinadas a reducir el consumo de combustible suelen conducir lamentablemente a un ascenso de las concentraciones de óxidos nítricos en los gases de escape, porque una combustión más eficaz produce temperaturas más altas. Estas altas temperaturas generan a su vez una mayor emisión de óxidos nítricos.

4.2. Componentes del sistema de eliminación de gases de escape del automóvil.

El sistema de escape se incluye en todos los vehículos modernos en los México y en otros países ha sido diseñado para realizar tareas muy específicas para controlar y reducir la emisión de gases tóxicos a la atmósfera. Al mismo tiempo, este sistema sofisticado elimina ruidos fuertes perturbadoramente generados por el motor.

El sistema de escape es el sistema de eliminación de residuos para un vehículo motorizado. Los gases residuales de la combustión de combustible y el aire dentro de los cilindros viajan a través de un tubo largo y, finalmente, se expulsan en la parte trasera del coche. Estos gases son tóxicos, y varios dispositivos de control de emisiones

se integran en el sistema para eliminar algunas de las sustancias tóxicas antes que el resto se devuelve a la atmósfera exterior del vehículo.

Válvula PCV.

La válvula PCV es un dispositivo operado por el vacío del motor, generalmente se localiza en la tapa de punterías o el múltiple de admisión. Controla el paso de gases no quemados en el Carter reciclándolos con la mezcla de aire-combustible. Esto lleva a prevenir que los gases salgan del motor creando contaminación y a obtener una mezcla perfecta aire-combustible.

Las válvulas PCV son equipo estándar en la mayoría de los vehículos con motor de gasolina desde 1963. Son unos de los dispositivos más antiguos y efectivos para controlar las emisiones automotrices.



Figuras4.3. Esquema de la válvula PCV.

Múltiple de escape.

El múltiple de escape es un complejo de tuberías que se instala a la salida de las cámaras de válvulas y que conduce los gases de la combustión hacia el exterior a un lugar alejado del cuerpo del motor, habitualmente una salida en la parte posterior del automóvil.

El múltiple se encuentra ubicado en la cabeza de motor (culata) de los cilindros y cuenta con entradas para que pasen los gases que sale de la cámara de combustión. El múltiple de escape también se llama "camarín". Está diseñado con suaves curvas y tiene ángulos precisos que mejoran el flujo de los gases.



Figura 4.4. Ubicación del múltiple de escape.

Sensor de oxígeno.

El sensor de oxígeno comenzó a aparecer en los vehículos con el desarrollo de los sistemas de inyección de combustible. La función básica del sensor es controlar la mezcla de aire y combustible en condiciones de ralentí, aceleración moderada y velocidad de cruce. En condiciones de aceleración fuerte, el sensor de oxígeno ingresa en “circuito abierto”, lo que básicamente significa que el sistema computarizado de administración del motor ignora el sensor de oxígeno. Los sensores de oxígeno tienen un rango de límites más pequeño para detectar y ajustar la diferencia a partir de una relación aire/combustible.

La PCM usa al sensor de oxígeno para asegurar que la mezcla aire/combustible sea correcta para el convertidor catalítico. Con base en señal eléctrica proveniente del sensor de oxígeno, la PCM ajustará la cantidad de combustible inyectado.

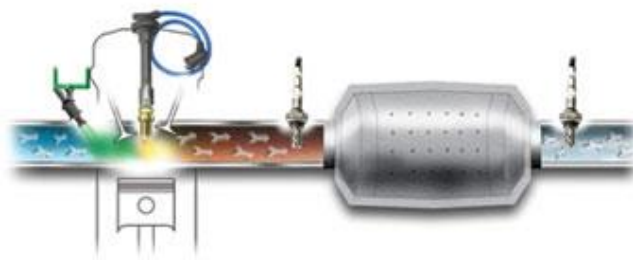


Figura 4.5. Ubicación del sensor de oxígeno antes y después del convertidor catalítico.

Catalizador.

El catalizador tiene como misión disminuir los elementos contenidos en los gases de escape mediante la técnica de la catálisis. Se trata de un dispositivo instalado en el tubo de escape, cerca del motor, ya que ahí los gases mantienen una temperatura elevada. Esta energía calorífica pasa al catalizador y eleva su propia temperatura, circunstancia indispensable para que este dispositivo tenga un óptimo rendimiento, que se alcanza entre los 400 y 700 grados centígrados.

Exteriormente el catalizador es un recipiente de acero inoxidable, frecuentemente provisto de una carcasa-pantalla metálica antitérmica, igualmente inoxidable, que protege los bajos del vehículo de las altas temperaturas alcanzadas.

En su interior contiene un soporte cerámico o monolito, de forma oval o cilíndrica, con una estructura de múltiples celdillas en forma de panal, con una densidad de éstas de aproximadamente 450 celdillas por cada pulgada cuadrada (unas 70 por centímetro cuadrado). Su superficie se encuentra impregnada con una resina que contiene elementos nobles metálicos, tales como Platino (Pt) y Paladio (Pd), que permiten la función de oxidación, y Rodio (Rh), que interviene en la reducción. Estos metales preciosos actúan como elementos activos catalizadores; es decir, inician y aceleran las reacciones químicas entre otras sustancias con las cuales entran en contacto, sin participar ellos mismos en estas reacciones. Los gases de escape contaminantes generados por el motor, al entrar en contacto con la superficie activa del catalizador son transformados parcialmente en elementos inocuos no polucionantes.

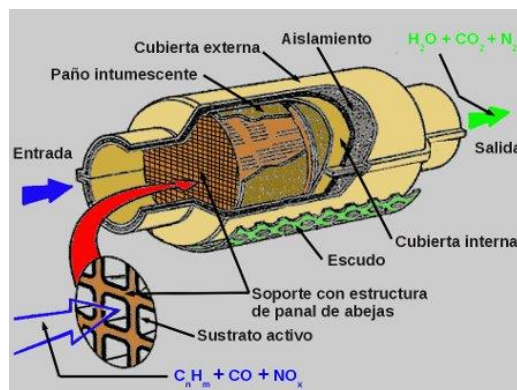


Figura.4.6. Componentes del convertidor catalítico.

Silenciador.

En el momento de la combustión del motor, los gases alcanzan una presión muy elevada, los cuales al salir pueden generar un ruido intenso por ello dichos gases de escape deben sometidos a una modificación o reducción de presión y temperatura antes de su exposición al medio ambiente.

Es por ello que existe el silenciador, cuya misión principal es la de disminuir el ruido de los gases al salir del motor, interactuando con las diferentes válvulas de escape.

Cuando éstas se abren, se realiza una descarga en alta presión de gases “quemados” hacia la tubería intermedia del escape, donde éstos se expanden y disminuye progresivamente su presión. Este aumento de volumen generará ondas de sonido con un menor tiempo de retención que los gases de escape, las cuales interactúan directamente con el silenciador, minimizando los ruidos que producen.

El silenciador entonces, convierte esta energía de la onda de sonido en calor, haciéndola pasar por diversas cámaras con reflectores y tubos en forma de laberintos perforados con diferentes tamaños.

A pesar de que el silenciador logra reducir el ruido, al disipar su energía, se demora la salida rápida de los gases de escape hacia al exterior, lo cual limita considerablemente las prestaciones del vehículo.

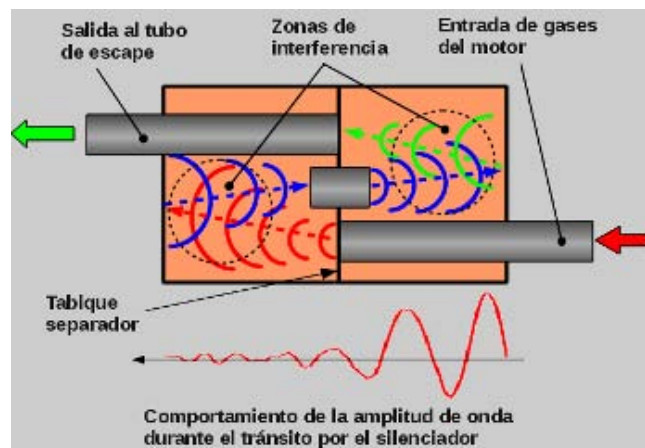


Figura. 4.7. silenciador acústico.

Todos los conceptos y descripciones de funcionamiento de los capítulos anteriores y conceptos de este capítulo tuvieron la finalidad de conceptualizar la idea general de cómo se realizó el diseño y construcción de los prototipos para la adsorción de CO₂ de los gases de escape de los automóviles y la adaptación de estos prototipos los mismos autos.

4.3. Descripción de la construcción de los prototipos para adsorción de CO₂.

Para facilitar la descripción de la construcción de dichos dispositivos nos referiremos a ellos como prototipo ADS-1 y prototipo ADM-2.

El prototipo ADS-1 se encuentra ubicado después del convertidor catalítico, soldado en el riel de tubería del sistema de escape del automóvil. Este dispositivo tomara la función de sustituir al silenciador convencional del automóvil el cual solo aminora la presión de los gases del escape al medio ambiente procurando con ello aminorar las ondas sonoras elevadas. El prototipo ADS-1 no solo cumplirá con la función de eliminación de ondas sonoras elevadas sino que auxiliara a la eliminación parcial del CO₂ contenido en los gases de escape provenientes de la combustión del motor del automóvil.

