

Fundamentos de Catálisis Heterogénea

Unidad 2: COMPOSICIÓN Y SOPORTES CATALÍTICOS

Dra. Laura Díaz Rodríguez
Dr. Douglas Jimmy Escalante Ayala
Dra. Karina Elvira Rodríguez Espinoza

Estructura

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.1. Fase Activa (o Componente Activo).

2.1.2. Soporte o Matriz Catalítico.

2.1.3. Promotores o Modificadores.

2.1.4. Agentes de Textura o Porosidad.

2.1.5. Ejemplo Ilustrativo.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.1. Catalizadores Ácidos.

2.2.2. Catalizadores Básicos.

2.2.3. Catalizadores metálicos.

2.2.4. Catalizadores de óxidos metálicos.



Estructura

- 2.2.5.** Catalizadores de sulfuros metálicos.
 - 2.2.6.** Catalizadores ácidos sólidos (Zeolitas).
 - 2.2.7.** Catalizadores Bifuncionales.
 - 2.2.8.** Catalizadores Tipo Perovskita y Espinela.
 - 2.2.9.** Heteroestructuras y Materiales Avanzados.
- 2.3.** Naturaleza del soporte.
- 2.3.1.** Funciones principales del soporte.
 - 2.3.2.** Tipos de soportes comunes.
 - 2.3.3.** Importancia del soporte.

Estructura

2.4. Agentes activos y promotores.

2.4.1. Agentes activos.

2.4.2. Promotores.

2.4.3. Relación entre ambos.

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.1. Fase Activa (o Componente Activo).

Es la parte del catalizador donde ocurre la reacción química. Puede estar constituida por:

- ❖ **Metales nobles:** platino (Pt), paladio (Pd), rodio (Rh) — usados en convertidores catalíticos.
- ❖ **Metales de transición:** níquel (Ni), cobalto (Co), hierro (Fe) — usados en procesos como la hidrogenación o la síntesis de amoníaco.
- ❖ **Óxidos metálicos:** óxido de vanadio (V_2O_5), óxido de molibdeno (MoO_3) — usados en oxidaciones selectivas.
- ❖ **Sulfuros metálicos:** Co-Mo o Ni-Mo — usados en hidrodesulfuración.

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.1. Fase Activa (o Componente Activo).

Estos materiales pueden actuar solos o en combinación, y su **actividad catalítica** depende de su estructura electrónica, su dispersión sobre el soporte y la accesibilidad de sus sitios activos.

Función: Proporcionar los sitios activos donde se adsorben y reaccionan los reactivos.

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.2. Soporte o Matriz Catalítico.

Es el material que dispersa y estabiliza la fase activa, aumentando el área superficial. El **soporte** es el material sobre el cual se dispersa el componente activo. Aunque no participa directamente en la reacción, cumple funciones esenciales:

Funciones del soporte:

- ❖ Aumentar el área superficial del catalizador, permitiendo una mayor exposición de los sitios activos.
- ❖ Estabilizar los componentes activos frente a la sinterización o desactivación.
- ❖ Controlar la acidez o basicidad del entorno catalítico.

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.2. Soporte o Matriz Catalítico.

Funciones del soporte:

- ❖ Facilitar la dispersión del metal activo.
- ❖ Mejora la dispersión de la fase activa
- ❖ Facilita la transferencia de masa
- ❖ Puede participar en la reacción mediante interacciones ácido-base o redox

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.2. Soporte o Matriz Catalítico.

Materiales comunes como soporte:

- ❖ **Alúmina (Al_2O_3):** muy usada por su estabilidad térmica y mecánica.
- ❖ **Sílice (SiO_2):** inerte, con alta área superficial.
- ❖ **Zeolitas:** materiales microporosos con propiedades ácidas, ideales para craqueo catalítico.
- ❖ **Carbón activado:** usado en procesos de adsorción y catálisis ambiental.

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.2. Soporte o Matriz Catalítico.

Materiales comunes como soporte:

- ❖ **Óxidos mixtos:** como TiO_2 , ZrO_2 , CeO_2 , que pueden aportar propiedades redox o de oxígeno móvil.
- ❖ **Carbones activados**
- ❖ **Materiales mesoporosos** (ej. SBA-15, MCM-41)
- ❖ **Zeolitas** (como ZSM-5, Y, Beta)

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.2. Soporte o Matriz Catalítico.

Ejemplo práctico::

En un convertidor catalítico automotriz, el componente activo puede ser platino disperso sobre un soporte de alúmina estabilizada con ceria y zirconia, lo que permite una alta eficiencia en la conversión de gases contaminantes.

