Jornadas divulgativas del vidrio- UCM
3 Noviembre 2022

La investigación más actual en el campo del vidrio

María Jesús Pascual
Instituto de Cerámica y Vidrio (CSIC), Madrid, Spain

CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Instituto de Cerámica y Vidrio

Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV)

(www.icv.csic.es)

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Departamento de Vidrios

Campus de la Universidad Autónoma de Madrid,

Cantoblanco, 28049 Madrid, Spain

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
AGENCIA ESTATAL DE INVESTIGACIÓN
CSIC

Grupo de Investigación GlaSS:

Vidrios, vitrocerámicos y materiales sol-gel para una sociedad sostenible

http://glass.icv.csic.es/

GlaSS

Glasses, Glass-ceramics and Sol-gel materials for a Sustainable Society

Integrantes: 6 Investigadores plantilla, 7 Investigadores no plantilla, 3 Técnicos

Líneas de Investigación:

- **Vidrios y vitrocerámicos producidos por fusión**
- Materiales Sol-gel para la energía y el medio ambiente

El vidrio está en todas partes

• El vidrio es uno de los materiales de uso más extendido y se encuentra en todas partes a nuestro alrededor en nuestra vida diaria

• Debido a su versatilidad, el vidrio ha encontrado numerosas aplicaciones- muchas de ellas son muy "visibles", y también algunas veces en "lugares inesperados"- aproximadamente **se producen cada año, 100 millones de toneladas de vidrio**

• El hombre ha fabricado y utilizado el vidrio desde hace más de tres mil años y sigue desarrollando más y más aplicaciones para este material

Ejemplo de artículos de vidrio antiguos
Fuente: http://www.metmuseum.org

Garland bowl, late 1st century b.c

Conical bowl, 2nd–1st century b.c

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Arte

www.venicelimousinerent.com

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Botellas y tarros- todas las formas, tamaños y colores

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

En la mesa

http://mocoloco.com

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

En la cocina

Schott

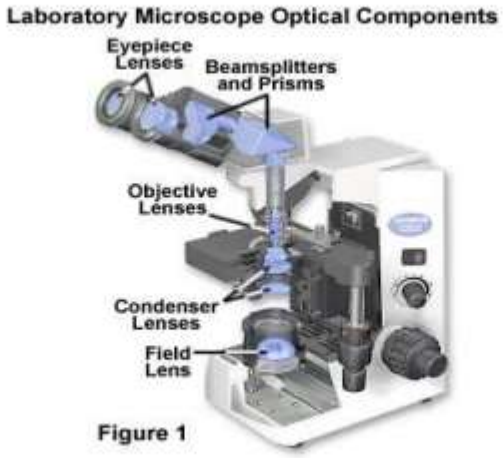
Source: www.dailymail.co.uk

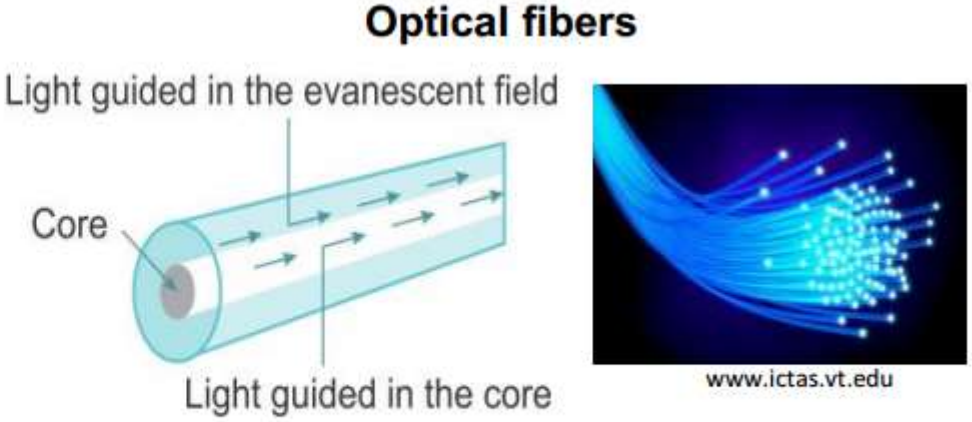
El vidrio está en todas partes- Ejemplos