En cuanto al diseño y construcción del prototipo ADS-1 se realizó un amplio estudio en cuanto la afectación por la aplicación del prototipo propuesto ya que este no debe de alguna manera excesiva afectar la estructura y funcionamiento del automóvil.

Para la realización del diseño del prototipo ADS-1 se tomaron en cuenta las condiciones de operación alas que se tendría que exponer el prototipo, dichas condiciones son; la temperatura, presión, vibración, de igual manera en la construcción del prototipo ADS-1 se tomaron en cuenta factores como la corrosión excesiva, el sobrepeso, el retroceso de presión hacia el convertidor catalítico, la forma y numero de cámaras y disipadores del cuerpo interno.

A continuación se describe el diseño y construcción del dispositivo ADS-1.

4.3.1. Diseño del prototipo ADS-1 de tres cámaras para motores a gasolina.

En la realización del diseño del prototipo ADS-1 los datos técnicos fueron recopilados de los fabricantes automotrices.

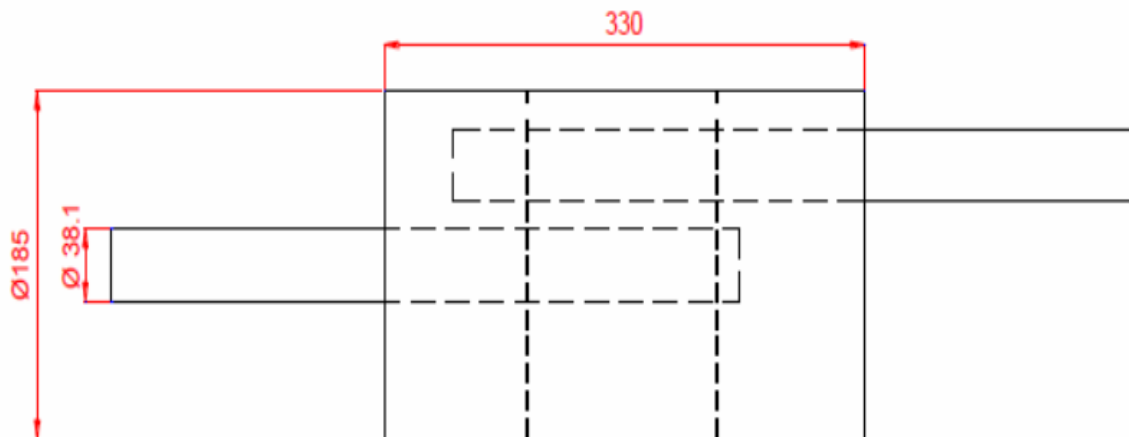


Figura 4.8. Diagrama de dimensiones del prototipo ADS-1 para adsorción de CO₂ del sistema de gases de escape del automóvil.

DATOS:

T superficie (T_w)=112

T entrada (T_{∞1})=140 °C

T salida (T_{∞2})=92°C

V entrada (V₁)=68.4 Km/h

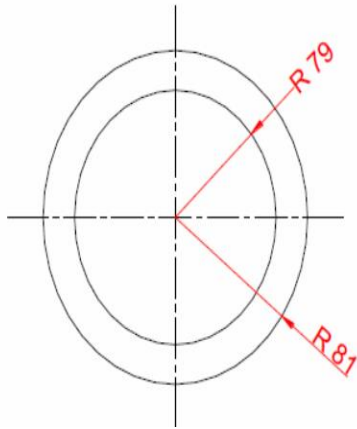
V salida (V₂)=31.2 Km/h

P salida (P₁)= 0.66 bar =0.6514 atm

P entrada (P₂)= 2.6041 =2.57 atm

Nota: se usa hidráulico DH por que el área por donde circula el fluido noes circular uniforme.

$$\frac{4A}{p} = DH$$



p = Perímetro

R = Radio

$$p = 2 \pi R$$

$$R = \frac{p}{2\pi} = \frac{0.5}{2\pi} = 0.079m$$

$$\begin{aligned} \text{AREA DEL CIRCULO} &= \pi R^2 \\ &= \pi (0.079)^2 \\ &= 0.0198 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$DH = \frac{4(0.0198)}{2} = 0.159912$$

Velocidad media.

$$V = \frac{v_1 + v_2}{2} + \frac{19 + 11.44}{2} = 15.22 \text{ m/s}$$

Temperatura global= Tb

$$T_b = \frac{T_{\infty 1} + T_{\infty 2}}{2} + \frac{140 + 92}{2} = 116 \text{ c} = 398 \text{ K}$$

Densidad= δ

$$\delta = + \frac{P_1}{RT_1} = \frac{2.5363 * 1.0132 \times 10^5}{287 * 413} = 2.168 \text{ Kg/m}^3$$

Temperatura filmica = Tf

$$T_f = \frac{T_w + T_b}{2} + \frac{112 + 116}{2} = 114 \text{ °c} = 387 \text{ °K}$$

Propiedades del aire a una temperatura filmica de 387 °K

Debemos interpolar para encontrar el valor de:

μ = Viscosidad Dinamica

K_f = Coeficiente de conductividad Termica

Pr = Numero de Prandtl

$$x = \frac{X_2 - X_1}{T_1 - T_2} (T - T_1) + X_1$$

$$\mu = \frac{\mu_2 + \mu_1}{T_2 - T_1} (T - T_1) \mu_1$$

$$\mu = 0.74 (2.286 - 2.075) \times 10^{-5} + 2.075 \times 10^{-5}$$

$$\mu = 2.231 \times 10^{-5} \text{ ms}$$

$$Kf = \frac{Kf_2 + Kf_1}{T_2 - T_1} (T - T_1) + Kf_1$$

$$Kf = 0.74 (0.03365 - 0.03003) + 0.03003$$

$$Kf = 0.03270 \text{ w/mc}$$

Presion reducida

$$Pr = \frac{Pr_2 + Pr_1}{T_2 - T_1} (T - T_1) + Pr_1$$

$$Pr = 0.74 (0.689 - 0.697) + 0.697$$

$$Pr = 0.691$$

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{V \cdot \delta_1 \cdot DH}{\mu} = \frac{15.22 \text{ m/s} \cdot 2.168 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.16 \text{ m}}{2.231 \cdot 10^{-5} \text{ ms}} = 236643.370$$

Determinar el tipo de flujo

$10^4 < Re < 5 \times 10^6$ flujo turbulento

Tubos lisos = $(1.82 \log Re - 1.64)^{-2}$ = Factor = f

Numero de Nusselt = Nu

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} * Re * Pr}{1.071 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right) (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

$$*f = 1.82 \log_{10} 236643.370 - 1.64^2$$

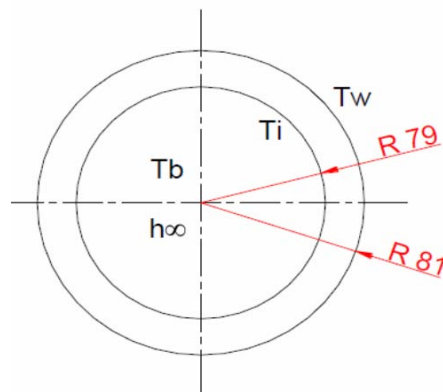
$$f = 0.01508$$

$$Nu = \frac{\frac{0.01508}{8} * 236643.370 * 0.691}{1.071 + 12.7 * 0.04342 \left(0.691^{\frac{2}{3}} - 1\right)} = 340.115$$

$$h_{\infty} = \frac{Nu * Kf}{DH} = \frac{340.115 * 0.03270}{0.16} = 69.51 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

coeficiente de calor por conveccion = h_{∞}

coeficiente de conductividad termica = Kf

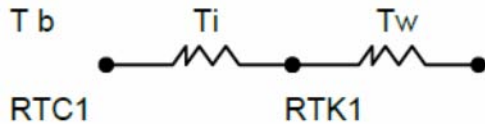


$$L = 0.33$$

$$e = 0.002$$

$K = \text{alvanizado } 70\% \text{ CU } 30\% \text{ Zn a } 10\text{uc} = 128 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$

$$Ac = P \times L$$



Transferencia de calor = q

$$q = \frac{T_b - T_o}{R_{tci} + R_{tk1}}$$

Resistencia térmica por convección

$$R_{tci} = \frac{1}{h_{\infty} * Ac} = \frac{1}{69.511 \text{ w/m}^2 \text{ c} * 0.33 * 0.5} = 0.0871 \text{ } ^\circ\text{C/w}$$

Resistencia térmica del galvanizado

$$R_{tk1} = \frac{e}{k * Ac} = \frac{0.002\text{m}}{128 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} * 0.33\text{m} * 0.5\text{m}} = 9.46969 * 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C/w}$$

Transferencia de calor = q

$$q = \frac{T_b - T_o}{R_{tci} + R_{tk1}}$$

$$q = \frac{(116 - 112)^\circ\text{C}}{0.08718 + 9.46969 * 10^{-5}} = 45.82 \text{ w}$$

4.3.2. Diseño del prototipo ADM-2.

El diseño del prototipo para adsorción de CO₂ de gases de escape tipo ADM-2, está basado en la estructura de chasis del automóvil ya que el diseño del prototipo no debería causar modificaciones mayores o comprometer la estructura del automóvil.