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.3. Promotores o Modificadores.

Son aditivos que mejoran la actividad, selectividad o estabilidad del catalizador.

- ❖ **Promotores electrónicos:** como K, Cs o Re, que modifican la densidad electrónica de la fase activa.
- ❖ **Promotores estructurales:** como La o Ce, que estabilizan fases cristalinas o mejoran la resistencia térmica.

Función:

- ❖ Aumentan la resistencia a la sinterización o envenenamiento
- ❖ Ajustan la acidez o basicidad del catalizador
- ❖ Favorecen rutas de reacción deseadas



2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.4. Agentes de Textura o Porosidad.

Estos modifican la distribución de tamaño de poro o el área superficial durante la síntesis:

- ❖ Plantillas orgánicas (surfactantes, polímeros)
- ❖ Sales o agentes precipitantes

Función:

- ❖ Controlan la accesibilidad de los reactivos
- ❖ Mejoran la difusión dentro del catalizador

2.1. Composición de los Catalizadores Heterogéneos.

2.1.5. Ejemplo Ilustrativo.

Catalizador de hidrogenación: Ni/Al₂O₃

- ❖ **Fase activa:** Níquel metálico (Ni)
- ❖ **Soporte:** Alúmina (Al₂O₃)
- ❖ **Promotor (opcional):** Molibdeno (Mo) o cobre (Cu)
- ❖ **Condiciones típicas:** 200–400 °C, presión de H₂ entre 10–50 atm

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

- ❖ Los **tipos de catalizadores heterogéneos**, clasificados según su **naturaleza química, estructura y función**. Estos catalizadores se adaptan a una gran variedad de procesos industriales gracias a sus propiedades únicas.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.1. Catalizadores Ácidos.

Los catalizadores ácidos poseen **sítios protonantes** (donadores de protones, H^+) o **centros de Lewis** que aceptan pares de electrones. Son especialmente útiles en reacciones donde se requiere activar moléculas mediante protonación o polarización.

Ejemplos:

- ❖ Zeolitas: materiales microporosos con alta acidez, usados en el craqueo catalítico de hidrocarburos.
- ❖ Alúmina ácida (Al_2O_3): empleada en reacciones de deshidratación de alcoholes.
- ❖ Ácido sulfúrico soportado: usado en procesos de alquilación.



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.1. Catalizadores Ácidos.

Aplicaciones:

- ❖ Craqueo de petróleo.
- ❖ Isomerización de alkanos.
- ❖ Síntesis de compuestos orgánicos como éteres y alquenos.

Promueven reacciones de tipo iónico (ácido/base de Lewis o Brønsted).

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.2. Catalizadores Básicos.

Estos catalizadores tienen **sitios aceptores de protones o donadores de pares de electrones**, como grupos hidróxido o átomos con carga negativa. Son útiles en reacciones que requieren desprotonación o activación de nucleófilos.

Ejemplos:

- ❖ **Óxidos metálicos básicos:** como MgO, CaO, ZnO.
- ❖ **Hidrotalcitas:** materiales laminares con propiedades básicas ajustables.
- ❖ **Carbonatos soportados:** como Na_2CO_3 sobre alúmina.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.2. Catalizadores Básicos.

Aplicaciones:

- ❖ Transesterificación de aceites para producir biodiésel.
- ❖ Reacciones de condensación aldólica.
- ❖ Síntesis de productos farmacéuticos y agroquímicos.

Promueven reacciones de tipo iónico (ácido/base de Lewis o Brønsted).

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.3. Catalizadores Metálicos.

Estos catalizadores están compuestos por **metales puros** o **aleaciones** que actúan como sitios activos para la reacción, usualmente soportados sobre óxidos como Al_2O_3 o SiO_2 .

Ejemplos:

- ❖ **Platino (Pt), Paladio (Pd), Rodio (Rh):** usados en convertidores catalíticos para automóviles.
- ❖ **Níquel (Ni):** común en procesos de hidrogenación de aceites y compuestos orgánicos.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.3. Catalizadores Metálicos.

Aplicaciones:

- ❖ Hidrogenación de alquenos, aromáticos, aceites vegetales.
- ❖ Reformado catalítico ($\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$).
- ❖ Reacciones de oxidación (Pd, Pt en automóviles).

Muy activos en reacciones redox. Se suelen usar en procesos petroquímicos y ambientales.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.4. Catalizadores de Óxidos Metálicos.