En el laboratorio

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

En óptica





Multiple Mirror Telescope, Arizona

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Edificios- antiguos y modernos

Shanghai World Financial Center

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Todo tipo de transporte

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

En arquitectura moderna

Apple Store New York

Observation deck – Willis Tower Chicago

Tianmen mountain, China

Grand Canyon Skywalk

Credit: 360 Chicago

http://i.dailymail.co.uk

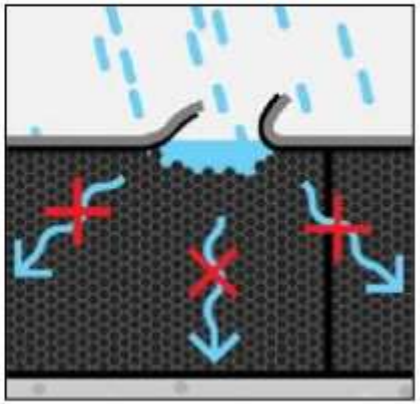
El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Edificios- Aislamiento

Glasswool

Isover – Saint-Gobain

Foamglas®



http://www.actu-environnement.com/

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

- ***Paneles solares, plantas de energía solar…***

http://www.fm.colostate.edu/

P10 Solar power plant, Andalucia, Spanje

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Todo tipo de pantallas

