

Otra clasificación de materiales carbonosos

Gregorio Marbán y Conchi Ania

Instituto Nacional del Carbón (INCAR) - CSIC

c/ Francisco Pintado Fe 26, 33011 Oviedo (Spain)

E-mail: greca@incar.csic.es, conchi@incar.csic.es

Llevar a cabo una clasificación de materiales de carbono es algo a lo que casi todos los investigadores relacionados con el mundillo se han visto abocados, o al menos tentados, en algún momento de sus carreras investigadoras.

Al igual que todos los aficionados al fútbol son entrenadores potenciales del equipo de sus pasiones, todos los investigadores en materiales de carbono se consideran igualmente potenciales "clasificadores". En general casi todas las clasificaciones acaban pareciéndose entre sí, como no puede ser de otro modo, y debiendo su estructura jerarquizada a los trabajos de reconocidos popes del campo como los doctores Rodríguez Reinoso, Radovic, Marsh, Inagaki, etc.

Obviamente no es objeto de esta ¿nueva? clasificación enmendar la plana a los mencionados investigadores, incluyendo los cientos que pugnan por salir de la brevedad de un conciso etcétera, sino más bien todo lo contrario; rendirles homenaje.

Cuando hace más o menos ocho años uno de los co-autores de esta clasificación, Gregorio Marbán, esbozó su primera versión, no lo hizo para aportar sus escasos conocimientos en el tema a la comunidad científica, sino con el menos pretencioso objetivo de ordenar sus ideas durante la preparación de los ejercicios de un concurso oposición. Para la ejecución de la tarea sólo fue necesario resumir la información ya recogida de forma exhaustiva en publicaciones de los antedichos investigadores, así como en handbooks sobre materiales carbonosos.

El resultado fue una clasificación tabulada de pocas hojas que tenía el aliciente de incluir algunas breves notas sobre los procedimientos de producción y aplicaciones reales y potenciales de los distintos materiales. En sí la clasificación no habría pasado de un simple ejercicio académico de no haber llamado la atención de uno de los co-opositores, que gentilmente se ofreció a "valorar" sus contenidos. ¡Tiempos lejanos cuando la amistad prevalecía sobre la competitividad!

A lo largo de años posteriores la clasificación fue transmitida mediante el clásico soporte de la fotocopia y utilizada con fines de diversa índole por otros investigadores del Instituto Nacional del Carbón de Oviedo, lo cual finalmente nos llevó a pensar que podría ser también de utilidad en el ámbito más amplio del Grupo Español del Carbón. Sin embargo, en el transcurso de menos de una decena de años la inagotable fertilidad del campo de materiales

carbonosos ha producido infinidad de nuevos especímenes, a la vez que otros viejos han cambiado de jerarquía en función de los nuevos conocimientos.

La apetencia casi lujuriosa que poseen los átomos de carbono para combinarse tanto entre sí como con otros elementos o materiales dando lugar a nuevas formas y estructuras 3-D parece casi ilimitada.

Así, dependiendo de la organización de los átomos de carbono, o de la presencia de heteroátomos y sus combinaciones, los materiales resultantes presentan propiedades y estructuras muy diversas, lo que los hace insustituibles en numerosos campos de aplicación, tanto como materiales estructurales como con otra funcionalidad.

El crecimiento exponencial de la familia de los materiales de carbono en estos últimos años es consecuencia directa de la extensa investigación que se está llevando a cabo en diversos ámbitos. Junto a los materiales tradicionales -grafito, diamante o carbón activado-, la investigación y el desarrollo de nuevos métodos de síntesis ha motivado la aparición de nuevas estructuras (espumas, geles, fibras, películas de carbono), formas alotrópicas insólitas (fullerenos, nanotubos, nanoespumas), materiales con propiedades diseñadas a medida (control de la porosidad, estructuras jerarquizadas) o materiales híbridos multifuncionales (compuestos de intercalación, materiales compuestos carbono/carbono, metalocarbohedrenos). Incluir los nuevos materiales en la clasificación se presentaba como una tarea ingente.

Afortunadamente el guante de la renovación fue recogido por la doctora Conchi Ania, co-autora de este trabajo, que no sólo proporcionó el empaque que ahora posee la clasificación, sino que pulió multitud de defectos que pasaron por alto en su redacción prístina. En la labor de revisión también ayudaron los doctores Marcos Granda, María Antonia Díez-Díaz Estébanez y Ángel Menéndez, cuyos comentarios fueron siempre muy valiosos.

Nuestro objetivo final ha sido realizar una clasificación sencilla y actualizada de los materiales de carbono, proporcionando una visión global del estado actual del arte.

El criterio de clasificación escogido se basa en la distinción entre materiales carbonosos simples y compuestos, atendiendo a la presencia de elementos o materiales que modifiquen significativamente las propiedades del material carbonoso. En cualquier caso, la elección de criterios diferentes a los

escogidos daría lugar a clasificaciones alternativas a la aquí propuesta, igualmente válidas. Se han incluido los materiales tradicionales junto con las denominadas 'nuevas formas de carbono', haciendo especial hincapié en aquellos materiales que han adquirido gran relevancia en las últimas décadas por su elevado potencial en campos de aplicación emergentes, y en nuevos procedimientos de síntesis que permiten diseñar 'a medida' las propiedades de los materiales resultantes en función de su aplicación final. Esperamos finalmente que la clasificación pueda servir a cualquier iniciante en el mundo de los materiales carbonosos de punto de apoyo para impulsarse hacia más altas cotas de conocimiento en la materia, del que son activos productores a nivel mundial muchos de los integrantes del Grupo Español del Carbón.

Literatura recomendada

- Gogotsi Y (Ed.), en *Nanomaterials Handbook*, CRC Press, 2006
- Inagaki M, en *New carbons. Control of structure and functions*, Elsevier Science, Oxford, 2000
- New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems*, NATO Science Series, 229, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2006
- Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation*, TJ Bandosz Ed., Elsevier, New York, 2006
- Pierson HO, en *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications (Materials Science and Process Technology)*, Elsevier, New Jersey, 1994
- Lee J, Kim J, Hyeon T, *Recent Progress in the Synthesis of Porous Carbon Materials*, *Adv. Mater*, 18, 2073, 2006
- Kyotani T, *Control of pore structure in carbon*, *Carbon* 38, 269, 2000.
- Marsh H, Rodríguez-Reinoso F, en *Activated Carbon*, Elsevier, London, 2006.
- Marsh H, Heintz E, Rodríguez-Reinoso F, en *Introduction to carbon Technologies*, University of Alicante, Alicante, 1997
- Pilato LA, Michno, JM, en *Advanced Composite Materials*, Springer-Verlag, Berlin, 1994
- Donnet JB, Wang TK, Peng JCM, Rebouillat S (Eds.), en *Carbon Fibers*, Marcel Dekker Inc., New York, 1998