Compuestos como óxidos de vanadio (V_2O_5), molibdeno (MoO_3) o cobre (CuO) que actúan como catalizadores en reacciones redox.

Ejemplos:

- ❖ V_2O_5 en la producción de ácido sulfúrico (oxidación de SO_2 a SO_3).
- ❖ CuO en la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COVs).

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.4. Catalizadores de Óxidos Metálicos.

Aplicaciones:

- ❖ Oxidación selectiva (por ejemplo, de metano o amoníaco).
- ❖ Reducción catalítica selectiva (SCR).
- ❖ Degradación de contaminantes.

Alta estabilidad térmica y capacidad redox. Suelen usarse en catálisis ambiental.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.5. Catalizadores de Sulfuros Metálicos.

Formados por sulfuros de metales de transición, como Co-Mo o Ni-Mo, sobre soportes como alúmina.

Ejemplos:

- ❖ Co-Mo/Al₂O₃ en la hidrodesulfuración de combustibles fósiles.

Aplicaciones:

- ❖ Eliminación de azufre en el refino de petróleo.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.6. Catalizadores Ácidos Sólidos (Zeolitas).

Materiales con propiedades ácidas que catalizan reacciones como el **craqueo** y la **isomerización**.

Ejemplos:

- ❖ **Zeolitas:** estructuras microporosas con alta acidez y selectividad.
- ❖ **Alúmina ácida:** usada en reacciones de deshidratación.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.6. Catalizadores Ácidos Sólidos (Zeolitas).

Aplicaciones:

- ❖ Craqueo catalítico.
- ❖ Reformado de hidrocarburos.
- ❖ Síntesis orgánica.
- ❖ Refino (FCC).
- ❖ Petroquímica (isomerización, alquilación).
- ❖ Adsorción y separación selectiva de moléculas.

Alta superficie, acidez controlada, y selectividad por tamaño de poro.



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.7. Catalizadores Bifuncionales.

Son catalizadores donde el componente activo (metal u óxido) está disperso sobre un soporte sólido para mejorar su eficiencia.

Ejemplos:

- ❖ Pt sobre Al_2O_3 en convertidores catalíticos.
- ❖ Cu/ZnO/ Al_2O_3 en la síntesis de metanol.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.7. Catalizadores Bifuncionales.

Aplicaciones:

- ❖ Procesos industriales a gran escala, mejora de estabilidad y área superficial.
- ❖ Reformado catalítico.
- ❖ Hidrocraqueo.

Permiten reacciones secuenciales o sinérgicas en un solo paso.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.8. Catalizadores Tipo Perovskita y Espinela.

Los catalizadores tipo Perovskita y Espinela, dos familias de óxidos metálicos complejos que se destacan en catálisis heterogénea por su actividad redox, estabilidad térmica y flexibilidad estructural.

Catalizadores Tipo Perovskita (ABO_3)

Estructura y Composición: Óxidos complejos como LaMnO_3 (perovskitas) o Co_3O_4 (espinelas).

- ❖ Fórmula general: ABO_3
- ❖ A: catión grande (usualmente un metal alcalinotérreo o lantánido, como La^{3+} , Sr^{2+} , Ca^{2+})
- ❖ B: catión de transición (como Mn^{3+} , Fe^{3+} , Co^{3+} , Ni^{3+})
- ❖ Oxígeno completa la red octaédrica.



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.8. Catalizadores Tipo Perovskita y Espinela.

Propiedades catalíticas destacadas:

- ❖ Alta movilidad de oxígeno y capacidad para generar oxígeno activo superficial.
- ❖ Buena estabilidad térmica y química.
- ❖ Capacidad para operar en reacciones redox sin necesidad de metales nobles.

Aplicaciones:

- ❖ Oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COVs)
- ❖ Reacciones de combustión catalítica (por ejemplo, $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$)
- ❖ Descomposición de NOx en gases de escape



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.8. Catalizadores Tipo Perovskita y Espinela.

Aplicaciones:

- ❖ Reformado de hidrocarburos y alcoholes para producción de H₂.
- ❖ Producción de oxígeno activo.
- ❖ Catálisis ambiental.

Ejemplo:

- ❖ La_{1-x}Sr_xCoO₃: utilizado en oxidación de CO y COVs.
- ❖ LaFeO₃, LaMnO₃: buenos catalizadores para reacciones ambientales.
- ❖ BaTiO₃, CaTiO₃: usados en fotocatálisis y sensores.