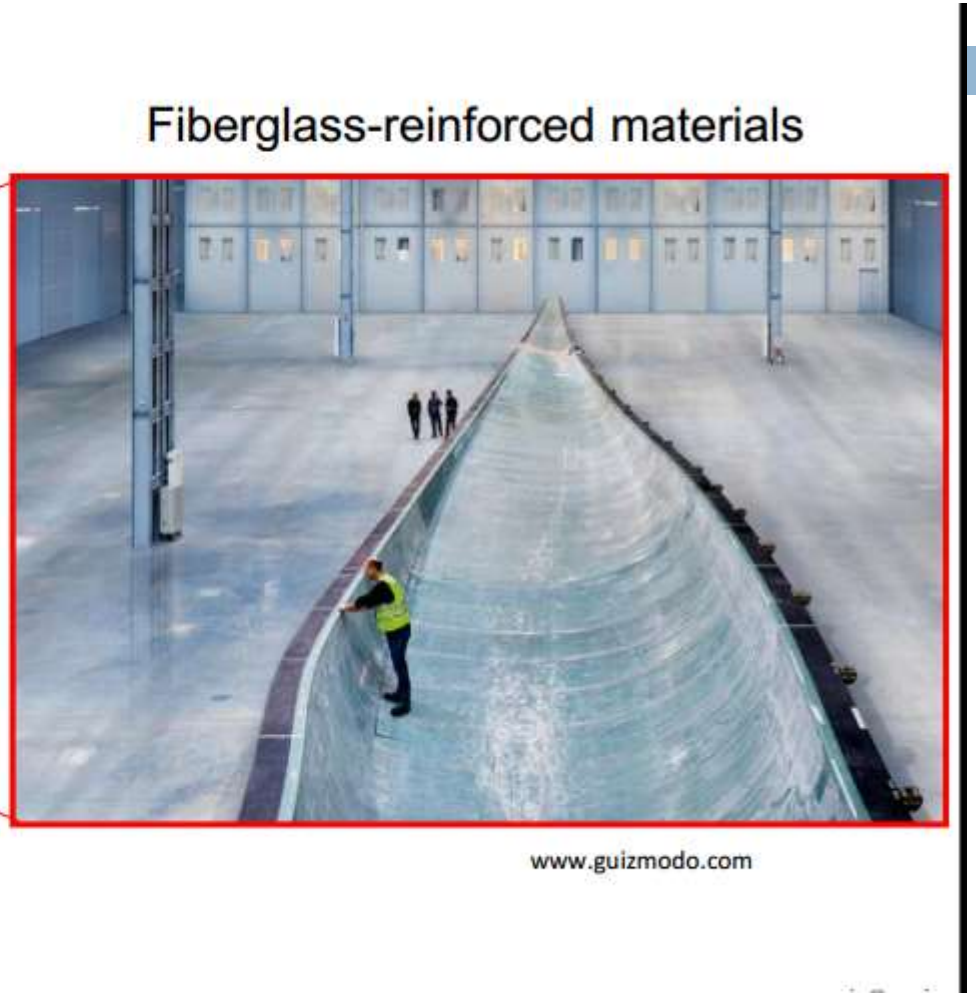
http://www.geekalerts.com

Corning Gorilla® glass

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Material de refuerzo

Souce: wikipedia



El vidrio está en todas partes- Ejemplos

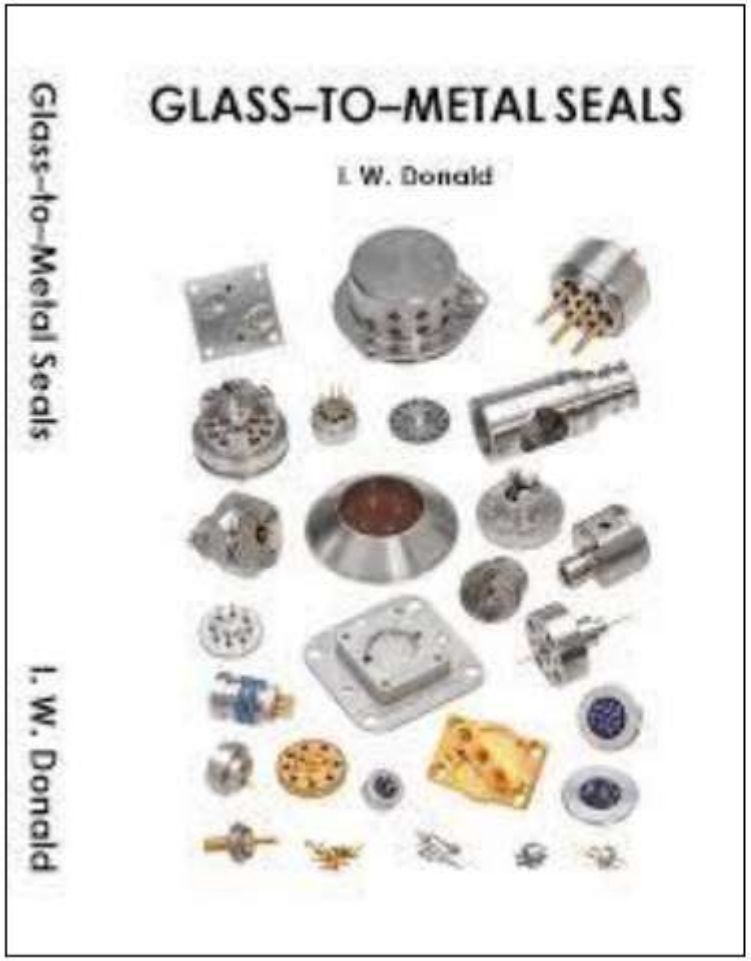
Material de refuerzo

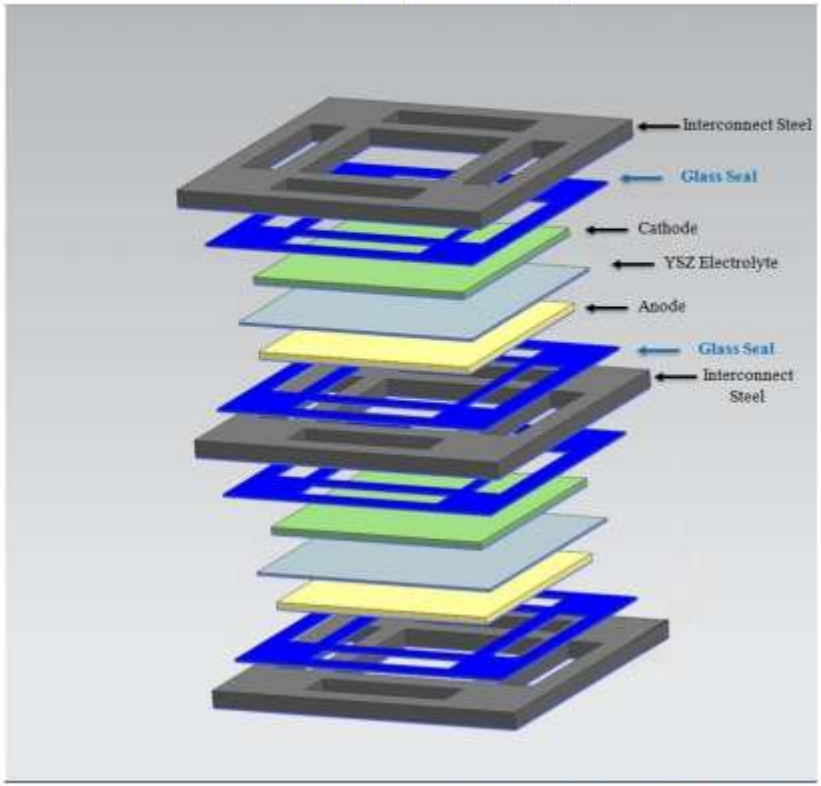
- Carcasas de barco, tablas de surf, kayaks…
- Coches deportivos
- Bicicletas de alta gama
- Antenas, radares
- Tanques, recipientes
- Circuitos impresos
- Molinos de viento
- Cascos y equipos de protección
- Escayola ortopédica
- …

Souce: wikipedia

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Electrónica- Sellos vidrio-metal



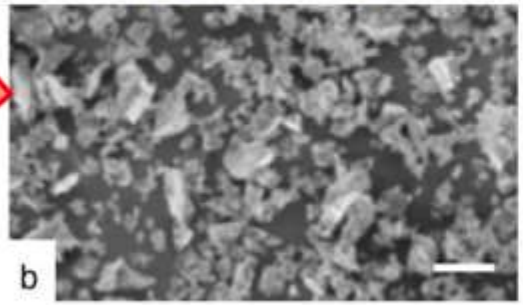


El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Aplicaciones dentales

Bioactive glass in toothpaste*

Novamin® glass pieces*



*J. Jones, Review of bioactive glass: From Hench to hybrids, Acta Biomaterialia 9 (2013) 4457–4486