Glosario de abreviaturas

AAO: Anodic aluminium oxide	HDN: Hidrodesnitrogenación	<i>phenylenediamine-</i>
a-C: Amorphous carbon	HDS: Hidrodesulfuración	<i>3,3',4,4'-tetraaminobiphenyl</i>
ADNR: Aggregated diamond nanorods	HIFI: High fidelity	PPTA: Poli(p-fenileno tereftalamida)
API: Addition-reaction polyimides	HOPG: Highly ordered pyrolytic graphite	PSA: Pressure swing adsorption
BMI: Bismaleimida	HP: High performance	PTFE: Politetrafluoroetileno
C/C: Composites carbono / carbono	ITO: Indium tin oxide	PVC: Cloruro de polivinilo
CBCF: Carbon-bonded carbon fiber composite	MCMB: Mesocarbon microbeads	PVD: Physical vapor deposition
CFRC: Carbon fiber reinforced cement	MWCNT: Multiwall carbon nanotube	PVDC: Policloruro de vinilideno
CFRCer: Carbon fiber reinforced ceramics	NG: No grafitizable	Sg: Superficie específica
CFRP: Carbon fiber reinforced plastic	ORNL: Oak Ridge National Laboratory	SA: Sudáfrica
CPI: Condensation-reaction polyimides	P: Presión	SCR: Selective catalytic reduction (de NO)
CVD: Chemical vapor deposition	PAN: Poliacrilonitrilo	SWCNH: Single wall carbon nanohorn
CVI: Chemical vapor infiltration	PBI: Polibencimidazol	SWCNT: Single wall carbon nanotube
DLC: Diamond-like carbon	PBO: Poli(p-fenileno benzobisoxazol)	T: Temperatura
ESA: Electrothermal swing adsorption	PBT: Poli(butileno tereftalato)	TGMDA: Tetraglicidil metileno dianilina
G: Grafitizable	PCB's: Bifenilos policlorados	THF: Tetrahidrofurano
GP: General purpose	PEEK: Poliéter-éter cetona	TSA: Temperature swing adsorption
HCF: Hidrofluorocarbono	PEK: Poliéter cetona	VGCF: Vapor grown carbon fibers
HCFC: Hidroclorofluorocarbono	PF: Fenólico/a	VOC's: Volatile organic compounds
	PGS: Pyrolytic Graphite Sheet	ρ: densidad
	PPP: Poli(p-fenileno)	
	PPS: Sulfuro de polifenileno	
	PPT: Pyromellitic dianhydride-p-	

Clasificación de materiales carbonosos simples

Producto carbonoso	Grupo de materiales o proceso de fabricación	Precursor	G/NG	Forma	Aplicaciones
Hibridación sp^3 G: grafitizable NG: No grafitizable 					
Lonsdaleíta Forma alotrópica	Diamante en sistema cristalino hexagonal	Origen meteorítico. Compresión de grafito. Descomposición térmica $[HC]_n$ 1 bar; 110-1000°C; Ar	-	Cristales agregados	-
Nanodiamante Forma alotrópica	Molienda polvo diamante [Mypolex, Dupont] Irradiación de electrones; CVD (baja P, T moderada) Detonación (alta T y P)	Grafito, C_{60} , MWCNT, nanocubos	-	Películas, ó cristales de algunos nm de diámetro, según síntesis	Refuerzo de acero y materiales compuestos (resistencia corrosión) Posibles aplicaciones en medicina como transportador de fármacos (en estudio)
	Agregados de diamante nanocilíndricos (ADNR) (Dubrovinskaia, 2004)	Compresión C_{60} [20 GPa, 2800 °C]	-	Agregados interconectados de diámetro entre 5-20 nm y longitud 1 μm	Espectativas Posible aplicación en herramientas de corte como superabrasivo
Diamante (no considerado como material carbonoso en las clasificaciones al uso) Forma alotrópica	Diamante natural	Kimberlita	-	Cristales de ~0.02 g	Gemas, molienda, cortado, pulido, etc.
	Diamante sintético de alta presión (método explosivo). Dupont	Coque de brea grafitizado (catalizador solvente = Fe) [300 kbar, 700°C]	-	Pequeños diamantes policristalinos de hasta 60 μm	
	Diamante sintético de alta presión (método hidráulico). Beers (SA)	Coque de brea grafitizado (catalizador solvente = Fe-Ni) [55-60 kbar, 1500°C]	-	Cristales comerciales de hasta 6 mm (hasta 2 carats = 0.4 g)	
	Diamante CVD (T formación H atómico = 2000°C; T sustrato = 800-1000°C).	CH_4 , alifáticos, aromáticos, etc. + H (elimina sp^2 y estabiliza sp^3). Activación: plasma, hot-wire	-	Recubrimientos policristalinos (grosor de hasta 1 mm)	
Hibridación sp^3-sp^2					
Carbón amorfo Forma alotrópica Hibridación $sp^2 + sp^3$ (mayoritaria sp^3)	Carbón tipo diamante (DLC) hecho por PVD	Grafito bombardeado con Ar (se forma C por 'sputtering') [a-C]	NG	Recubrimientos de hasta 1 μm	Recubrimiento de materiales a baja temperatura (<300°C). Substituto de teflón y otros recubrimientos (carburos y nitruros) para aplicaciones de fricción a baja temperatura. Máscara en litografía de circuitos impresos. Ventanas ópticas en infrarrojos y láser. Lubricante sólido. Prótesis ortopédicas
	Carbón tipo diamante (DLC hecho por PVD/CVD)	CH_4 ó nC_4H_{10} ó $C_2H_2 + H_2$ activado por radiofrecuencia [a-C:H]			
Fullerenos (Kroto, 1985) Forma alotrópica Hibridación intermedia sp^x ($2 < x < 3$) C_{60} : $sp^{2.28}$	Vaporización láser	Grafito + pulso de Helio	-	Cristales moleculares	Semiconductores (M_6C_{60}), superconductores (M_3C_{60}), limitadores ópticos, fotoconductividad (como dopantes de polímeros), síntesis de SiC y diamante, encapsulación de gases, aplicaciones terapéuticas células fotovoltaicas
	Arco eléctrico	Grafito en atmósfera de He (200 torr)	-		
Nanoespumas (Rode, 1997) Forma alotrópica Hibridación intermedia sp^x ($2 < x < 3$)	Irradiación de láser de alta potencia en cámara de argón [T=10000°C; P>0.1 torr]	Carbón vítreo	-	Red 3D de heptágonos y hexágonos (curvatura inversa); contiene electrones desapareados	Semiconductor. Propiedades magnéticas y ferromagnéticas, potencial aplicación en biomedicina
Estructuras hipotéticas	'Haecalites' (Terrones, 2000)		-	Nanotubos formados por anillos de 5, 6 y 7 átomos de carbono	Estructuras hipotéticas (formas alotrópicas propuestas en función de cálculos energéticos favorables)
	'High genus fullerene' Terrones (2000)		-	Estructura toroidal con anillos de 6 y 7 átomos de C	
	'Schwarzites' (Terrones, 2000)		-	Estructuras 2D con anillos de 5 y 7 átomos de C	