Dicho diseño se basa en causar el menor sobrepeso para el automóvil con la mayor exposición del material adsorbente (escoria) con las corrientes de CO₂ que existen en el medio ambiente ya que la adsorción será por coque de corrientes de aire con el automóvil.

Todo el cuerpo del prototipo ADM-2 fue construido con material galvanizado ya que será expuesto a condiciones medioambientales.

Prototipo ADM-2 de tres cámaras (Galvanizado)

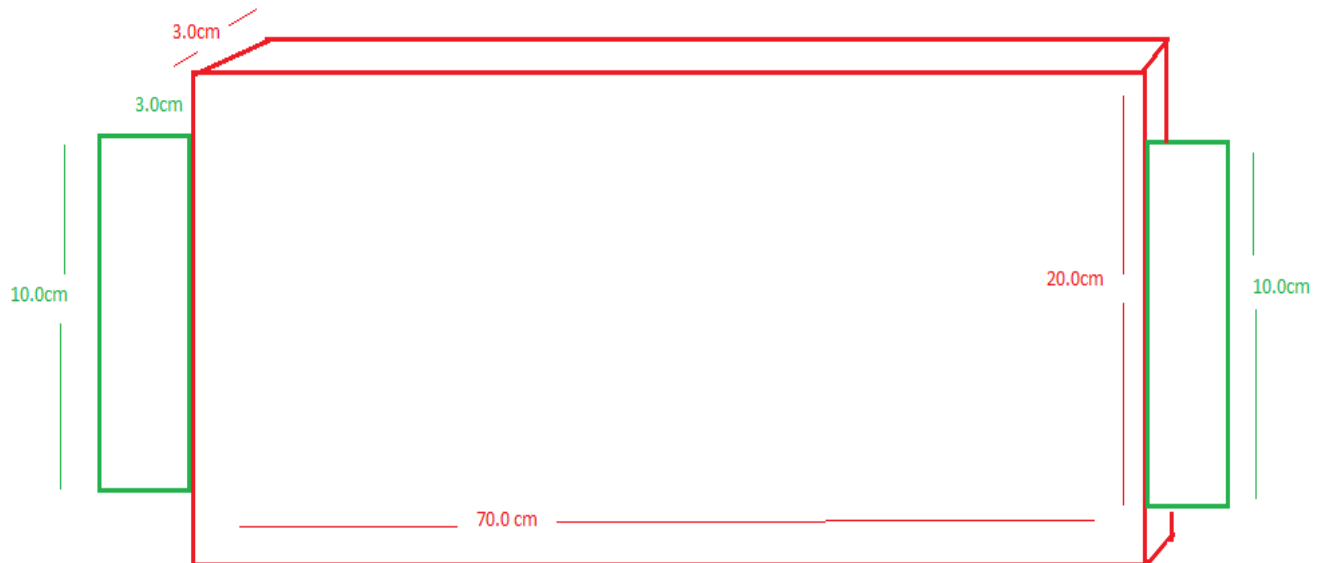


Figura.4.9. Diagrama de dimensiones del prototipo ADM-2 para adsorción de CO₂ del medio ambiente.

4.4. MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE LOS PROTOTIPOS ADS-1 Y ADM-2.

Lámina galvanizada.

Lámina recubierta en un proceso de inmersión en caliente con una capa uniforme de Zinc de alto grado, proporcionando una excelente protección anticorrosiva, así como catódica en los bordes expuestos por perforaciones y corte.

Los recubrimientos que se obtienen por galvanización en caliente están constituidos por varias capas de aleaciones zinc-hierro, fundamentalmente tres, que se denominan "gamma", "delta" y "zeta" y una capa externa de zinc (figura 4.) prácticamente puro (fase "eta"), que se forma al solidificar el zinc arrastrado del baño y que confiere al recubrimiento su aspecto característico gris metálico brillante.

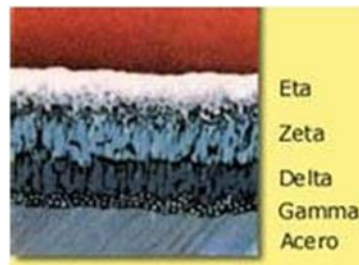


Figura.4.10. Capas de aleaciones zinc-hierro.

Al ser recubrimientos obtenidos por inmersión en zinc fundido, cubren la totalidad de la superficie de las piezas, tanto las exteriores como las interiores de las partes huecas así como otras muchas áreas superficiales de las piezas que no son accesibles para otros métodos de protección.

Resistencia a la abrasión

Los recubrimientos galvanizados (Figura), poseen la característica casi única de estar unidos metalúrgicamente al acero base, por lo que poseen una excelente adherencia. Por otra parte, al estar constituidos por varias capas de aleaciones zinc-hierro, más duras incluso que el acero, y por una capa externa de zinc que es más blanda, forman un sistema muy resistente a los golpes y a la abrasión.

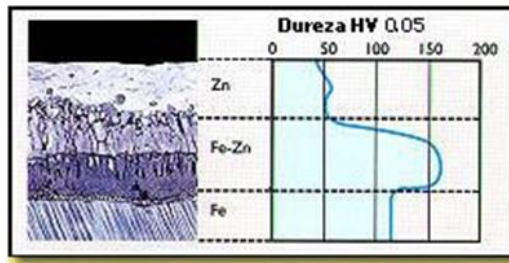


Figura 4.11.

Resistencia a la corrosión

Los recubrimientos galvanizados proporcionan al acero una protección triple.

Protección por efecto barrera. Aislándole del medio ambiente agresivo.

Protección catódica o de sacrificio. El zinc constituirá la parte anódica de las pilas de corrosión que puedan formarse y se irá consumiendo lentamente para proporcionar protección al acero.

Mientras exista el cubrimiento de zinc sobre la superficie del acero, éste no sufrirá ataque corrosivo alguno.

Restauración de zonas desnudas. Los productos de corrosión del zinc, que son insolubles, compactos y adherentes, taponan las pequeñas discontinuidades que puedan producirse en el recubrimiento por causa de la corrosión o por daños mecánicos (golpes, arañazos, etc.).

| Velocidad de corrosión del zinc en diferentes atmósferas (según ISO 9223) | | |
|---|--|--|
| Categoría de Corrosividad | Ambiente | Pérdida media anual de espesor de zinc (μm) |
| C1 Muy baja | Interior: Seco | 0,1 |
| C2 Baja | Interior: Condensación ocasional | 0,1 a 0,7 |
| C3 Media | Interior: Humedad elevada y alguna contaminación del aire Exterior: Urbano no marítimo y marítimo de baja salinidad | 0,7 a 2,1 |
| C4 Alta | Interior: Piscinas, plantas químicas, etc. Exterior: Industrial no marítimo, y urbano marítimo | 2,1 a 4,2 |
| C5 Muy alta | Exterior: Industrial muy húmedo o con elevado grado de salinidad | 4,2 a 8,4 |

Tabla 4.1. Corrosión del zinc aplicado al acero y aleaciones.

Ventajas de la lámina galvanizada.

Las principales ventajas de los recubrimientos galvanizados en caliente pueden resumirse en los siguientes puntos:

Duración excepcional.

Resistencia mecánica elevada.

Protección integral de las piezas (interior y exteriormente).

Triple protección: barrera física, protección electroquímica y auto curado.

Ausencia de mantenimiento.

Fácil de pintar.

4.5. Proceso de elaboración del prototipo ADS-1.

Para proceder a la elaboración del prototipo ADS-1 debemos seguir los siguientes pasos:

Proceso de Señalización

En este proceso es muy importante poseer un plano con todas las medidas de las diferentes piezas a construir:

Para realizar el trazado debemos escoger una tiza que se pueda visualizar sobre las diferentes láminas y que no se borre con facilidad.

Los instrumentos de medición que utilizaremos serán un flexómetro, un compás, un calibrador.

Debemos construir unos moldes para las tapas del prototipo ADS-1, que pueden ser de cartón los cuales nos ayudaran a realizar un trazado con mayor rapidez.

El número de tapas de cada y el tamaño de la estructura exterior, dependerá del número de cámaras que posea el modelo del prototipo ADS-1.

Para proceder a la señalización de la estructura exterior del se debe tomar muy en cuenta que forma tendrá el prototipo ADS-1 la cual es cilíndrica u ovalada.



Figura 4.12. Proceso de medición de partes del cuerpo del prototipo ADS-1.

Proceso de Corte.

Este proceso se debe llevar a cabo con mucho cuidado, en caso de no tenerlos podríamos lesionarnos gravemente.

Para poder realizar los cortes necesitaremos una cizalla, una prensa, unas tijeras para cortar metal, cincel y martillo.

Para cortar la estructura externa utilizaremos la cizalla con la cual obtendremos cortes rectos y precisos como se muestra en la figura 4.13.

Con la ayuda de las tijeras para cortar metal, cortaremos las piezas que tengan curvaturas, especialmente en lo que son las tapas.