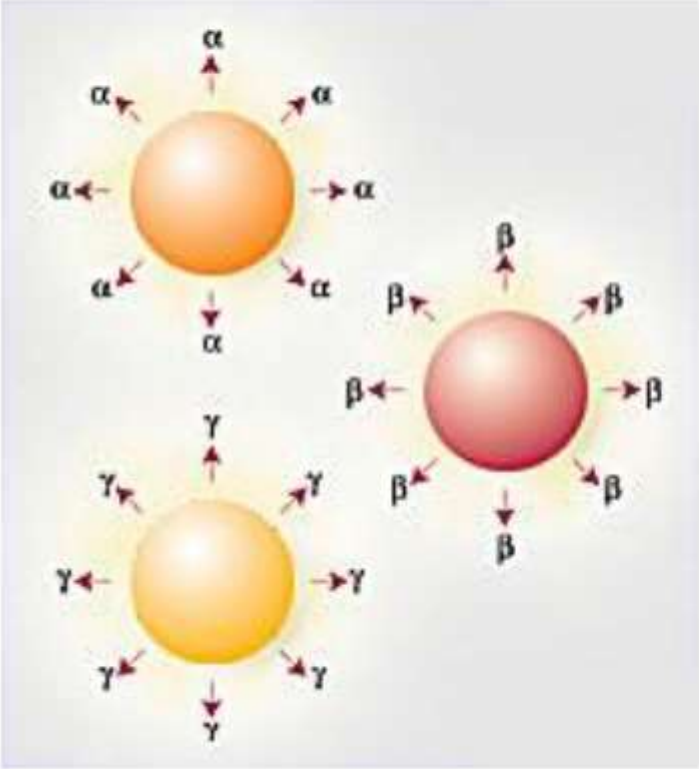
Glass-Ceramics

L. Hench et al., Glass and Medicine, International Journal of Applied Glass Science 1 [1] 104–117 (2010)

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

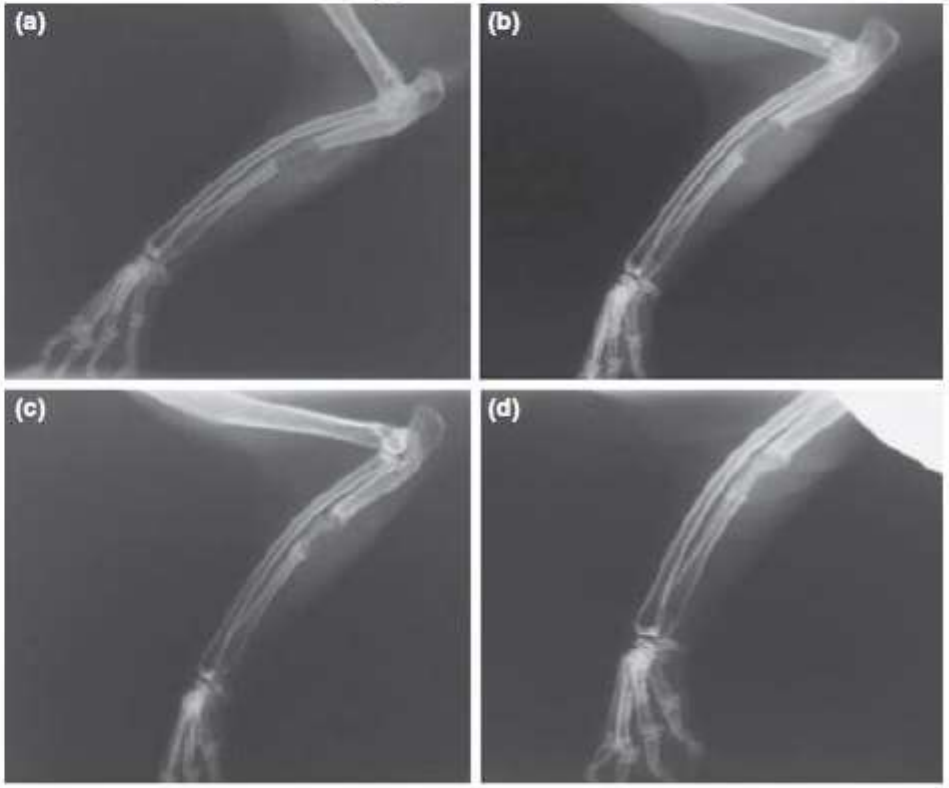
Aplicaciones médicas

Radioactive microspheres



Source: Mo-Sci Health Care

Scaffold for bone or tissue regeneration



M. Erol-Taygun et al., Nanoscale Bioactive Glasses in Medical Applications, International Journal of Applied Glass Science 4 [2] 136–148 (2013)

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Pero también…

Glass beads for water purification

SiLibeads®

Bioactive glasses in cosmetic products