Producto carbonoso	Grupo de materiales o proceso de fabricación	Precursor	G/NG	Forma	Aplicaciones		
Esferas de carbono concéntricas	Irradiación de electrones hacia nanopartículas de carbono con caras planas ('faceted')	Nanopartículas de carbono	-	Esferas concéntricas (cebollas, hasta 10 nm)	Especulativas		
Nanotubos (Iijima, 1991) Forma alotrópica Hibridación intermedia sp^x ($2 < x < 3$)	Vaporización láser sobre blanco de grafito, Ar; 1200°C	Blanco de grafito	-	70%; SWCNT, sin defectos	Conductores y semiconductores. Refuerzo de composites muy finos y resistentes (gran elasticidad). Pantallas y sondas de electrones. Sensores. Baterías de Li. Pilas de combustible. Supercondensadores. Catalizadores (etilbenzeno a estireno). Transistores. Medicina		
	Arco eléctrico sobre electrodo de grafito, He/Ar	Blanco de grafito	-	30-90%; SWCNT+MWCNT; tubos cortos con defectos			
	CVD catalítica	[10% C_2H_2 / N_2]; CO Catalizadores: Fe, Co, Ni	-	MWCNT con defectos	Sistemas fotovoltaicos (torres 3D) miniaturizados; membranas en separación de aceites pesados/ligeros; filtración agua por compresión		
	Molde de óxido de aluminio anodizado (AAO)	I) CVD no catalítica: C_3H_8 II) Impregnación fase líquida (alcohol furfúrico, poliacrilonitrilo) + carbonización	G	MWCNT, tubos largos y abiertos por los extremos, alineados			
	Pirólisis en aerosol 'spray pyrolysis' + CVD catalítica	Disolución de benceno, xileno, etc. [Ar, Ar/ H_2 85:15%] Catalizadores: ferroceno	-	Estructuras 3D alineadas 'forest'			
	Nanotubos poligonales	Tratamiento MWCNT a 2000°C y alto vacío	-	Nanotubos multipared	Especulativas		
Estructuras gráficas no planas	'Nanohorns' (Harris, 1994)	Descarga por arco eléctrico o vaporización láser sobre electrodos de grafito (sin catalizador)	G	Agregados de partículas de 100 nm Monopared (SWCNH), películas	Aplicaciones potenciales como: soportes de electrocatalizadores, emisores de campo, medicina, adsorción CH_4 , almacenamiento de H_2 , intercalación de Li, electrónica		
	Nanocoils, nanoribbons	CVD catalítica de hidrocarburos, resinas, (Fe, ITO)	G	Nanocoils, nanoribbons			
	Espirales ó 'nanoscrolls' (Viculis, 2003)	Intercalación/ exfoliación y tratamiento en ultrasonido de grafito	G	Espirales diámetro medio 40 nm			
	Conos (nanocones)	Descomposición de hidrocarburos sobre carbón tipo vidrio; condensación sobre sustrato de grafito	G	Cristales cónicos de grafito que incorporan pentágonos; ángulo de inclinación variable			
Nanofibras de carbono	CVD método del sustrato	Hidrocarburos: benceno, metano, acetileno, n-hexano, etc. Catalizadores: Fe, Ni, Co, etc.	G	Filamentos tamaño submicrométrico. Estructuras tipo 'platelet', 'herringbone', 'ribbon', 'stacked-up'	Placas bipolares, soportes de electrocatalizadores, automoción, industria aeroespacial, adsorbentes, separación y almacenamiento de gases, soportes de catalizadores		
	CVD método del catalizador flotante						
	Electrohilado	Mezcla coaxial de líquidos (glicerina, etanol, lignina)	-	Nanofibras huecas			
Fibras de carbono no grafitizables	Fibras de uso general (grado GP, 'general purpose'). Se hacen termoestables tras la estabilización oxidativa.	Fracciones de breas de carbón y petróleo (fase isotropa) -cortes de destilación, extracción con disolventes-	NG	Filamentos diámetro mínimo 10 μm .	Precusores de materiales porosos (adsorbentes, catalizadores, etc.). Refuerzo (relleno) de materiales compuestos (ver materiales compuestos de refuerzo fibrilar)		
	Fibras de altas prestaciones (grado HP, 'high performance')	PAN (hilado húmedo)				Fibras sueltas cortas o continuas. Filtros tejidos y sin tejer. Mantas.	Fibras de alto rendimiento. Precusores de materiales porosos (catalizadores, soportes de catalizadores, etc.)
		PAN (extrusión)					
		Rayón					
	Fibras tipo vidrio	Resinas fenólicas (Novolak), furánicas, etc. (fibras kynol)	Precusores de materiales porosos (catalizadores, soportes de catalizadores, etc.)				
Fibras activadas	Ver materiales porosos						
Geles de carbono (Pekala, 1989) Hibridación sp^3+sp^2+sp	Método sol-gel con catalizador básico [carbonato de sodio]	Resorcinol – formaldehído Ver materiales porosos	NG	Monolitos, composites, películas, polvos o microesferas (baja densidad y desarrollo poroso bimodal = mesoporos entre partículas, microporos en partículas)	Adsorbentes (de gas, purificación de agua). Soporte de catalizadores. Aislantes térmicos y acústicos. Elementos semiconductores, piezoeléctricos, dieléctricos y ferroeléctricos. Conductores (o aislantes) eléctricos. Supercondensadores de doble capa eléctrica. Desionización capacitiva.		
Carbón activado Hibridación sp^3+sp^2+sp	Ver materiales porosos						

Producto carbonoso	Grupo de materiales o proceso de fabricación	Precursor	G/NG	Forma	Aplicaciones	
Carbón pirolítico isótopo	CVD hidrocarburos (no catalítica)		NG	Láminas, recubrimientos	Recubrimiento y estabilización de materiales: catalizadores, ánodos baterías de Li, cátodos baterías primarias, partículas nucleares, etc.	
Espumas vítreas	Técnicas de insuflado de polímeros ó resinas + espumantes	Polímeros, resinas (fenol-formaldehído, urea-formaldehído) Espumantes: CO ₂ , He, HCF, pentano, HCFC	NG	Monolitos, películas,	Aislamiento térmico (industria aeroespacial) Disipación de calor en microprocesadores, parachoques y placas de absorción de impactos (automoción), convertidores catalíticos, soportes catalizadores, prótesis, electrodos para pilas, etc.	
	Técnicas de pirólisis	Breas, carbones (materia volátil del precursor actúa de agente espumante)				
Negros de carbono (hibridación sp ² + sp ³ Predominio sp ² ; existencia 'dangling bonds')	Negros de horno (90%. Combustión incompleta controlada de hidrocarburos aromáticos)		NG	Partículas ~12 -75 nm (S _g ~25-1500 m ² /g). aglomeradas en distintos tamaños.	Relleno de neumáticos (90%). Base de tintas tipográficas (periódicos). Pinturas, lacas, rellenos de grafito sintético y muchas otras (p.ej. soportes de catalizadores)	
	Negros de canal (combustión incompleta de gas natural. Proceso de canales)			Partículas de ~10 nm (S _g ~150 m ² /g)		
	Negros térmicos (pirólisis de gas natural)			Partículas de hasta ~500 nm (~25 m ² /g)	Pilas secas. Relleno de gomas y plásticos	
	Negros de acetileno (pirólisis de acetileno)			Partículas de 3-130 nm (65 m ² /g)		
	Negros de humo (combustión incompleta de combustibles aromáticos: 'lampblack')			Partículas de 100-200 nm		Pigmento negro para tintas (tinta china) y pinturas
Hibridación sp²						
Carbón tipo vidrio Forma alotrópica (hibridación sp ² , debate sobre presencia de estructuras tipo fullereno) (Harry, 2003)	Pirólisis de polímeros	- Resinas fenólicas termoestables fenol-formaldehído (Resol y Resitol) [catálisis alcalina], Novolak+hexamina [catálisis ácida]. - Resinas epoxi (Bisfenol A epoxi; TetraGlicidil Metileno DiAnilina [TGMDA]) - Resinas SCN y SCS - Poliimidias: Larc-TPI (termoplástica - NG) - Alcohol polifurfurílico - PAN - Celulosa (rayón, viscosa, acetato de celulosa) - PVDC (Saran) - Poli(p-fenileno) (PPP) - Alcohol polivinílico	NG	Monolitos Espumas Microesferas	Monolitos: Crisoles, botes Electrodos de baterías, pilas de combustible, etc. Biocompatibilidad Espumas: Electrodos Li-ión, aislamiento térmico; adsorción de hidrocarburos (forma activada), filtro de partículas diesel, refuerzo de composites Microesferas: soporte de catalizadores, rellenos de baja densidad, etc.	
Grafito sintético	Grafito Acheson (proceso Acheson, 1890)	Tratamiento térmico de coque + sílice (horno eléctrico, 2000-2500 °C)	-	Partículas de tamaño variado	Lubricantes, tintas, recubrimientos, electrodos, crisoles, lapiceros, escobillas de dinamos, etc.	
	Carbono grafitico resiliente (proceso Desulco)	Tratamiento térmico de coque de petróleo de bajo contenido en azufre			Aplicaciones metalúrgicas (fabricación de hierro dulce y acero)	
	Grafito alto grado ordenamiento	Grafito pirolítico laminar y columnar	Descomposición de hidrocarburos (CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₆)	-	Monolitos, láminas (PGS de Matsushita), recubrimientos	Contenedores de alta temperatura. Botes y crisoles para epitaxia. Bases para CVD de semiconductores. Bocas de cohetes. Recubrimiento de partículas nucleares. Válvulas de corazón. Implantes dentales. Recubrimientos de fibras inorgánicas y ópticas. CVI de C/C (frenos, escudos térmicos, etc). Láminas de HOPG: Aislamiento eléctrico, partes de equipos HIFI.
		Grafito a partir de poliimidias (grafito monolítico)	Poliimidias planas [Kapton, Novax, PPT] (Matsushida Electric Co. Ltd.)	-	Películas de varias micras de grosor; monolitos	Materiales de equipos HIFI (conos de altavoces). Cilindros de aislamiento eléctrico (cables). Aislante térmico, eléctrico y de radiación en equipamiento aeroespacial. Aplicaciones térmicas (aislante o conductor). Substrato flexible para circuitos eléctricos. Monocromadores de Rayos X y corrientes de neutrones.
Grafito Kish		Grafito precipitado en la producción de acero	-	Partículas amorfas planas (copos) de cristales simples de hasta 1 cm	Se añade como carbono de baja volatilidad para reducir óxidos de hierro en el proceso Environment	