El cincel y martillo se utiliza para cortar los agujeros que tienen las tapas en su parte interna en donde no es posible cortar con la cizalla ni con las tijeras. Figura 4.14.



Figura 4.13. Corte de plancha principal.



Figura 4.14. Tapa externa del prototipo ADS-1.

Proceso de Barolado.

A este proceso se lo llama también como doblado porque aquí es cuando a la lámina se le da la forma ya sea ovalada o cilíndrica.

Para realizar este proceso necesitaremos una dobladora que puede ser mecánica o hidráulica, como se muestra en la figura 4.15.

Procedemos a introducir la lámina cortada que será la estructura externa del prototipo ADS-1 entre los tubos de la dobladora.

Procedemos a girar el mando de la dobladora con movimientos de derecha a izquierda hasta obtener la forma requerida. Figura 4.16.

Se debe tener mucho cuidado que la lámina este bien sujeta para que el trabajo sea lo más exitoso posible.



Figura 4.15. Barolando plancha principal del prototipo ADS-1.



Figura 4.16. Finalización de Barolar plancha principal.

Proceso de Prensado.

Para realizar este proceso necesitaremos una matriz, que dará la forma adecuada de sus respectivos lados a las tapas del prototipo por medio de un gato hidráulico y una estructura metálica que nos ayude a realizar el trabajo.

Introducimos las tapas del silenciador a la matriz. Figura 4.17.

Con la ayuda del gato hidráulico y la estructura metálica ejerceremos una fuerte presión a la tapa de silenciador sobre la matriz la cual le dará su respectiva forma .Figura 4.17.

Son pasos sumamente sencillos pero debemos tener cuidado en que el gato hidráulico y la matriz estén bien ubicados, porque en caso contrario podríamos lastimarnos .Figura 4.18.



Figura 4.17. Prensado de tapas del prototipo ADS-1.



Figura 4.18. Prensado de compartimientos del prototipoADS-1.



Figura 4.19. Tapas y compartimientos terminados.

Corte de Tubo

Para realizar este procedimiento necesitaremos un cortador de tubos y una prensa que nos ayudará a sostener los tubos en el momento del corte (Figura 4.20).

Debemos tomar las dimensiones de los tubos dependiendo del tipo de automóvil para el prototipo que se desee construir.

Ubicamos los tubos en una prensa la cual nos brindará una mayor fijación.

Ubicamos el cortador del tubo fijándolos a los mismo y comenzamos a girarlo en un solo sentido, cada vez que giremos debemos introducir lentamente cada vez más la cuchilla del cortador de tubos, hasta lograr el corte del tubo.

Es preferible no cortar con sierra porque no obtendremos un corte simétrico.



Figura 4.20. Cortado tubo interior del prototipo ADS-1.

Proceso de Taladrado.

Aquí se realiza varios agujeros en los tubos de las diferentes cámaras del prototipo y de acuerdo a la longitud y diámetro de los tubos dependerá el diámetro y el número de los agujeros.

Para tener una mejor distribución de los agujeros se recomienda utilizar un taladro industrial que tenga una prensa sobre una bancada.

El taladro solo tendrá un movimiento que será de ascenso y descenso, el que se moverán son los tubos con ayuda de la prensa que esta sobre una bancada nos proporcionará una mayor fijación y movimientos longitudinales y laterales y, con la cual obtendremos una distribución correcta de los agujeros.

Con los tubos ya cortados los ubicaremos sobre la prensa y lo fijamos.

Con la ayuda del taladro que esta sobre los tubos comenzaremos a proceder el taladrado de los agujeros

(Figura 4.21).



Figura 4.21. Tubo interior terminado de taladrar

Proceso de unión del cilindro y sus tapas

En este proceso se realizará con ayuda de las tapas del prototipo de la siguiente manera:

Ubicamos las dos tapas en los extremos del cilindro con la finalidad de obtener la forma adecuada del cilindro. (figura 4.22)

Se debe colocar las tapas de cilindros con los lados hacia la parte externa y procedemos a unir las dos partes del prototipo ADS-1.

Ya realizado esto procedemos a unir mediante unos puntos de suelda en los extremos para fijar la forma del prototipo.

El tipo de soldado utilizado para esta tarea es la soldadura MIG que es un proceso para soldar que funde los metales a unir, a través del calor producido por un arco eléctrico, entre un electrodo continuo de metal de aporte y la pieza de trabajo, los cuales están protegidos por una atmósfera inerte suministrada externamente.

Los componentes del proceso MIG son:

- *Máquina para soldar de voltaje constante.
- *Alimentador de alambre sólido.
- *Pistola.
- *Gases y Mezclas para soldar.
- *Alambre sólido como soldadura.

Este proceso se fue seleccionado por el campo de las láminas delgadas con una preparación de costura uniforme y correcta, se pueden alcanzar con técnica TANDEM, velocidades de hasta 6m/min. En el caso de

láminas gruesas, se consiguen rendimientos de fusión de 24 kg/h. y velocidades de 80 cm/min. Para una cota "a" de 8 mm. En una pasada con, el mismo tiempo, una zona térmicamente afectada muy favorable. También en aluminio según la pieza, se puede duplicar la velocidad de soldadura.

Después de realizar los puntos de suelda procedemos a retirar una de las tapas del cilindro(figura 4.22).

Finalmente la tapa que está en el cilindro la debemos soldar detenidamente para que este herméticamente sellada.



Figura 4.22.Ubicación de tapas en el extremo del cilindro.



Figura 4.23. Cilindro listo para unión.

Proceso de corte de Compartimiento

Con las dimensiones del cilindro procedemos:

A realizar mediciones internas del cilindro (figura 4.23).

Luego realizamos un corte de una placa con características similares a la de las tapas, el número de estas dependerá del número de cámaras y diseño del prototipo ADS-1 (figura 4.23).

Estas placas deben llevar agujeros similares a la de los tubos del prototipo.

Todo este proceso debemos realizarlo con mucho cuidado para que las mediciones y cortes sean lo más exactos posibles, para que cuando debamos introducir las tapas de los compartimientos ingresen con facilidad.



Figura 4.24. Señalización de compartimientos para luego corta.

Proceso de unión compartimiento-tubos.

Para realizar este proceso utilizamos la soldadura MIG de la siguiente manera:

Se unen los tubos a las divisiones de los compartimientos, todo esto se realiza en el interior del prototipo para obtener una mayor facilidad del proceso de unión entre placa y tubos.

Los tubos se soldán al compartimiento con la disposición de menor número de agujeros hacia la parte externa del cilindro. (figura 4.24).

La regulación de la soldadura es la misma que para la unión de las tapas y el cilindro.

La regulación del amperaje es la posición número 6, la velocidad del alambre es de 4.5 o 5 m/min, el gas utilizado es CO₂.

Después de este armador procedemos a introducirlo en el interior del cilindro.

Finalmente cuando esté ubicado en su posición correcta procedemos a fijarlo por medio de puntos de suelda que realizaremos con la soldadura MIG (Figura 4.25).



Figura 4.25. Soldando tubos con compartimiento.

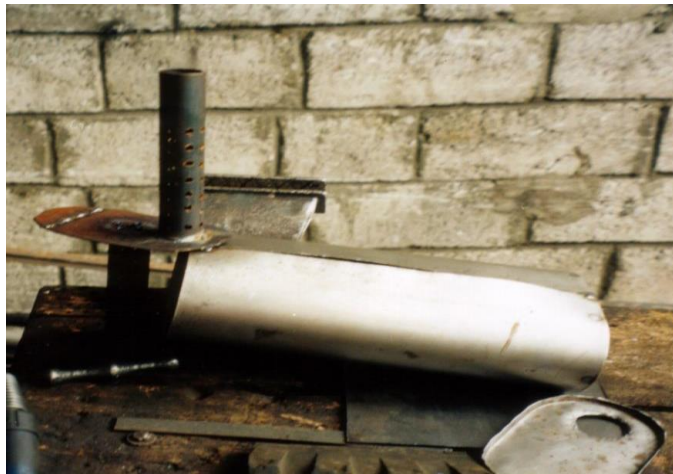


Figura 4.26 Tubos y compartimientos unidos.

Proceso de Llenado del prototipo ADS-1 con adsorbente para CO₂ (escoria tipo BOF).

Una vez construido el cuerpo interno y cuerpo externo se procedió a llenar la cámara central del prototipo ADS-1 con 2.5 Kg de material (escoria BOF) , esta cantidad tiene el fin de no hacer demasiado pesado el prototipo ya de que de ser así provocara mayor cantidad de consumo de combustible y posibles daños a la estructura del automóvil.

A continuación se muestran las imágenes del llenado.



Figura 4.27 Llenado de cámara intermedia con el material adsorbente de CO₂

Sellado.

Este es último paso que se realiza en el proceso de construcción del prototipo, se realiza con ayuda del equipo MIG.

La regulación del amperaje es la posición número 6, la velocidad del alambre es de 5 m/min, el gas utilizado es CO₂.

Debemos coloca el cilindro en una prensa y que este se encuentre en una posición con los dos puntos de suelda que se realizó anteriormente hacia arriba para obtener una mayor facilidad de suelda (Figura 4.27).