Source: Schott

Glass for night-vision enhancement (chalcogenide infrared-transparent glasses)

Source: photonics.com

El vidrio está en todas partes- Ejemplos

Y mucho más…

Más ejemplos de dónde y cómo se usa el vidrio y sobre el futuro del vidrio puede encontrarse por ejemplo en:

- El Vidrio. Jose María Fernández Navarro. CSIC

- The International Materials Institute for New Functionality in Glass (**IMI-NFG**) - Lehigh University- IMI-NFG technical library

- Corning videos "A day made of glass"

- Diversas revistas científicas sobre vidrio (JACerS, IJAGS, JNCS, JECS…)

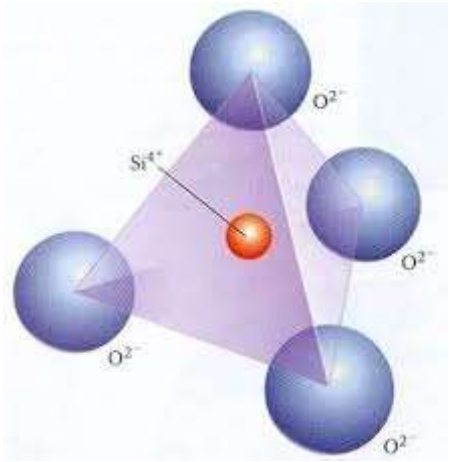
- ICG Roadmaps of glass R&D "Making glass better"