Producto carbonoso	Grupo de materiales o proceso de fabricación	Precursor	G/NG	Forma	Aplicaciones			
Grafito sintético	Grafito exfoliado o deslaminado (Inagaki)	Calentamiento abrupto de grafito intercalado: Grafito: VGCF, grafito sintético, etc. Intercalado: H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , FeCl ₃ , K-THF, Na-THF	-	Láminas flexibles (Grafoil)	Gaskets (cintas de aislamiento para uniones, como los rollos de teflón), empaquetamiento y aislamiento; térmico a alta temperatura; limpieza de manchas de petróleo; catalisis.			
	Grafito monolítico	PVC	-	Ánodos de disco, recubrimientos de impregnación.	Ánodo de batería Li-ión en la región 2. Impregnación de C/C.			
		Poliimidias planas		Películas, bloques	Ver grafito a partir de poliimidias			
		Espumas gráficas (Klett, Burchell)		Brea / Mesofase (ORNL – Poco graphite). Proceso distinto del espumado por <i>gas-blowing</i> (bajo patente)	Espumas gráficas (las paredes de las celdas son como fibras gráficas)	Materiales con alta conductividad térmica (3-4 veces la del Cu) y una densidad 4 veces inferior a la del aluminio. Refuerzo de composites.		
Grafito isotrópico a partir de materiales autosinterizables (producido por sinterización de los precursores)	Coque verde (ver coque)	-	Piezas sinterizadas, carbonizadas y grafitizadas	Sinterización de las partículas verdes (grafito isotrópico): Electrodos. Sellos mecánicos. Partes de prensas en caliente. Moldes de fundición. Pistones, electroerosión. Composites con resina: Elementos calefactores; tintas y pinturas conductoras de la electricidad. Escudos electromagnéticos. Composites cerámicos: Filtros; materiales resistentes al calor; cerámicas ligeras. Modificación superficial: Carbón superactivado. Compuestos de intercalación (Li-ión)				
Mesofase coalescida o microsferas de mesofase carbonosa ' <i>mesocarbon microbeads</i> ' (ver mesofase)								
Grafito natural Forma alotrópica	Conos (yacimientos Ticonderoga, Gooderham, Kola)		-	Cristales cónicos (incorporan pentágonos)	Crisoles refractarios, aceites lubricantes, baterías, recubrimientos conductivos, escobillas eléctricas, pinturas, lapiceros, etc			
	Escamas (plumbago)	Diseminado en cuarcitas y mármoles ricos en sílice		Placas				
	Cristalino (vena)	A partir de petróleo		Placas y agujas				
	Amorfo	A partir de carbón		Partículas granulares				
Mesofase (Fase anisótropa de brea)	Coalescencia de microsferas de mesofase carbonosa y separación de la fase isotropa.	Brea de alquitrán de hulla, Brea de petróleo, Brea de naftaleno, Antraceno, Acenaftaleno, PVC	G	Microesferas (' <i>mesocarbon microbeads</i> ') Osaka Gas: 1-80 µm	Producción de grafito monolítico isotrópico (ver grafito sintético). Producción de carbón superactivado (p.ej. M30 de Osaka Gas) (ver carbón activado). Producción fibras de grado HP (ver fibras de carbono grafitizables).			
Brea	Brea de biomasa	Alquitranes de origen vegetal	G	Lápices, cilindros y partículas de tamaño variado Estado líquido	Aglomerante para briquetas de finos de carbón o coque			
	Brea de alquitrán de hulla	Carbón mineral (hulla)			Matriz de materiales de refuerzo granular (ver materiales compuestos C/C); matriz de composites C/C en aplicaciones alta temperatura (l. aerospacial, aeronáutica); breas ligantes y de impregnación; precursor de mesofase, fibras de carbono y carbones porosos; frenos; material para ánodo de batería Li-ión en la región 2, electrodos en supercondensadores; refuerzo; ánodos de carbono para industria de Al, siderurgia.			
	Brea de petróleo	Fraciones de refino de petróleo - aceite de decantado, alquitrán de pirólisis, gasoil de vacío-						
	Brea sintética	Polimerización catalítica de compuestos aromáticos puros: PVC, naftaleno, antraceno, acenaftaleno. Polímeros						
Coque	Coque de carbón mineral	Metalúrgico	Siderúrgico	Carbón mineral (hulla)	G	Coque siderúrgico: partículas de tamaño 80-20 mm.	Siderurgia (combustible, reductor y soporte permeable en el horno alto)	
						De fundición	Coque de fundición: partículas de tamaño superior a 90 mm.	Industria de fundición férrea y no férrea. Sector del aislamiento (lana de roca, aislamiento acústico y térmico). Industria química, azucareras, ferroaleaciones.
	Extracción de carbón mineral con disolventes (con y sin H ₂). El extracto es el precursor de coque (patente EEUU, 1991)		-	-	-	G	Finos de coque: tamaño menor de 20 mm	Otros usos: fabricación de electrodos (finos de coque).
	Coque de brea						Brea de alquitrán de hulla -coque de aguja-	Aguja

Producto carbonoso	Grupo de materiales o proceso de fabricación	Precursor	G/NG	Forma	Aplicaciones	
Coque	Coque de petróleo	Coque combustible	G	<p>Aguja (Premium), partículas de distinto tamaño (harina, finas, intermedias y gruesas)</p> <p>Coque verde: tratado a 600°C</p> <p>Coque calcinado: Tratado a 1400°C</p>	<p>Coque combustible: Cementeras, cerámicas, centrales térmicas, aditivo</p> <p>Coque regular (calcinado): Fabricación ánodos de carbono para industria de aluminio*. (precocidos, Soderberg).</p> <p>Coque de recarburación: Ajuste contenido en carbono del acero, obtención pigmentos.</p> <p>Coque de aguja: Preparación electrodos de grafito, escobillas*.</p> <p>Coque esponja: Industria del Aluminio, producción TiO₂.</p> <p>Coque verde: Precursor de grafito isotrópico**.</p> <p>Formación de composites con carburos metálicos (también coque calcinado)***.</p> <p>*(ver materiales compuestos de refuerzo granular)</p> <p>**(ver grafito autosinterizable)</p> <p>***(ver composites de C con carburos metálicos)</p>	
		Coque regular				Corriente de residuo de vacío (coque calcinado)
		Coque de recarburación				Alimentación muy pura: fracciones pesadas de petróleo (aceites de decantado, fuel oil de pirólisis) sin azufre
		Coque de aguja				Fracciones de alta aromaticidad, sin azufre
		Coque esponja				Residuos parafínicos-nafténicos del petróleo
Fibras de carbono grafitizables	Fibras a partir de brea	Fibras de mesofase de altas prestaciones (grado HP: grafitizadas por tratamiento a T ~3000°C)	G	Fibras sueltas cortas o continuas; fieltros tejidos y sin tejer; preformas 3D. Orientación planos grafiticos radial, concéntrico, aleatorio	Refuerzo (relleno) de materiales compuestos (o híbridos). (ver materiales compuestos de refuerzo fibrilar)	
		Mesofase de brea (ver mesofase)				
	Fibras poliméricas	Fibras de carbono crecidas en fase vapor (VGCF - Fibras Endo). Koyama y Endo. Producidas por Applied Sciences	CH ₄ ó benceno + H ₂ (catalizador = Fe, ferroceno, etc.) a 1100°C. CVD catalítica similar a nanofibras + etapa de engrosamiento	G	Método de catalizador fijo: Diámetro=5-7 µm Longitud=1-10 mm	Refuerzo [relleno (conductor)] de materiales compuestos. Supercondensadores y baterías. (ver composites de VGCF) . Catalizadores y soportes de catalizadores: SCR, electrocatálisis. Adsorción en fase líquida y gas. Desinfección de aguas (virus, bacterias).
			Poliaramida (Nomex y Kevlar)		Método de catalizador flotante: Diámetro=0.1-1.5 µm Longitud<1 mm	
		PPP: Poli(p-fenileno) PBO: Poli(p-fenileno benzobisoxazol) PPTA: Poli(p-fenileno tereftalamida)	G	Fibras sueltas cortas o continuas. Fieltros tejidos sin tejer	Refuerzo (relleno) de materiales compuestos (o híbridos). (ver materiales compuestos de refuerzo fibrilar) Precursores de materiales porosos (catalizadores, soportes de catalizadores, etc.) Materiales aislantes y sellantes para industria automoción, aeroespacial, energía nuclear, electrónica, química y petroquímica.	
	PBT: Poli(butileno tereftalato)					
Hibridación sp²⁻¹						
Estructuras tipo grafino Forma alotrópica (hibridación sp+sp ²)	Grafinos 'graphynes' Grafidinos 'graphdiynes' (Baughman, 1987)	Estructuras hipotéticas, solo sintetizadas como subestructuras orgánicas (Haley, 2007)	-	Estructuras 2D moleculares planas (láminas)	-	
	[C ₆₀] _n (C _m) _{n-1} (Sabirov, 2004)			Cristales de C ₆₀ interconectados con cadenas tipo cumuleno		
Ciclo [n] carbonos (Diederich, 1989)	Anulenos perefinitados. Radialenos. Cumulenos. Complejos con metales de transición, etc.	Catálisis con Pd(0) partiendo de acetileno Intermedios en la formación de C ₆₀	-	Anillos monocíclicos de n carbonos con hibridación sp	Presentan actividad antitumoral	