Luego se debe soldar toda la junta del cilindro, los bornes de las tapas para que se obtenga una buena hermeticidad en el prototipo.

Finalmente obtenemos un producto con una buena calidad (Figura 4.28).



Figura 4.28. Soldando cilindro principal.



Figura 4.29. Prototipo ADS-1 terminado.

El peso total del prototipo ADS-1 es de 7 kilogramos aproximada mente.

4.6. Proceso de construcción del prototipo ADM-2.

La construcción prototipo ADM-2 para adsorber el CO₂ del medio ambiente, está basada en la máxima área de contacto con el mínimo peso agregado al automóvil esto con el fin de evitar el deterioro del bastidor del automóvil y mínima afectación en aumento de consumo de combustible.

Por ello los materiales de construcción del prototipo ADM-2 cuentan con las características requeridas las cuales son; resistencia a los cambios de temperatura, resistencia a la corrosión y bajo peso

Todo lo anterior debido a que el prototipo ADM-2 se encuentra montado en la parte frontal del automóvil y se encuentra expuesto a los cambios climáticos del medio ambiente y en colocado en la parte más sensible en cuanto a peso por parte del automóvil.

Para proceder a la elaboración del prototipo ADM-2 debemos seguir los siguientes pasos:

Proceso de Señalización

En este proceso es muy importante poseer un plano con todas las medidas de las diferentes piezas a construir:

Para realizar el trazado debemos escoger una tiza que se pueda visualizar sobre las diferentes láminas y que no se borre con facilidad.

Los instrumentos de medición que utilizaremos serán un flexómetro, regla y escuadra de 45 grados.

Para proceder a la señalización de la estructura debemos tomar en cuenta las dimensiones y el espacio disponible en el automóvil.



Figura. 4.30. Trazado de patrones en la lámina.

Proceso de Corte

Este proceso se debe realizar con mucho cuidado, en caso de no tenerlos podríamos lesionarnos gravemente.

Con la ayuda de las tijeras para cortar metal, cortaremos la pieza de 100cm de largo y 5 de ancho y se realizaran los cortes a 45 grados que darán forma posterior mente al bastidor del prototipo ADM-2, de igual manera se corta la malla metálica y plástica de dimensiones de 70 cm de largo por 10cm de ancho con enrejado de 1mm².



Figura 4.31. Corte de lamina.

Proceso de doblado y armado del cuerpo del prototipo ADM-2.

Realizados los cortes en la lámina se procede a realizar el doblado de las cejas y formación del marco rectangular del prototipo ADM-2.

Para realizar este proceso necesitaremos una la ayuda de una base sólida, prensas manuales en “C” y un martillo de goma, como se muestra en la figura 4.31.

sellar las uniones y se remacharan en cada una de las esquinas, se colocaron la mallas metálicas y plásticas a cada una de las caras del bastidor, dejando libre una sección para proceder con el llenado del bastidor con el material adsorbente (escoria tipo BOF).

Por último se colocan los medios de sujeción con el cual el prototipo ADM-2 se adaptara a la estructura del automóvil.

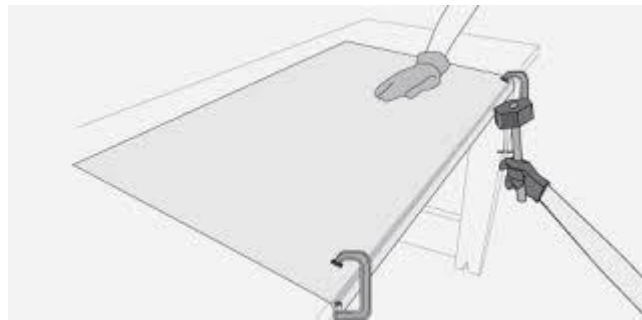


Figura 4.32. Doblado de bastidor para el cuerpo del prototipo ADM-2.



Figura 4.33. Bastidor terminado del prototipo ADM-2

Llenado del prototipo ADM-2 con adsorbente para CO₂ (escoria tipo BOF).

Con el bastidor construido por completo y colocadas las mallas metálicas y plásticas en el bastidor se procede a agregar el material adsorbente (escoria tipo BOF) la cantidad es de 1kg, tomando en cuenta una distribución homogénea que evite abultamientos y compactación en un solo punto del panel.



Figura 4.34. Prototipo ADM-2 terminado.

4.7. Aplicación de los prototipos ADS-1 y ADM-2 al automóvil.

En la aplicación de los prototipos ADS-1 Y ADM-2 a los distintos automóviles se requiere conocer las condiciones de operación y estructura de cada uno de ellos ya que de esto dependerá la posición, tamaño, forma, peso, y el medio de sujeción de cada uno de los prototipos al sistema de escape y estructura del automóvil.

Para el caso del prototipo ADS-1 la sujeción se llevó a cabo por medio de brazos de sujeción unidos al prototipo y conomas semi-circulares y de igual manera soldado en ambos extremos del prototipo soldados al tubo principal del sistema de escape del automóvil.

A continuación se muestra el diagrama de posicionamiento del prototipo ADS-1.

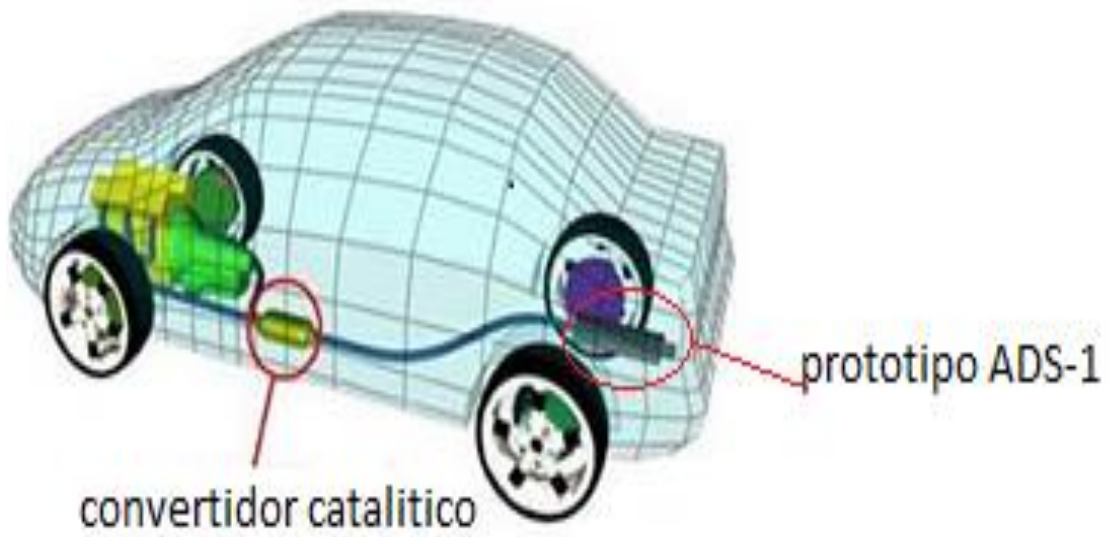


Figura 4. 35. Diagrama de sistema de escape del automóvil con implementación del prototipo ADS-1.



Figura 4.36. Posición y sujeción del prototipo ADS-1 en el automóvil.



Figura 4.37. Posición del prototipo ADM-2 en el automóvil (camioneta Jimmy 1996)

La posición del prototipo ADM-2 al frente del radiador de enfriamiento del automóvil y en la parte baja del mismo es debido a que el prototipo ADM-2 se ayuda del desplazamiento del automóvil y del moto-ventilador del automóvil para hacer fluir el CO₂ del medio ambiente de forma forzada a través del prototipo y así lograr la adsorción del CO₂ por medio del material adsorbente (escoria tipo BOF).

Como ya sea mencionado en este capítulo la disposición de los prototipos ADS-1 y ADM-2 está relacionada con el tipo de automóvil ya que el diseño, peso, disposición en el automóvil dependerá únicamente del espacio disponible con que el automóvil cuente.

4.8. Comportamiento de los prototipos ADS-1 y ADM-2 en el automóvil.

Una vez resuelto el problema en cuanto a diseño por las complicaciones en cuanto a características físicas y químicas con las que cuenta el material adsorbente (escoria aceraría tipo BOF), debido a su comportamiento altamente alcalino y a su alta densidad que provoca un sobre peso al automóvil, en consecuencia un aumento en el consumo de combustible lo cual resulta en un aumento en el CO₂ emitido por el automóvil.

Por lo cual se propuso como solución contar con una determinada cantidad de material adsorbente y un diseño en particular para evitar los aspectos negativos en la aplicación de los prototipos.

En la instalación en los distintos automóviles se realizó a razón de los espacios disponibles y en haciendo énfasis en la que ambos prototipos (ADS-1 Y ADM-2) deben incorporarse con una mínima modificación a la estructura del automóvil, con el fin de no modificar el desempeño del mismo.