Estructuras estables con propiedades redox sintonizables.



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.8. Catalizadores Tipo Perovskita y Espinela.

Catalizadores Tipo Espinela (AB_2O_4)

Estructura y Composición:

- ❖ Fórmula general: AB_2O_4
- ❖ A: catión divalente (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+})
- ❖ B: catión trivalente (Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+})
- ❖ Estructura cristalina basada en una red cúbica centrada en caras, donde los cationes se distribuyen en sitios tetraédricos y octaédricos.

Esta distribución le otorga propiedades electrónicas, magnéticas y catalíticas muy interesantes, especialmente en reacciones redox.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.8. Catalizadores Tipo Perovskita y Espinela.

Propiedades catalíticas destacadas:

- ❖ Buenas propiedades redox (capacidad de cambiar estados de oxidación).
- ❖ Alta resistencia térmica y mecánica.
- ❖ Estabilidad en medios oxidantes y reductores.

Aplicaciones principales:

- ❖ Oxidación catalítica de CO y CH₄
- ❖ Eliminación de contaminantes en gases de escape
- ❖ Electrocatalizadores para celdas de combustible y baterías.
- ❖ Catálisis ambiental (oxidación de NO_x, COVs)



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.8. Catalizadores Tipo Perovskita y Espinela.

Ejemplo:

- ❖ Co_3O_4 : excelente para oxidación de CO a bajas temperaturas.
- ❖ Mn_3O_4 , CuFe_2O_4 : usados en combustión de contaminantes volátiles.
- ❖ ZnAl_2O_4 , MgFe_2O_4 : soportes catalíticos estables.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

- ❖ El tipo de catalizadores heterogéneos basados en heteroestructuras y materiales avanzados, una categoría emergente y versátil que está revolucionando el diseño de catalizadores gracias a sus propiedades estructurales y electrónicas únicas.
- ❖ Son sistemas multifásicos o materiales híbridos diseñados a nivel nanométrico o molecular, que combinan más de una fase funcional (por ejemplo, metal-óxido, metal-carbono, óxido-óxido), o materiales con estructura ordenada y porosidad controlada.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

Incluyen:

- ❖ Heteroestructuras tipo núcleo-corteza (core-shell)
- ❖ MOFs (Metal-Organic Frameworks)
- ❖ COFs (Covalent Organic Frameworks)
- ❖ Grafeno y derivados del carbono
- ❖ Materiales mesoporosos ordenados (SBA-15, MCM-41)
- ❖ Nanocompuestos y nanoláminas (2D)

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

Heteroestructuras (Core-Shell, interfases).

Composición:

- ❖ Combinación de dos materiales distintos con una interfaz activa, como metal/óxido, metal/carbón, óxido/óxido.

Ejemplo:

- ❖ Pt@CeO₂ (núcleo de platino recubierto con ceria): mejora la dispersión del metal y su resistencia a la sinterización.

Aplicaciones:

- ❖ Reformado de alcoholes, oxidación de CO, reacción de agua-gas (WGS).

Las interfaces mejoran la transferencia de carga y la activación de reactivos.



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

MOFs (Metal-Organic Frameworks)

Composición:

- ❖ Redes cristalinas porosas formadas por iones metálicos coordinados con ligandos orgánicos.

Propiedades:

- ❖ Altísima superficie ($>1000 \text{ m}^2/\text{g}$), porosidad ajustable, funcionalización química.

Aplicaciones:

- ❖ Catálisis de oxidación, conversión de CO_2 , reacciones foto- y electrocatalíticas.



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

MOFs (Metal-Organic Frameworks)

Ejemplo:

- ❖ Cu-BTC (HKUST-1) para activación de CO₂ y reacciones redox.

Muy selectivos y adaptables, aunque térmicamente menos estables que óxidos.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

COFs (Covalent Organic Frameworks)

Composición:

- ❖ Redes cristalinas compuestas exclusivamente por enlaces covalentes entre ligandos orgánicos ligeros (C, N, O, B, etc.).

Aplicaciones:

- ❖ Fotocatálisis, catálisis enzimática artificial, sensores catalíticos.

Alta estabilidad estructural, baja densidad, y posibilidad de incorporar sitios activos.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

Materiales basados en carbono (grafeno, nanotubos, carbono dopado)

Propiedades:

- ❖ Alta conductividad, gran área superficial, facilidad para dopaje con N, S, B.

Aplicaciones:

- ❖ Electrocatalizadores, pilas de combustible, reacciones ácido/base, soporte para metales.