Producto carbonoso	Grupo de materiales o proceso de fabricación	Precursor	G/NG	Forma	Aplicaciones
Hibridación sp					
Carbinos (Escuela rusa)	Naturales: Chaoita	Colisión de meteoritos con grafito natural	-	Carbón blanco cristalino (más duro que el B ₄ C)	Semiconductores unidimensionales. Precusores de diamante a alta T y P, sin catalizador. Posibilidad de generar filamentos ultra resistentes. Material biocompatible, potencial aplicación en implantes
	Sintéticos: Poliinos (-C≡C-C≡C-)	Poliinos: Deshidropolicondensación oxidativa de acetileno Cumulenos: a) Policondensación de subóxido de carbono (O=C=C=O) con acetiluro de bis(BromoMagnesio) BrMg-C≡C-MgBr b) Deshidrohalogenación de PVDC c) Desfluorinación de PTFE [poli(tetrafluoroetileno)] d) Deshidrogenación de poliacetileno Cristales de Carbinos: a) Vaporización láser de pirografito b) Deposición por vaporización en arco eléctrico de negros de carbono		Partículas cristalinas y amorfas. Las películas se preparan mediante crecimiento cristalino. Existen dos tipos de cristales: a) Alta densidad: Carbinos α (ρ=2.68 g/cm ³) y β (ρ=3.13 g/cm ³) b) Carbolite: Tipo I (empaquetamiento AB) y II (empaquetamiento ABC) de baja densidad (ρ=1.46 g/cm ³)	
	Sintéticos: Cumulenos (=C=C=C=)				

Clasificación de materiales carbonosos porosos

Materiales	Forma, origen, método de síntesis	Aplicaciones
Carbón activado	<p>Polvos, granos (>0.8 mm) y 'pellets'</p> <p><u>Origen mineral:</u> Carbón mineral (bituminoso [Calgon], lignito [Darco], antracita, turba [Norit], etc.), coque de petróleo, brea, etc.</p> <p><u>Origen lignocelulósico:</u> Cáscaras de coco, de arroz, de almendras; huesos de aceituna, de melocotón; algas; serrín, madera, lignina (del procesamiento del papel), etc.</p> <p><u>Otros:</u> Negros de humo, Microesferas de mesofase carbonosa [MCMB, carbón superactivado (M30 de Osaka Gas), hasta 3000 m²/g], carbón vítreo (microesferas) azúcar, melaza, huesos de animales, polímeros, pre-polímeros, residuos (biomasa, plásticos, etc.).</p> <p>(ver materiales carbonosos simples)</p>	<p>Proceso de activación: Física: CO₂, vapor de agua Química: H₃PO₄, ZnCl₂, NaOH, KOH, Na₂CO₃, etc.</p> <p>Fase líquida (80%): -Agua potable (30%) -Aguas municipales e industriales (22%) -Decolorante de azúcar (12%) -Aguas subterráneas (7%) -Minería (5%) -Usos domésticos (5%) -Comida y bebida (4%) -Productos farmacéuticos (4%) -Procesos químicos y otros (11%)</p> <p>Fase gaseosa (20%): -Purificación de aire (29%) -Recuperación de solventes (25%) -Automóvil (20%) -Filtros de cigarrillos y otros (26%)</p> <p>Otros: Catálisis Catalizadores y soportes de catalizadores en fase líquida o gas. Electroquímicas Baterías de Li (p.ej. MCMB) Condensadores de doble capa eléctrica (dispositivos redondos o cilíndricos [diámetro=7-13 mm, altura=25 mm] mantenimiento [back-up] de grandes memorias de ordenadores) Adsorción / separación Tamiz molecular (PSA, TSA [ESA]): Separación de O₂/N₂, CO₂/N₂, CO₂/CH₄, etc. Captura de vapores de gasolina en coches (<i>canisters</i>). Almacenamiento de gases (CH₄, H₂)</p>