Por ello en el capítulo 4 aremos una recopilación de información del comportamiento de los prototipos ADS-1 y AMD-2. Los parámetros serán reportados en cuanto a kilometraje, ya que hacerlo en función del tiempo es

complicado ya que los automóviles no suelen tener un mismo comportamiento mecánico, ni el tipo de uso al que se exponga el automóvil ya que algunos de los parámetros no controlados dependerá solo dependerán del piloto como es el caso del mantenimiento mecánico y tipo de manejo ya que estos afectaran el desempeño de los prototipos.

Dado que ambos prototipos (ADS-1 y ADM-2), llevan a cabo su desempeño por la formación de CaCO_3 (carbonato de calcio), por medio de la adsorción gas-sólido con el CaO contenido en la escoria tipo BOF y del CO_2 del medio ambiente y el CO_2 producido por el motor del automóvil por efecto de la combustión de hidrocarburos.

Tomando en cuenta la ecuación de adsorción de CO_2 por medio natural expresada en el capítulo 2, tendremos una idea de cuánto CO_2 será adsorbido por la escoria aceraría tipo BOF, la cual cuenta con 57.56 % de CaO en su composición y esto mostrara una idea básica del comportamiento. No sin antes referirnos que se trata de una idealidad y diferirá del comportamiento real el cual se expondrá posteriormente.

$$\text{CO}_2 \text{ abs} = 0.75 * \text{CaO} * \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}}$$

Siendo, CaO la cantidad de CaO en la muestra, 0.75 relación de porcentaje de humedad y M las masas moleculares

Sustituyendo los valores en la ecuación y tomando en cuenta una muestra de 5g de escoria tipo BOF.

$$\text{CO}_2 \text{ abs} = 0.75 (2.879\text{g})(44/56\text{g}) = 1.6965 \text{ g.}$$

Para el caso de prototipo ADS-1 que contiene 2.5 kg de material podrá adsorber 847.78 g en promedio de CO_2 .

Para el caso del prototipo ADM-2 que contiene 1.0 KG de material podrá adsorber 339.18g en promedio de CO_2 .

Cabe mencionar como sea dicho anteriormente que los valores solo expresan a un modelo ideal es decir que no existan factores externos que afecten estos valores ya que se trata de un modelo estático y controlado y no de un modelo dinámico real.

Para llevar a cabo la recopilación de datos de comportamiento, se tomaron como inicio las propiedades físicas y químicas iniciales, echas en caracterización de la escoria tipo BOF, la cual se describe en el capítulo 3 del presente trabajo.

A continuación se muestran la tabla con las características físicas iniciales de importancia para la adsorción de CO₂ del material adsorbente aplicado al prototipo ASD-1.

| | | |
|-------|----------|---|
| %CaO | %Humedad | Descripción física de la escoria tipo BOF |
| 57.56 | 1.0 | Gránulos irregulares de tamaño aproximado de 1cm ² aproximadamente |

Tabla de CaO inicial contenido en la muestra de escoria.

A continuación se muestra la tabla de especificaciones de los dos automóviles a los cuales se les incorporo a su funcionamiento y estructura los dos prototipos ADS-1 y ADM-2.

| modelo | Año de fabricación | motor | kilometraje |
|-------------|--------------------|--------|-------------|
| GMC-Jimmy | 1996 | 4.3L V | 194077 |
| Volvo -S40T | 2000 | 2.0L V | 98,456 |

Los datos recopilados que se muestran a continuación están relacionados en función del kilometraje y no en función de las especificaciones técnicas reportadas por el fabricante en cuanto a consumo de combustible, control de emisiones y rendimiento de combustible dado que estos parámetros solo son para automóviles que no presentan el desgaste por uso particular ni por circunstancias a las cuales se enfrentan los automóviles que transitan diariamente en México.

Los datos reportados para ambos prototipos colocados en los distintos automóviles, fueron obtenidos a través de muestras extraídas de los prototipos ADS-1 y ADM-2 y analizados por el método de fluorescencia de rayos X, dicha técnica esta descrita en el capítulo 3 del presente trabajo. Los datos están reportados en relación de periodos con una separación de 3000 Km recorridos por el automóvil entre cada reporte, esto basado en consideración del servicio mecánico proporcionado al automóvil por parte del piloto.

A continuación se muestra la tabla con los datos obtenidos de las muestras extraídas de los prototipos ADS-1 y ADM-2, los datos están dados en formación de CO₃ a partir de la adsorción de CO₂ por medio del CaO contenido en el material adsorbente ya que este es el componente principal de la escoria tipo BOF con el que cuentan como base ambos prototipos.

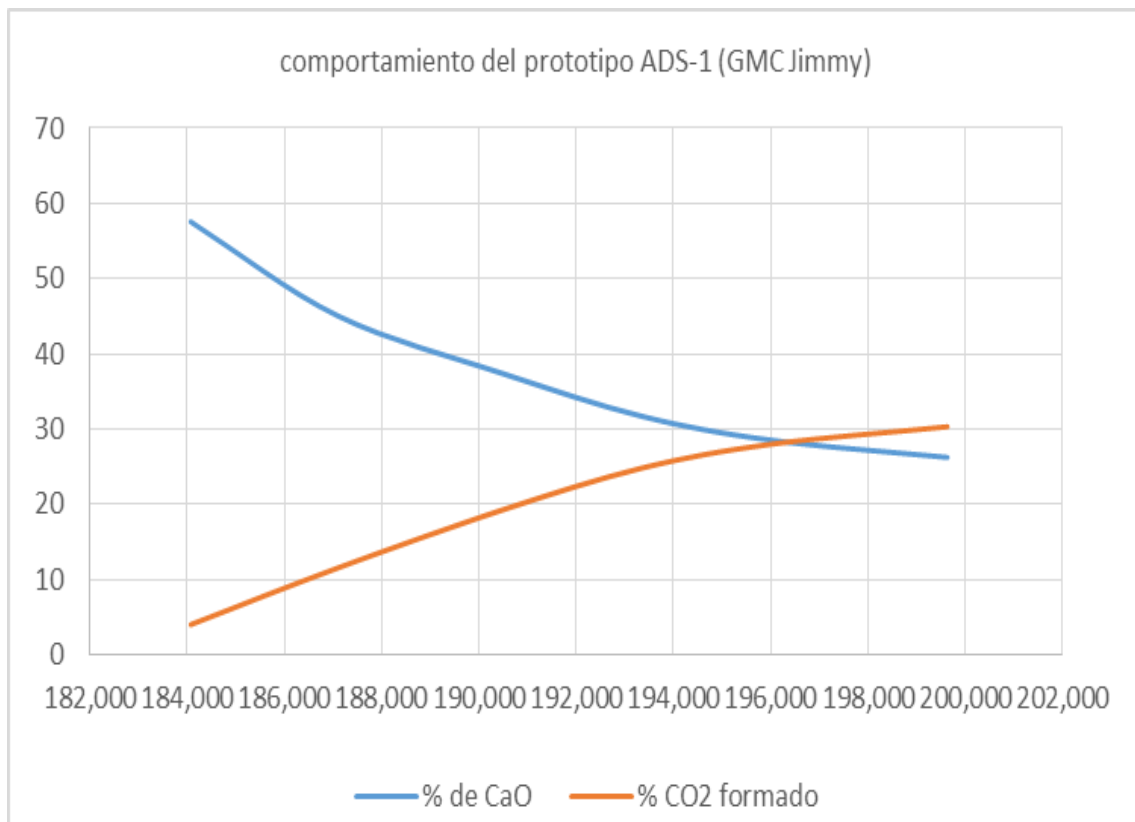
Prototipo ADS-1 aplicado a automóvil modelo GMC-Jimmy 1996

| Kilometraje | % CaO promedio | % CO3 promedio formado | % Humedad promedio |
|-------------|----------------|------------------------|--------------------|
| 184,077 | 57.56 | 4.0 | 1.0 |
| 187,099 | 45.048 | 11.523 | 2.7 |
| 190,456 | 37.448 | 19.181 | 1.6 |
| 193,345 | 31.70 | 24.80 | 3.8 |
| 196,002 | 28.52 | 27.974 | 1.7 |
| 199,627 | 26.22 | 30.30 | 2.14 |

Tabla 4.2. Datos de fluorescencia de rayos X de muestras extraídas del prototipo ADS-1 del automóvil GMC-Jimmy 1996.

Los datos reportados en la tabla 4.2 están en base de un periodo de 16 meses y con un kilometraje de operación de 15,550 kilómetros recorridos en condiciones estándar de manejo.

En la gráfica 4.1 el comportamiento del prototipo ADS-1 implementado al auto Jimmy 1996.



Grafica 4.1 Comportamiento del prototipo ADS-1 (GMC Jimmy 1996).