Ejemplo:

- ❖ Grafeno dopado con nitrógeno para ORR (reducción de oxígeno).

Combinan conductividad eléctrica con capacidad de interacción molecular.



2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

Materiales mesoporosos ordenados (MCM-41, SBA-15)

Estructura:

- ❖ Sílice con poros regulares de 2-10 nm, gran área superficial y volumen de poro.

Aplicaciones:

- ❖ Soportes para catalizadores metálicos o ácidos.
- ❖ Reacciones orgánicas, catálisis ambiental.

Estructura controlada, excelente como soporte o fase activa funcionalizada.

2.2. Tipos de catalizadores heterogéneo.

2.2.9. Catalizadores Heteroestructuras y Materiales Avanzados.

Nanoláminas 2D (como MoS₂, h-BN, óxidos en capas)

Aplicaciones:

- ❖ Fotocatálisis, electrocatalizadores para H₂, O₂ y conversión de CO₂.
- ❖ Activación de enlaces C-H y N-H.

Alta relación superficie/volumen, propiedades electrónicas únicas.

2.3. Naturaleza del soporte.

- ❖ La **naturaleza del soporte catalítico** es un aspecto fundamental en la catálisis heterogénea, ya que el soporte no solo sostiene físicamente el componente activo, sino que también influye en la **actividad, selectividad y estabilidad** del catalizador.
- ❖ El **soporte** es el material sólido sobre el que se deposita o dispersa la fase activa del catalizador (normalmente un metal o un óxido metálico). Aunque inicialmente se consideraban "inertes", hoy se sabe que muchos soportes **participan activamente** en la catálisis, ya sea **modificando la actividad, la estabilidad o la selectividad** del catalizador.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.1. Funciones principales del soporte.

1. Dispersión de la fase activa

Aumenta el área superficial disponible para la fase activa (mejorando su eficiencia).

2. Estabilidad mecánica y térmica

Proporciona integridad estructural en condiciones severas (altas temperaturas, presión).

3. Interacción metal-soporte (SMSI)

Puede modificar la electrónica de la fase activa (potenciando o inhibiendo su actividad).

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.1. Funciones principales del soporte.

4. Accesibilidad y transporte de masa

Porosidad controlada para facilitar la difusión de reactivos y productos.

5. Participación en la reacción

En muchos casos, el soporte actúa sinéricamente con el metal activo (soportes redox, ácidos, básicos, etc.).

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

1. Óxidos Metálicos

Porosidad controlada para facilitar la difusión de reactivos y productos.

Los óxidos metálicos son los soportes más utilizados debido a su alta estabilidad térmica, resistencia química y capacidad para interactuar con los componentes activos.

❖ Características:

- Pueden ser ácidos, básicos o neutros, lo que permite ajustar el entorno catalítico.
- Favorecen la dispersión de metales y pueden participar en reacciones redox.
- Térmicamente estables, químicamente variados (ácidos, básicos, anfóteros).



2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

❖ Ejemplos:

- Alúmina (Al_2O_3): soporte versátil, usado en hidrotratamiento y reformado.
- Sílice (SiO_2): químicamente inerte, ideal para reacciones donde se requiere baja acidez.
- Óxido de titanio (TiO_2) y óxido de cerio (CeO_2): útiles en catálisis ambiental por sus propiedades redox.

Participan en reacciones ácido-base o redox.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

2. Carbones y materiales carbonosos

❖ Ejemplos:

- Carbón activado.
- Grafeno
- Nanotubos de carbono

❖ Propiedades:

- Alta área superficial.
- Buena conductividad eléctrica.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

❖ Ventajas:

- Bajo coste.
- Buena dispersión de metales.
- Resistencia a ambientes reductores.

Usos en catálisis ambiental y electrocatálisis.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

3. Zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos microporosos con una estructura regular de canales y cavidades. Son ampliamente utilizadas en la industria petroquímica.

❖ Características:

- Alta acidez (Brønsted y Lewis).
- Selectividad molecular gracias a su estructura porosa.
- Excelente estabilidad térmica y regenerabilidad.
- Tamiz molecular.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

❖ Ejemplos:

- Zeolita Y: usada en el craqueo catalítico fluido (FCC).
- ZSM-5: empleada en isomerización y alquilación de hidrocarburos.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

4. Materiales Mesoporosos ordenados

Estos materiales tienen **poros de tamaño intermedio** (2-50 nm), lo que los hace ideales para moléculas grandes que no pueden acceder a los microporos de las zeolitas.