Materiales	Forma, origen, método de síntesis			Aplicaciones	
Fibras de carbón activadas	Fibras, telas, filtros (tejidos y sin tejer)			Las mismas aplicaciones de los carbones activos más aquellas aplicaciones donde la resistencia a la difusión sea elevada.	
				Catálisis: Reducción SCR de NO _x (con o sin metales). Adsorción catalítica de SO ₂ .	
				Electrocátalisis	
				Soporte catalítico (Radovic y Reinoso): Hidrogenación (de CO y CO ₂ , de alquenos y alquinos, de aromáticos, síntesis de amoniaco) Hidrogenólisis de alcanos. Hidrodesulfuración (HDS) e hidrodesnitrogenación (HDN) de fracciones de petróleo, etc.	
				Electroquímicas: Condensadores de doble capa eléctrica (filtros de fibras usados en configuración tipo moneda)	
				Adsorción / separación: Adsorción de NO _x por medio de fibras dopadas con Fe. Adsorción de NH ₃ (fibras pretratadas con sales de Mg, Al, Ca, Fe, Zn). Adsorción y recuperación de VOC's. Filtros de cigarrillos. Tamiz molecular (PSA, TSA [ESA]).	
				Almacenamiento de gases. Captura de vapores de gasolina en coches (<i>canisters</i>). Filtrado de aire en equipamientos militares. Separación de C ₆₀ y C ₇₀ Otras: Absorbente de luz, Purificación de aguas (eliminación virus, bacterias)	
Estructuras monolíticas (Burchell, Derbyshire, Kimber, Gadkaree, Pekala, etc.)	Geles de carbono (Patente EEUU Pekala, 1989)	Morfología variada: monolitos, polvos, películas	Tipo de disolvente: acuagel (hidrogel), liogel, alcogel Tipo de secado: xerogel (subcrítico); aerogel (supercrítico); criogel (criogénico)	Carbonización / Activación: control meso-, microporosidad de forma independiente	Las mismas aplicaciones de los carbones activos más aquellas aplicaciones donde la resistencia a la difusión sea elevada. Soporte de catalizadores. Aislante térmico, acústico. Eliminación contaminantes (biomoléculas, virus, bacterias, iones radioactivos, PCBs, VOCs, As, Boro) Almacenamiento de H ₂ Supercondensadores Electrodos y electrocatalizadores Desionización capacitiva (aguas) Electrooxidación (sistemas avanzados de depuración)
	Espumas de carbono (Patente EEUU: Ford, 1960)	Morfología: monolitos, polvos, películas	Técnicas de insuflado en polímeros o resinas. Agentes espumantes: físicos (líquidos bajo punto fusión), químicos (gas formado in-situ), directos (gas inyectado a presión)		Aislamiento térmico (industria aeroespacial) Disipación de calor en microprocesadores, parachoques y placas de absorción de impactos (automoción), convertidores catalíticos, soportes catalizadores, prótesis, electrodos para pilas, etc. (ver materiales simples)
		Morfología: monolitos, polvos, películas	Técnicas de pirólisis: carbones, breas (materia volátil del precursor actúa de agente espumante)		Electroquímicas: Electrodos Li-ión.
	Monolitos, películas	Infiltración del precursor (poliimidas, carbón mineral) en espumas de poliuretano (técnicas de nanomoldeo)	Adsorción / separación: Adsorción de hidrocarburos. Filtro de partículas.		
	Monolitos Cerámicos Recubiertos (Gadkaree-Corning): Monolitos tipo 'honeycomb' (p.ej. cordierita, Corning), recubiertos de resina fenólica o furánica, sacáridos, etc., carbonizados y activados.			Soportes catalizadores, inmovilización enzimas, Adsorción de gases y vapores (VOCs), etc. (ver materiales compuestos cerámico/carbono)	
Monolitos Integrales	Composites de baja densidad de fibras de carbono activadas, CBCF (Univ. Kentucky, ORNL)			Ver materiales compuestos C/C - Composites porosos Catálisis: Catalizadores y soporte de catalizadores. Adsorción: Adsorción de VOC's. Filtro de gases. Almacenamiento de gases (monolitos integrales de alta densidad)	
		Celulares: Un aglomerante carbonoso (resina, etc.) es mezclado con carbón activo antes de la formación (extrusión) del monolito. Curados, carbonizados y activados			
	'Woodceramics' (Tokuda, Okabe, etc): Madera (u otro material leñoso) impregnada con resina fenólica, carbonizada y activada.			Catálisis, adsorción de humedad, tratamiento de aguas, etc.	

Materiales	Forma, origen, método de síntesis	Aplicaciones				
Grafito exfoliado	Ver materiales simples	Gaskets (cintas de aislamiento para uniones, como los rollos de teflón), empaquetamiento y aislamiento; térmico a alta temperatura; limpieza de manchas de petróleo; catálisis				
Grafito intercalado	Con K, K-H, Cs o Rb	Ver materiales compuestos carbono/metal. Almacenamiento de gases y separación isotópica de hidrógeno				
Tamices moleculares	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">Mezclas precursores: brea/carbón</td> <td rowspan="3" style="width: 20%;">Membranas: Películas soportadas en soportes macroporosos (orgánicos o inorgánicos)</td> </tr> <tr> <td>Pirólisis resinas catiónicas</td> </tr> <tr> <td>CVD (C₆H₆, C₂H₂) sobre material poroso</td> </tr> </table>	Mezclas precursores: brea/carbón	Membranas: Películas soportadas en soportes macroporosos (orgánicos o inorgánicos)	Pirólisis resinas catiónicas	CVD (C ₆ H ₆ , C ₂ H ₂) sobre material poroso	<p>Adsorción</p> <p>Procesos de separación: Membranas tipo tapiz molecular: separación de gases permanentes (O₂/N₂, CO₂/N₂, CO₂/CH₄, etc) Membranas de adsorción selectiva: separación de hidrocarburos (iso-butano / n-butano, aire / hidrocarburos, H₂/ hidrocarburos, etc) Aplicaciones biológicas</p>
Mezclas precursores: brea/carbón	Membranas: Películas soportadas en soportes macroporosos (orgánicos o inorgánicos)					
Pirólisis resinas catiónicas						
CVD (C ₆ H ₆ , C ₂ H ₂) sobre material poroso						
Materiales de porosidad controlada (Campo en evolución exponencial)	Reacción halogenación de carburos metálicos M _x C _y (Gogotsi)	Almacenamiento de gases (H ₂ , CH ₄) Electrodos en supercondensadores y baterías ión-Li. Soportes de electrocatalizadores Recubrimientos tribológicos				
	Microporosidad	Carbonización de un precursor de carbono, previamente infiltrado en zeolitas microporosas: Y, ZSM-5, L, β, EMC, (Kyotani, 1997) Precursores de carbono: C ₂ H ₂ , C ₃ H ₈ , resinas, polisacáridos, PAN, etc.	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Técnicas de nanomoldeo (endo-, exomoldeo) 'nanocasting'</p> Adsorción moléculas de gran tamaño (biomoléculas, antibióticos, enzima, proteínas). Soportes de catalizadores y electrocatalizadores. Inmovilización de enzimas. Sensores químicos, bioquímicos. Procesos de separación/adsorción de gases. Cápsulas y materiales encapsulados para procesos avanzados de purificación de aguas, catálisis, etc. Electrodos en supercondensadores. Membranas.			
	Mesoporosidad	Carbonización de precursor de carbono infiltrado en sílices mesoestructuradas tipo: SBA, HSM, MSU, MCM (carbonos CMK-n) (Knox, 1986; Ryoo, 1999), o xerogeles de sílice de mesoporosidad desordenada a partir de silicato de sodio (Fuentes, 2004). La adición de catalizadores metálicos (Fe, Co, Ni, Mn, etc.) durante la síntesis permite obtener a baja temperatura (<1000°C) materiales porosos de carácter grafitico (p.ej. soportes de electrocatalizadores), (Sevilla, 2006). Precursores de carbono: alcohol furfurílico, sacarosa, resina fenólica, etc. Carbonización del precursor de carbono en presencia de nanopartículas esféricas de sílice (Hyeon, 1999) usadas como molde 'mesocellular foams' Carbonización de nanocomposites orgánicos (Tanaka, 2005) Polimerización de geles orgánicos (ver geles de carbono) Activación catalítica en presencia de complejos orgánicos de tierras raras (Sm, Y, Yb, Lu).				
	Macroporosidad	Estructuras tipo ópalo invertido (Nakanishi, 2004) Estructuras tipo diatomea (Cai, 2006)				
		Especulativas (preparación de cristales fotónicos) Especulativas. Potencial aplicación en sistemas dinámicos (cinéticas, transporte), adsorción de moléculas de gran tamaño, soportes de catalizadores				