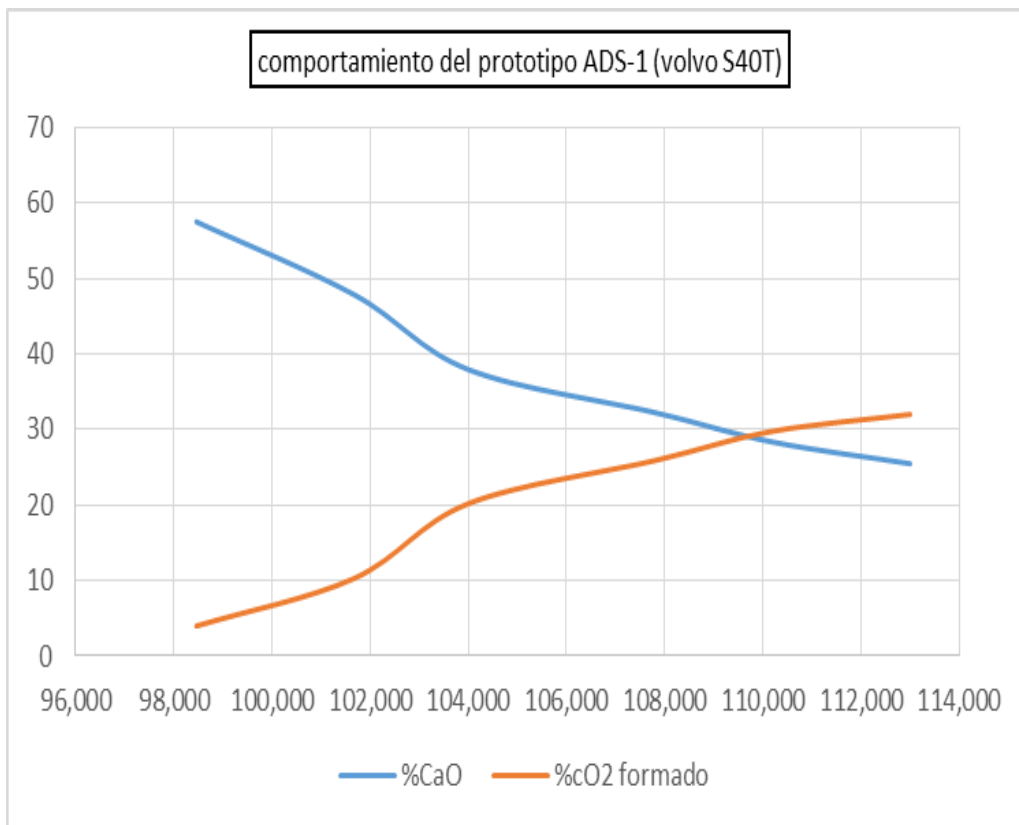
Prototipo ADS-1 aplicado al automóvil modelo Volvo S40T 2000.

| kilometraje | % CaO | % CO3 promedio formado | % Humedad |
|-------------|-------|------------------------|-----------|
| 98,456 | 57.56 | 4.0 | 1.0 |
| 101,670 | 47.9 | 10.3 | 1.14 |
| 104,004 | 37.96 | 20.23 | 1.20 |
| 107,809 | 32.26 | 25.94 | 2.22 |
| 110,209 | 28.36 | 29.81 | 1.54 |
| 113,002 | 25.5 | 32.03 | 1.45 |

Tabla 4.3. Datos de fluorescencia de rayos X de muestras extraídas del prototipo ADS-1 del automóvil Volvo S40T 2000.

Los datos reportados en la tabla 4.3 están en base de un periodo de 16 meses y con un kilometraje de operación de 14,546 kilómetros recorridos en condiciones estándar de manejo.

En muestra en la gráfica 4.2 el comportamiento del prototipo ADS-1 implementado al auto Volvo S40T 2000.



Grafica 4.2 Comportamiento del prototipo ADS-1 (Volvo S40T 2000).

A continuación se muestran la tabla con las características físicas iniciales de importancia para la adsorción de CO2 del material adsorbente aplicado al prototipo ASM-2.

| %CaO | %Humedad | Descripción física de la escoria tipo BOF |
|-------|----------|---|
| 57.56 | 1.0 | Gránulos irregulares de tamaño aproximado de 0.2cm ² aproximadamente |

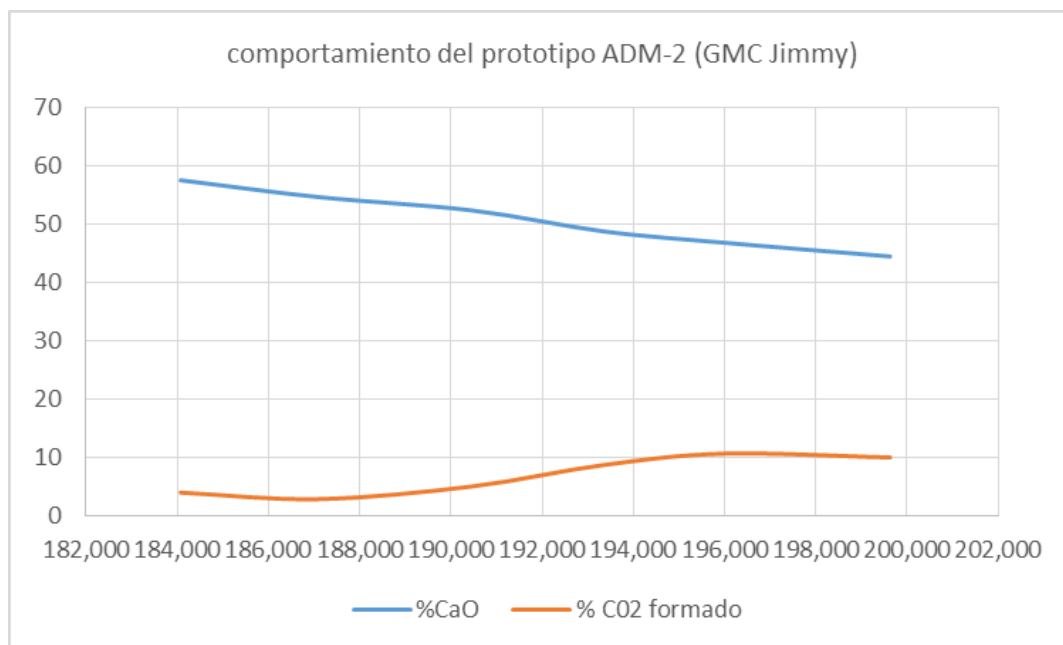
Prototipo ADM-2 aplicado a automóvil modelo GMC Jimmy 1996.

| Kilometraje | % CaO | % CO3 | % Humedad |
|-------------|--------|-------|-----------|
| 184,077 | 57.56 | 4.0 | 1.0 |
| 187,099 | 54.682 | 2.87 | 1.54 |
| 190,456 | 52.40 | 5.056 | 1.02 |
| 193,345 | 48.8 | 8.73 | 1.09 |
| 196,002 | 46.84 | 10.68 | 0.89 |
| 199,627 | 44.5 | 10.02 | 1.4 |

Tabla 4.4. Datos de fluorescencia de rayos X de muestras extraídas del prototipo ADM-2 del automóvil GMC-Jimmy 1996.

Los datos reportados en la tabla 4.4 están en base de un periodo de 16 meses y con un kilometraje de operación de 15,550 kilómetros recorridos en condiciones estándar de manejo

En la gráfica 4.3 el comportamiento del prototipo ADM-2 implementado al auto Jimmy 1996.



Grafica 4.3 Comportamiento del prototipo ADS-1 (GMC Jimmy 1996).

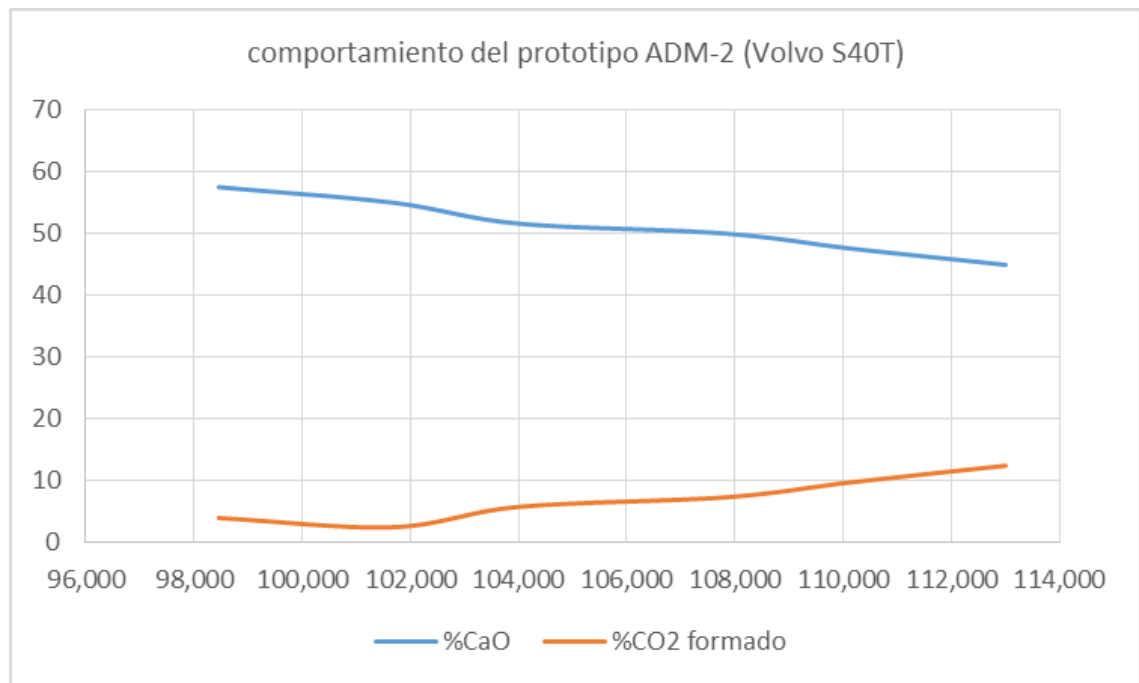
Prototipo ADM-2 aplicado a automóvil modelo Volvo S40T 2000.

| kilometraje | % CaO | % CO3 | % Humedad |
|-------------|-------|---------|-----------|
| 98,456 | 57.56 | 4.0 | 1.0 |
| 101,670 | 55.06 | 2.5 | 1.7 |
| 104,004 | 51.66 | 5.8 | 2.2 |
| 107,809 | 50.06 | 7.34 | 1.67 |
| 110,209 | 47.56 | 9.84 | 1.5 |
| 113,002 | 44.99 | 12.4558 | 1.6 |

Tabla 4.5 Datos de fluorescencia de rayos X de muestras extraídas del prototipo ADM-2 del automóvil volvo S40T 2000.