❖ Características:

- Alta área superficial y volumen de poro.
- Mejora la difusión de reactivos voluminosos.
- Estructura ordenada o amorfa, según el tipo.
- Poros mesoscópicos (2-10 nm).
- Modulación química



2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

❖ Ejemplos:

- MCM-41 y SBA-15: sílices mesoporosas con estructura hexagonal ordenada.
- Usados en catálisis de biomoléculas, síntesis farmacéutica y procesos verdes.

Buen soporte para nanopartículas o grupos catalíticos.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.2. Tipos de soportes comunes.

5. Materiales cerámicos o compuestos avanzados

- ❖ Soportes como perovskitas, espinelas, o heteroestructuras.
- ❖ Alta estabilidad térmica, posibilidad de participación redox activa.

Interacciones metal-soporte (SMSI)

En algunos sistemas, especialmente con metales nobles (Pt, Pd, Ru) sobre óxidos reducibles (como TiO_2 o CeO_2), se observa un fenómeno llamado **Strong Metal-Support Interaction (SMSI)**:

- ❖ Modifica la electrónica del metal.
- ❖ Aumenta la resistencia a sinterización.
- ❖ Puede inhibir la adsorción de moléculas pequeñas (CO, H_2).

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.3. Importancia del soporte.

- ❖ La **importancia del soporte** en catálisis heterogénea es fundamental, ya que el soporte no solo sostiene físicamente el agente activo, sino que también **influye directamente en la eficiencia, estabilidad y selectividad** del catalizador.
- ❖ El **soporte catalítico** no es simplemente un "portador" pasivo de la fase activa; su elección, estructura y propiedades tienen un **impacto directo** en el rendimiento global del catalizador. Un diseño adecuado del soporte puede mejorar la **actividad, selectividad, estabilidad térmica, y la vida útil** del sistema catalítico.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.3. Importancia del soporte.

Dispersión del agente activo

- ❖ El soporte permite que el agente activo (como un metal o óxido) se distribuya de manera uniforme sobre una gran superficie. Esto aumenta el número de sitios activos disponibles, mejorando la actividad catalítica.
- ❖ El soporte proporciona una gran superficie específica que permite dispersar finamente metales u óxidos activos en forma de nanopartículas.
- ❖ A mayor dispersión, mayor número de sitios activos expuestos, lo que aumenta la eficiencia catalítica.

Ejemplo: Ni o Pt dispersos sobre Al_2O_3 , SiO_2 o SBA-15.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.3. Importancia del soporte.

Estabilidad térmica y mecánica

- ❖ Muchos procesos catalíticos ocurren a altas temperaturas y presiones. El soporte debe ser capaz de resistir estas condiciones sin degradarse, asegurando la durabilidad del catalizador.
- ❖ El soporte actúa como estructura de anclaje, protegiendo la fase activa frente a:
 - Sinterización (aglomeración de partículas a alta temperatura),
 - Envenenamiento por agentes externos (azufre, cloro, etc.),
 - Desgaste físico o pérdida estructural.

Soportes como Al_2O_3 , ZrO_2 o TiO_2 ofrecen excelente estabilidad térmica.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.3. Importancia del soporte.

Modulación electrónica y efecto sinérgico

- ❖ El soporte puede interactuar electrónicamente con la fase activa, modificando su capacidad para adsorber y activar reactivos.
- ❖ En sistemas con óxidos reducibles (como TiO_2 , CeO_2), se producen interacciones fuerte metal-soporte (SMSI) que cambian la estructura electrónica del metal, afectando su reactividad.
- ❖ Esto puede mejorar la resistencia a la sinterización, o ajustar la selectividad.

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.3. Importancia del soporte.

Modulación de propiedades químicas

- ❖ El soporte puede tener propiedades ácidas, básicas o redox, que complementan o modifican la actividad del agente activo. Esto permite **ajustar la selectividad** del catalizador hacia ciertos productos..

Participación en la reacción

- ❖ En algunos casos, el soporte no es solo un portador, sino que participa activamente en la reacción, por ejemplo, facilitando la transferencia de oxígeno o electrones.
- ❖ En muchos casos, el soporte no solo estabiliza la fase activa, sino que participa químicamente:
 - **Ceria (CeO_2)**: suministra oxígeno lábil (reacciones redox).
 - **Zeolitas**: proporcionan acidez fuerte y estructura confinante.
 - MgO o ZrO_2 : introducen sitios básicos o ácidos modificables.
 - **Soportes carbonosos dopados**: ofrecen sitios activos adicionales.