Clasificación de materiales carbonosos compuestos

I) CARBONO/CARBONO

Producto	Componente de carbono matriz		Componente de carbono de relleno	Forma y características	Aplicaciones						
Materiales compuestos de refuerzo granular <i>(todas las aglomerantes se pueden usar con todos los rellenos)</i>	Aglomerante	Brea (ver materiales simples). También usada en la fase de densificación (impregnación). El aglomerante más común es la brea de alquitrán de hulla	Relleno (ver materiales simples)	Coque de petróleo (relleno más común)	Piezas de muy diversas formas y tamaños preparadas por: a) extrusión (grafito anisótropo), moldeo por compresión (grafito anisótropo) o compresión isostática (grafito isotrópico) b) ciclos de carbonización y densificación (impregnación) con brea c) Grafitización (en ciertos casos) -electrografito- Los composites de espumas se preparan por impregnación con brea	Metales y semiconductores: Fabricación de ánodos para producción de aluminio (60%) y electrodos para producción de acero (32%). El 8% restante para el resto de aplicaciones. Crisoles y botes para fundido de metales y epitaxia (semiconductores). Moldes para extrusión de metales. Eléctricas: Escobillas eléctricas. Uniones eléctricas en trenes y tranvías. Elementos calefactores. Electrodos en pilas de combustible. Ánodos y cátodos en baterías eléctricas. Mecánicas: Lubricantes. Anillos de sellado. Bocas de cohete. Escudos térmicos. Químicas: Reactores. Intercambiadores de calor. Inyectores de vapor. Equipamiento para CVD. Nucleares: Moderadores y elementos de control (absorción de neutrones).					
				Coque de extractos de carbón (coque calcinado)							
				Grafitos sintéticos reciclados							
				Negros de carbón							
				Grafito natural							
		Espumas de carbón tipo vidrio (aislante térmico)									
Resina fenólica (ver compuestos carbono / polímero)		Espumas de brea o mesofase (conductor térmico)									
Materiales compuestos de refuerzo fibrilar Composites de fibras de carbono de alta densidad (C/C)	Matriz (e impregnación no CVI)	Brea (ver materiales simples)	Refuerzo (ver mat. simples)	Fibras PAN (alta resistencia)	Refuerzo: Fieltro (rayón), Fibras cortas [chopped = 'injection molding' (<i>moldeo por inyección</i>)], Fibras continuas [1,2,3 direccionales = <i>impregnación</i> o 'filament winding' (<i>bobinado</i>)].	Frenos de aviones (aplicación mayoritaria). Piezas estructurales de alta temperatura de vehículos hipersónicos. Conos y escudos térmicos de reentrada de vehículos espaciales (con SiC contra oxidación). Pistones en motores de combustión interna. Elementos calefactores (hasta 2000°C). Conexiones de electrodos de arco eléctrico. Moldes para tratamiento de metales (Ti)					
		Resina fenólica		Fibras de mesofase de brea (alto módulo = rigidez)							
	CVI	CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₆		Fibras isotropas de brea ('general purpose')			Fibras de rayón				
Composites porosos -Monolitos integrales (celulares y de alta densidad) -Composites de fibras de carbono de baja densidad (CBCF)	Monolitos integrales	Aglomerante	Relleno	Carbón activo	Monolitos celulares (honeycomb) y discos: preparados por extrusión, curado, carbonización y activación. De alta densidad aparente (0.4-1 g/cm ³): cilindros y otras 3D	Soporte de catalizadores (SCR, electrocatálisis, etc.): Ej. Hidrogenación selectiva de cinamaldehído (Theo Vergunst) Adsorbente (canisters) Filtro de gases (máscaras antiguas)					
				PVC, polivinilmetileter, brea de alquitrán de hulla, resina de alcohol polifurfurílico y resina fenólica			Carbón activo (activación química). Fibras de carbono activadas				
				CBCF			Aglomerante	Fibras	Fibras PAN	CBCF: Monolitos de baja densidad preparados vía dispersión en agua o en seco (fibras Nomex)	Aislante térmico. Adsorbente de luz. Tamiz molecular (PSA, TSA [ESA]). Adsorción en fase líquida y gaseosa (almacenamiento de gases, filtrado de aire en equipamientos militares). Catalizador y soporte de catalizadores, etc.
									Fibras de rayón		
	Fibras isotropas de brea (Carboflex)	Fibras de mesofase de brea									
	Resina termoestable	Fibras de aramida (Nomex y sus rechazos)									
	Composites de VGCF (Applied Sciences) [tratados a 3000°C]	Preform.	Alcohol polifurfurílico	Refuerzo	VGCF catalizador fijo (ver materiales simples)	Composites de alta densidad y distinta orientación de fibras (1D, 2D, isotropa)	Catalizador fijo: Sumideros de calor en equipamiento electrónico. Componentes en contacto con plasma (fusión). Radiadores. Catalizador flotante: Frenos (composites isotropos que disipan el calor en todas las direcciones). Baterías Li-ión (alta relación superficie / volumen). Refuerzo de componentes del automóvil.				
		Matriz	Impregnación		Brea (ver materiales simples)			VGCF catalizador flotante (ver materiales simples)			
CVI			CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₆								
'Peapods'	Fullerenos encapsulados en el interior de nanotubos				Especulativas						

II) COMPUESTOS DE INTERCALACIÓN

Preparación:

a) Sin contacto ('two-bulb')

b) En contacto (Mezcla con el intercalado sólido, disuelto, fundido, en aleación o en sal fundida). Procesos térmicos, químicos o electroquímicos.

Producto	Componente de carbono		Otro componente		Forma y características	Aplicaciones
Covalentes	Intercalante	Grafito sintético	Intercalador	F [(CF) _n], O(OH) [óxido de grafito, C ₄ O(OH)]	Teflón (PTFE). Rollos de lubricante sólido. Partículas, etc.	Lubricante sólido (teflón) Electrodos de baterías primarias (cátodo = fluoruro de grafito)
Iónicos	Intercalante	Grafito	Intercalador	Tipo Donor		Grafito deslaminado o exfoliado (ver materiales simples)
				K-THF, Na-THF	Calentamiento rápido para producir deslaminación	
				K, K-H, Cs, Rb	Adsorbentes	
		Li, K, K-Hg,		Catalizadores	Síntesis orgánica, polimerización de hidrocarburos	
		Li				
		H ₂ SO ₄ , Ni(OH) ₂ , Mn(OH) ₂		LiC ₆ (región 1), LiC ₂ (región 2)	Electrodos de baterías secundarias ó baterías Li-ión	
	Grafito	Tipo Aceptor		Grafito deslaminado o exfoliado (ver materiales simples)		
		H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , FeCl ₃	Calentamiento rápido para producir deslaminación			
		SbF ₅ , Br ₂ , H ₂ SO ₄ , HNO ₃	Catalizadores		Síntesis orgánica	
		AsF ₅ , SbF ₅ , HNO ₃ , CuCl ₂ , FeCl ₃ , F ₂ , Br ₂	Materiales fibrosos		Materiales altamente conductores de la electricidad	
	Materiales generalmente grafiticos					

III) CARBONO/METAL

Producto	Componente de carbono		Otro componente		Forma y características	Aplicaciones
Composites de fibras de carbono con matriz metálica	Refuerzo	Fibras grafiticas (brea, VGCF, etc)	Matriz	Cu, Al (Osaka), Ni, Mg (se pueden recubrir las fibras con Ti, B, etc, para protegerlas de la difusión de metal de la matriz en el interior de la fibra)	Generalmente unidireccionales. Fabricación: a) electro-deposición b) Prensado en caliente c) Infiltración del metal fundido	Pistones y otras partes de motores de combustión interna (Osaka). Materiales con alta conductividad térmica y rigidez (Aplicaciones potenciales: dispersión de calor en sistemas nucleares, componentes de cohetes, intercambiadores de calor en vehículos supersónicos, sumideros de calor en sistemas electrónicos empaquetados [ordenadores])
Metalocarbohedrenos (Met-cars) (Castleman, 1992)	Vaporización láser de un cilindro del metal, que forma un plasma en un gas inerte pobre en metano o acetileno (1%).		Metales: Ti, V, Zr, Hf, Cr, Mo, etc.		I) Estructuras catiónicas (y neutras) con estructura de dodecaedro pentagonal (múltiples celdas conectadas) tipo M ₈ C ₁₂ ⁺	Aplicaciones especulativas