Los datos reportados en la tabla 4.5 están en base de un periodo de 16 meses y con un kilometraje de operación de 14,546 kilómetros recorridos en condiciones estándar de manejo.

En la gráfica 4.4 el comportamiento del prototipo ADM-2 implementado al auto Volvo S40T 2000.



Grafica 4.4 Comportamiento del prototipo ADM-2 (Volvo S40T 2000).

4.9. Discusión de resultados.

De los datos y graficas anteriormente registrados, podemos observar el comportamiento de los cuatro prototipos (ADS-1 y ADM-2) implementados a ambos automóviles, dando así una perspectiva del agotamiento que sufre la escoria aceraría de tipo BOF como agente adsorvedor de CO₂, se puede observar para el caso del prototipo ADS-1 una buena adsorción de CO₂ ya que este se encuentra montado sobre un flujo rico de CO₂ que proviene del motor del automóvil. Para el caso del prototipo ADM-2 observamos un comportamiento un poco más lento en cuanto a la velocidad de adsorción de CO₂ del medio ambiente, lo cual se puede ver como una ventaja y desventaja a la vez ya que la adsorción depende directamente de la velocidad, tiempo de circulación del auto y de las condiciones climatológicas, por lo cual debido a estos factores su tiempo de vida útil será más larga que la del prototipo ASD-1 el cual está expuesto a una fuente rica de CO₂.

De igual manera se realiza el análisis físico de los prototipos para verificar los daños que sufrieron la estructura de los cuatro prototipos o la estructura donde se encuentran montados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Llegando a este punto, se puede afirmar el cumplimiento de los objetivos marcados al inicio del presente proyecto. Por un lado se desarrolló la caracterización de la escoria aceraría tipo BOF, bajo distintas técnicas de análisis estructural, determinado así sus características físicas y químicas.

Se desarrollaron dos prototipos para la adsorción de CO₂ de los gases de escape de los automotores y del CO₂ contenido en el medio ambiente (ADS-1 y ADS-2), dichos prototipos se soportaron en los automóviles (GMC-Jimmy, Volvo S40T) comprobando su comportamiento en distintos motores de 6 y 4 cilindros respectiva mente, con un consumo de combustible, condiciones ambientales y condiciones de manejo particulares, ya que cada automóvil trabaja bajo condiciones que cada piloto infiere en el comportamiento del automóvil y de su desempeño.

En este proyecto se estudiaron un amplio número de aspectos relacionados con los métodos de captura y eliminación de CO₂, tomando en cuenta las ventajas y desventajas que cada método presenta. Por ello la innovación y aplicación de prototipos que ayuden a la eliminación de CO₂ producido por los millones de automóviles que circulan diariamente en México, y que mejor manera que utilizar este medio es decir al mismo automóvil como un medio que ayude a la eliminación de este contaminante.

La caracterización de la escoria aceraría tipo LD o BOF, permitió un conocimiento más amplio de las distintas técnicas de análisis y caracterización de materiales las cuales permitieron un conocimiento más detallado de las propiedades físicas y químicas como son; la dureza, rugosidad, porosidad, permeabilidad, y estructuras geométricas que la constituyen. De igual manera un conocimiento de las capas del material como agente capas de adsorber CO₂ por medio del mecanismo de adsorción gas-sólido, esto a que la escoria posee una cantidad de óxidos metálicos de los cuales destaca la presencia del CaO como principal agente para la adsorción de CO₂ de los gases de escape del automóvil y del medio ambiente dando paso a la formación de CO₃.

Dicho lo anterior se puede asegurar que la escoria LD o BOF es un material capas de adsorber una fracción del CO₂ emitido por efecto de la combustión de los automotores y el CO₂ contenido en medio ambiente.

El diseño de ambos prototipos (ADS-1 y AMD-2), cumplió con las características determinadas en este proyecto por no interferir con el desempeño del automóvil por lo que no se requirió de modificaciones masivas a la estructura de soporte para ambos prototipos. De igual manera se respetó la tolerancia del peso de ambos prototipos esto con el fin de no provocar un aumento en el consumo de combustible por parte del automóvil.

El desempeño en general de ambos prototipos (ADS-1 y ADM-2), es satisfactorio, se cumplieron con los objetivos propuestos al inicio de este proyecto los cuales era la eliminación de la fracción del CO₂ contenido en

los gases de escape producto de la combustión del auto motor de gasolina y de la fracción de CO₂ contenida en el medio ambiente.

Recomendaciones.

Es necesario efectuar estudios posteriores relacionados con el tema aquí expuesto, que den origen a diferentes formas de eliminación de CO₂, y que de este estudio se originen a más y mejores equipos y técnicas que ayuden a la eliminación parcial o total de dicho gas de efecto invernadero y así mejorar la calidad de vida de futuras generaciones.

Es recomendable proseguir con el estudio de capacidad de adsorción de ambos prototipos dado los efectos del tiempo para la realización de esta tesis no fue posible verificar de forma directa el punto de agotamiento total de ambos prototipos para la realización de un análisis final el cual determine su eficiencia total el verdadero tiempo de vida útil y posibles usos al material de residuo que ambos prototipos arrojen al final de su vida útil, dando la posibilidad que de origen a la formación de nuevos materiales y posteriores proyectos.

Otro punto a recomendar es la mejora en cuanto a diseño y materiales de construcción de los prototipos ya que el mejoramiento de uno o ambos aspectos dará pie a una mejor eficiencia de los mismos.

BIBLIOGRAFIA.

Parrott L. J., Design for avoiding damage due to carbonation – included corrosion, SP-145-15 International Congress on Durability of Concrete (Malhotra (Ed.)), Nice, CANMET (1994) 283-298.

Matschei T, Lothenbach B, Glasser F. P., Thermodynamic properties of Portland cement hydrates in the system CaO–Al₂O₃–SiO₂–CaSO₄–CaCO₃–H₂O, Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 10, (2007) 1379-1410.

González J. A., Andrade C., Effect of carbonation, chlorides and relative humidity on the corrosion of galvanized rebars embedded in concrete. Br. Corros. J. 17 1 (1982), 21–28.

Glass G. K., Page C. L., Short N. R., Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars. Corros. Sci. 32 (1991), 1283–1294.

Sastre E., Ferreira P., "Análisis Térmico" en "Técnicas de Análisis y Caracterización de Materiales", M. Faraldos y C. Goberna, Editoras. Biblioteca de Ciencias, 3. Editorial del CSIC. 247-292. 2003

Mc. Gown, Linda B. Molecular Fluorescent Spectroscopy. ASM. Caracterización. Departamento de química, U.S.A. ,73-81.

El inventario del consumo de Energía 2012 fue elaborado por la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire, Secretaría del Medio Ambiente, DF.

El inventario de Emisiones de CO₂ del año 2011 fue elaborado por la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal (SMA, 2012).

Dirección General de Gestión Ambiental del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal con datos de PEMEX Refinación, Gas y Petroquímica y Secretaría de Energía 2013.

Wills, B.A. Tratamiento de menas y recuperación de minerales. Editorial Limusa. Capítulo 4 . Mexico 1987.

GREES, S.J. y K. S. W. Sing. Adsorption, Surface Area and Porosity. Segunda edición. Editorial Academic Press. Londres 1982. 333-354.

Pedro Bosch Giral y Victor Hugo Lara Corona. Difracción y Efluorescencia de rayos x. colección claves universitarias Editorial Terracota.

Baños, L. "preparación de especímenes para análisis de; por Difracción y Efluorescencia de rayos x .México, Innovación Editorial Lagares De México, 2004.

BESOAIN, E. Mineralogía de arcillas de los suelos, serie de libros educativos no 60, Costa Rica, 1985.

SIMENS. "Win-Rietveld, Crystal Structure Refinement and Determination", manual Simens Analytical X-Ray Sytems. AUT 38, D-76181 Karlsruhe.

SCHAEFERD, D. y W. K. Keefer. "Structure of Soluble Silicates", en Mat. Res. Soc. Symp. Proc, num 32, 1984.