2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.3. Importancia del soporte.

Control de la accesibilidad

- ❖ La **estructura porosa** del soporte (microporosa, mesoporosa o macroporosa) determina qué moléculas pueden acceder a los sitios activos. Esto permite **controlar la selectividad molecular** y evitar reacciones no deseadas.
- ❖ Soportes como **zeolitas, mesoporosos (SBA-15, MCM-41)** o **carbones activados** presentan porosidad ajustable que:
 - Facilita el **transporte de masa** (reactivos \leftrightarrow productos).
 - Controla el acceso a los sitios activos (**efecto tamiz molecular** en zeolitas).
 - Permite seleccionar moléculas por tamaño o forma (**efecto de selección estérica**).



2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.3. Importancia del soporte.

Versatilidad en el diseño catalítico

- ❖ El soporte se puede **funcionalizar químicamente**, introducir dopantes, crear **heteroestructuras**, o recubrir con capas protectoras (core-shell).
- ❖ Permite ajustar la actividad para una reacción específica: **oxidación selectiva, hidrogenación, reformado, cracking, etc.**

2.3. Naturaleza del soporte.

2.3.3. Importancia del soporte.

Ejemplos de soportes importantes

- ❖ **Alúmina (Al_2O_3)**: excelente estabilidad térmica, usada en hidrotratamiento.
- ❖ **Sílice (SiO_2)**: inerte, ideal para reacciones donde se requiere baja acidez.
- ❖ **Zeolitas**: microporosas y ácidas, usadas en craqueo catalítico.
- ❖ **MCM-41, SBA-15**: mesoporosos, útiles para moléculas grandes.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

- ❖ Los catalizadores heterogéneos están compuestos por varios componentes. Entre ellos, los más determinantes para la actividad catalítica son los agentes activos y los promotores, que cumplen funciones distintas pero complementarias.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.1. Agente Activo.

- ❖ Los agentes activos son los componentes del catalizador responsables de acelerar la reacción química. Son los sitios donde los reactivos se adsorben, reaccionan y se transforman en productos.
- ❖ Su naturaleza química, estructura y distribución sobre el soporte determinan la actividad y selectividad del catalizador.
- ❖ Los agentes activos son los componentes del catalizador que interactúan directamente con los reactivos y facilitan la transformación química.
- ❖ Son responsables de la actividad catalítica y suelen estar dispersos sobre un soporte.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.1. Agente Activo.

Características principales:

- ❖ Puede estar en forma de metal, óxido metálico, sulfuro, carburos o nitruros.
- ❖ Se encuentra típicamente dispersado sobre un soporte.
- ❖ Puede ser mono o bimetálico, según el tipo de reacción.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.1. Agente Activo.

Tipos de agentes activos::

1. Metales nobles

- ❖ Ejemplos: Platino (Pt), Paladio (Pd), Rodio (Rh)
- ❖ Aplicaciones: Convertidores catalíticos, reacciones de oxidación e hidrogenación.

2. Metales de transición

- ❖ Ejemplos: Níquel (Ni), Cobalto (Co), Hierro (Fe)
- ❖ Aplicaciones: Hidrogenación de aceites, síntesis de amoníaco.

3. Óxidos metálicos

- ❖ Ejemplos: Óxido de vanadio (V_2O_5), Óxido de molibdeno (MoO_3)
- ❖ Aplicaciones: Oxidación de SO_2 , eliminación de contaminantes.



2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.1. Agente Activo.

Tipos de agentes activos::

4. Sulfuros metálicos

- ❖ Ejemplos: Co-Mo, Ni-Mo sobre alúmina.
- ❖ Aplicaciones: Hidrodesulfuración en refino de petróleo.

Ejemplos:

- ❖ En el convertidor catalítico de automóviles, el agente activo es Pt, Pd o Rh, que transforma gases tóxicos en compuestos menos dañinos.
- ❖ En la síntesis de amoníaco, el agente activo es hierro metálico con promotores.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.1. Agente Activo.

Tipos de agentes activos::

Función:

- ❖ Aumentar la actividad catalítica.
- ❖ Mejorar la selectividad hacia productos deseados.
- ❖ Prolongar la vida útil del catalizador.
- ❖ Reducir la desactivación por sinterización o envenenamiento.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.2. Promotores.