Producto	Componente de carbono	Otro componente	Forma y características	Aplicaciones
Nano-cápsulas rellenas	Fabricación por arco eléctrico o vaporización láser como los fullerenos (atmósfera He). El electrodo o blanco ('target') de grafito se fabrica con una mezcla de carbono e Ytrio o tierras raras.	Metales: Y, tierras raras	Nanopartículas YC_2 (30-70 nm). Estructura: capas grafiticas de estructura turbostrática que forman una cápsula que encierra en parte cristales de YC_2 , y en parte vacío.	Aplicaciones especulativas
	Carbono poroso generado por métodos de endo- o exo-moldeo.	NiO , Fe_xO_y , Cr_2O_3 , $LiCoPO_4$, $CoFe_2O_4$, etc.	Metal encapsulado en el interior de estructuras mesocelulares. Pueden presentar propiedades magnéticas para favorecer la recuperación del material.	Aplicaciones en catálisis, liberación de fármacos, inmovilización de enzimas, purificación de aguas, etc.
Metallo-fullerenos	'Endohedral fullerenes' Vaporización láser de electrodo de grafito impregnado con metales	Metales de impregnación: tierras raras, metales de transición, alcalinos (Sc, Y, La, Ce, etc.)	Clústeres con metal encapsulado en el interior del fullereno	Aplicaciones especulativas en medicina terapéutica
	'Exohedral fullerenes'	Metales de impregnación: tierras raras, metales de transición (Sc), alcalinos (Cs), y otros compuestos organometálicos	Clústeres con metal situado en el exterior (enlace)	Potencial aplicación en almacenamiento de H_2 avalados por resultados de simulación ($C_{60}[ScH_2(H_2)_4]_{12}$) [Zhao, 2005]
Composites de carbono con carburos metálicos	Coque calcinado (ver materiales simples)	B_4C , SiC , TiC , ZrC ,	Mezcla de coque (~50 μm) con el carburo (1-2 μm). 'Hot-pressing' de la mezcla (30 MPa, 2100°C)	Composites resistentes a la oxidación con aire (800°C), con ácido sulfúrico y nítrico, y al ataque de metales fundidos (Al, Cu)
	Coque verde (ver materiales simples)		Molienda de coque verde y carburo a 1-5 μm . Sinterización a $T \sim 1000-2400^\circ C$ y P atmosférica	Preparación de materiales anti-oxidación y anti-corrosión con grandes tamaños y formas complejas
	Preformas de fibras de carbono, grafito isotropo	Carburos de Ti, Zr, etc.	Preformas 1D, 2D, 3D	Potencial aplicación en pared primaria reactor de energía nuclear de fusión (proyecto ITER)
Grafito/metal	Recubrimiento de grafito, carbono pirolítico	Ni, Cu, SnO_2 , Si, MgO	Láminas, recubrimientos	Baterías primarias; baterías de ión-Li de nueva generación Refractarios

IV) CARBONO/CERÁMICO

Producto	Componente de carbono	Otro componente	Forma y características	Aplicaciones
Cemento reforzado con fibras de carbono (CFRC)	Refuerzo Fibras de carbono de grado GP (PAN, brea, papel ['mats'])	Matriz Mortero de grano fino ('thin mortar plate'). Cemento Portland. Cemento de alúmina.	El refuerzo puede ser isotropo (fibras cortadas), 2D, 3D (fibras continuas), o láminas de papel de fibras. Se puede preparar en el sitio de construcción.	Cemento altamente resistente de baja densidad usado en construcción de edificios [alta estabilidad química, atenuante de ruidos, escudo electromagnético (en edificios inteligentes, para proteger el funcionamiento de ordenadores de la radiación exterior)].
Monolitos recubiertos cerámico/carbóno	Precurzor de carbon Sacáridos, resinas fenólicas y furánicas, etc. (impregnación, carbonización y activación)	Soporte Monolito cerámico tipo honeycomb (cordierita, corning)	Monolitos recubiertos	Soportes catalizadores, inmovilización enzimas, Adsorción de gases y vapores (VOCs), etc. (ver materiales porosos: estructuras monolíticas)
Cerámicos reforzados con fibras de carbono (CFRCer)	Refuerzo Fibras de carbono (PAN, brea), ó nanotubos de carbono	Matriz Si_3N_4 , SiC , B_4C (los óxidos como Al_2O_3 atacan la fibra y no son aplicables)	Composites preparados por CVI. Importante la compatibilidad química de matriz y fibras	Evitan la rotura catastrófica típica de los materiales cerámicos (materiales quebradizos). Aplicaciones potenciales.
Materiales carbonosos recubiertos de películas cerámicas	Materiales carbonosos para aplicaciones de alta temperatura (fibras, grafito, carbón vítreo)	Recubrimiento B_2O_3 $B_2O_3 + SiO_2$ SiC $SiC + zircona (ZrSiO_4)$, $SiC + mullita (3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2)$	Preparación: a) CVD b) Impregnación c) 'Dip-coating'	Recubrimientos para potenciar la resistencia química (p.ej. oxidación) del material carbonoso

V) CARBONO/POLÍMERO

Producto	Componente de carbono	Otro componente	Forma y características	Aplicaciones								
Plásticos reforzados con fibras de carbono (CFRP)	Refuerzo (ver materiales simples)	Fibras PAN (alta resistencia)	Matriz	<p>Resinas termoestables</p> <p>Epoxi (Bisfenol A epoxi; TetraGlicidil Metileno DiAnilina [TGMDA])</p> <p>Fenólica (PF) de catálisis ácida (Novolak + hexamina)</p> <p>Fenólica (PF) de catálisis básica (Resol)</p> <p>Poliimididas termoestables (de adición [API = p.ej. Bismaleimididas BMI {poliimida tipo epoxi}] y de condensación [CPI])</p> <p>Esteres de cianato</p> <p>Resinas termoplásticas</p> <p>Éteres poliariólicos (PEK, PEEK)</p> <p>Poliimididas termoplásticas (LARC-TPI; NR-150-B2; Polietirimida; Poliimida 2080; Amida Imida)</p> <p>Sulfuro de Polifenileno (PPS)</p> <p>Polietileno</p> <p>Moléculas ordenadas</p> <p>Nomex, Kevlar (enlaces amida). Polímeros que forman líquidos cristalinos</p> <p>Xydar, Vectra (enlaces éster)</p> <p>Polibencimidazol (PBI)</p>	<p>Composites con distinta orientación de las fibras: continuas (1D, 2D, 3D), cortadas (isótropos).</p> <p>Temperaturas de operación: Epoxis (<150°C), BMI (205-245°C), Poliimididas (260-315°C), PBI (315-370°C)</p>	<p>Aeroespacial (~70%): Estructura primaria de aviones (alas, fuselaje, superficies de control, estabilizadores verticales [A310 Airbus, Boeing 777]). Cuerpos de satélites. Brazo de la lanzadera espacial. Cuerpo de paneles solares de satélites. Antenas espaciales y reflectores, etc.</p> <p>Material deportivo (~20%): Raquetas de tenis y bádminton, palos de golf, cañas de pescar, esquís, partes de veleros.</p> <p>Automóviles: Ejes, ruedas, partes del motor.</p> <p>Industria: Robots, plantas químicas, instrumentación médica, cuchillas rotatorias</p> <p>Electricidad y calor: Disipadores electrostáticos y de calor (VGCF+polietileno)</p> <p>Refuerzo estructural: En láminas pueden ser usados para recubrir (y así reforzar) elementos estructurales deteriorados, como pilares de puentes o vigas.</p>						
		Fibras de mesofase de brea (alto módulo = rigidez)										
		Fibras de poliaramida (Kevlar)										
		Fibras PBO										
		Fibras de rayón										
		Fibras isotropas de brea										
		VGCF										
		Plásticos reforzados con espumas de carbón					Refuerzo	Espumas de carbón tipo vidrio (aislante térmico)	Matriz	Mismos materiales que CFRP	Los composites de espumas se preparan por impregnación	Materiales estructurales con aplicaciones similares a los plásticos reforzados con fibras
								Espumas de brea o mesofase (conductor térmico)				
		Plásticos reforzados con nanotubos					Refuerzo	Nanotubos de carbono	Matriz	Polímeros de tipo polietileno	Láminas flexibles. Estudiados en el Trinity College (Irlanda, 2001)	Trajes espaciales de los astronautas
Nafión / C₆₀		Fullerenos (C ₆₀) como aditivos de membranas poliméricas de conductividad de potones tipo Nafión			Membranas	Pilas de combustible de membrana polimérica						
Polímeros / C₆₀		Fullerenos (C ₆₀) funcionalizados con polímeros orgánicos			Estructuras flexibles y ligeras	Diseño de celdas fotovoltaicas híbridas con mayor eficiencia (grupo de investigación de Nazario Martín, 2006)						