- ❖ Los promotores son sustancias que se añaden al catalizador para mejorar su rendimiento, aunque no participan directamente en la reacción.
- ❖ Pueden modificar la actividad, selectividad, estabilidad térmica o resistencia a la desactivación del agente activo.
- ❖ Los promotores son sustancias añadidas al catalizador para mejorar su rendimiento, aunque no participan directamente en la reacción química.
- ❖ Su efecto puede ser estructural, electrónico o funcional.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.2. Promotores.

Tipos de promotores:

1. Promotores electrónicos

- ❖ Modifican la densidad electrónica del agente activo.
- ❖ Ejemplo: Potasio (K) en catalizadores de hierro para la síntesis de amoníaco.

2. Promotores estructurales

- ❖ Mejoran la dispersión del agente activo o la estabilidad del soporte.
- ❖ Ejemplo: Aluminio (Al) en catalizadores de reformado para estabilizar la estructura.

3. Promotores redox o funcionales

- ❖ Facilitan la transferencia de oxígeno o electrones.
- ❖ Ejemplo: Ceria (CeO_2) en convertidores catalíticos, mejora la capacidad de almacenamiento de oxígeno.



2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.2. Promotores.

Función:

- ❖ Aumentar la actividad catalítica.
- ❖ Mejorar la selectividad hacia productos deseados.
- ❖ Prolongar la vida útil del catalizador.
- ❖ Reducir la desactivación por sinterización o envenenamiento.

Ejemplos:

- ❖ **Potasio (K)** en el catalizador de hierro para la **síntesis de amoníaco**, mejora la actividad al modificar la estructura electrónica.
- ❖ **Ceria (CeO₂)** en catalizadores de automóviles, mejora la capacidad de almacenamiento de oxígeno y la eficiencia en la oxidación de CO.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.2. Promotores.

Ejemplo combinado:

En un convertidor catalítico automotriz:

- ❖ Agente activo: Platino (Pt), Paladio (Pd), Rodio (Rh).
- ❖ Promotor: Ceria (CeO_2), que mejora la eficiencia en la oxidación de CO y la reducción de NOx.
- ❖ Soporte: Alúmina estabilizada, que proporciona alta área superficial y resistencia térmica.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.3. Relación entre ambos.

- ❖ La relación entre el agente activo y el promotor en un catalizador heterogéneo es **sinérgica**: el promotor no actúa directamente como catalizador, pero **modifica y mejora** el comportamiento del agente activo, optimizando su rendimiento en la reacción.
- ❖ El diseño de un catalizador eficiente requiere una **sinergia entre el agente activo y los promotores**, junto con un soporte adecuado. Esta combinación permite optimizar el rendimiento catalítico en términos de velocidad de reacción, selectividad hacia productos deseados y durabilidad del catalizador.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.3. Relación entre ambos.

¿Cómo interactúan?

1. Modificación electrónica

El promotor puede alterar la densidad electrónica del agente activo, facilitando la adsorción o activación de los reactivos.

- ❖ Ejemplo: El potasio (K) en catalizadores de hierro para la síntesis de amoníaco aumenta la donación electrónica, mejorando la disociación del nitrógeno (N_2).

2. Mejora de la dispersión

Algunos promotores ayudan a dispersar mejor el agente activo sobre el soporte, aumentando el número de sitios activos disponibles.

- ❖ Ejemplo: El óxido de lantano (La_2O_3) puede mejorar la dispersión de níquel en catalizadores de reformado.



2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.3. Relación entre ambos.

¿Cómo interactúan?

3. Estabilización térmica

Promotores como ceria (CeO_2) ayudan a prevenir la sinterización (aglomeración) del agente activo a altas temperaturas, prolongando la vida útil del catalizador.

4. Facilitación de reacciones auxiliares

Algunos promotores participan en reacciones secundarias que regeneran sitios activos o eliminan especies inhibidoras.

- ❖ Ejemplo: La ceria en convertidores catalíticos almacena y libera oxígeno, ayudando a mantener la eficiencia en condiciones variables.

2.4. Agentes Activos y Promotores.

2.4.3. Relación entre ambos.

Ejemplo práctico: Convertidor catalítico automotriz

- ❖ Agente activo: Platino (Pt), Paladio (Pd), Rodio (Rh) → catalizan la oxidación de CO y la reducción de NOx.
- ❖ Promotor: Ceria (CeO_2) → mejora la capacidad de almacenamiento de oxígeno y estabiliza los metales nobles.
- ❖ Resultado: Mayor eficiencia en la conversión de gases contaminantes, incluso en condiciones de arranque en frío.