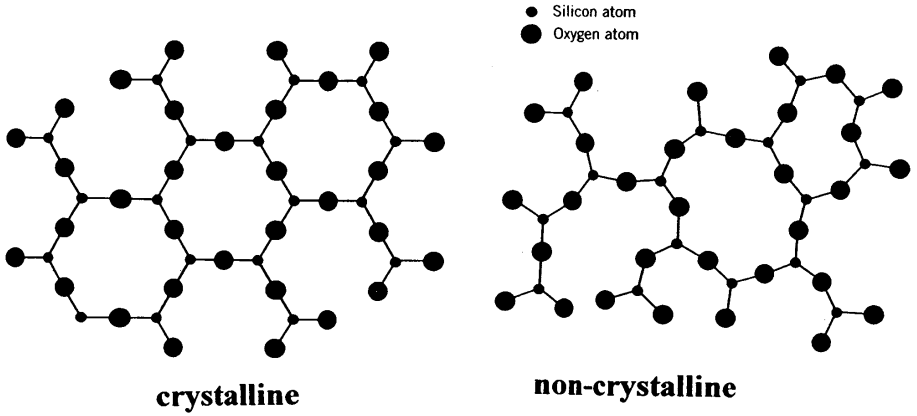
- ICG | International Comission on Glass (https://icglass.org)

- International Year Of Glass 2022 (https://iyog2022.org)

¿Qué es el vidrio?

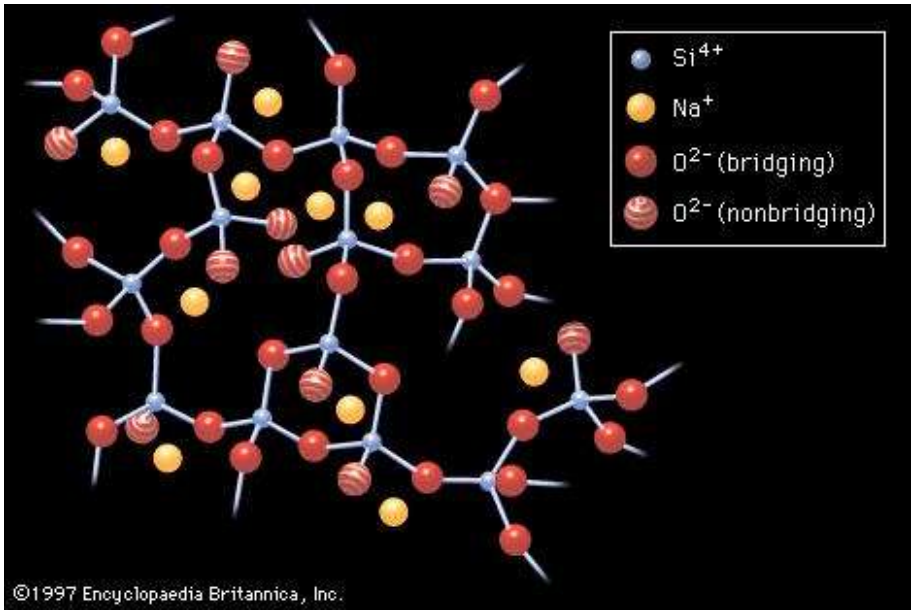
- El vidrio no es una composición única sino un estado de la materia, un subgrupo del estado sólido.
- Un vidrio es una red de átomos (más comúnmente de silicio) unidos unos con otros a través de enlaces covalentes con átomos de oxígeno.
- Un vidrio basado en sílice está formado de tetraedros de sílice unidos en un ordenamiento al azar. Orden a corto alcance.
- El vidrio de ventana se basa normalmente en el sistema sodocálcico (Na_2O-CaO-SiO_2). Los vidrios bioactivos, por ejemplo, tienen también estos componentes, pero en diferentes proporciones que los vidrios inertes.



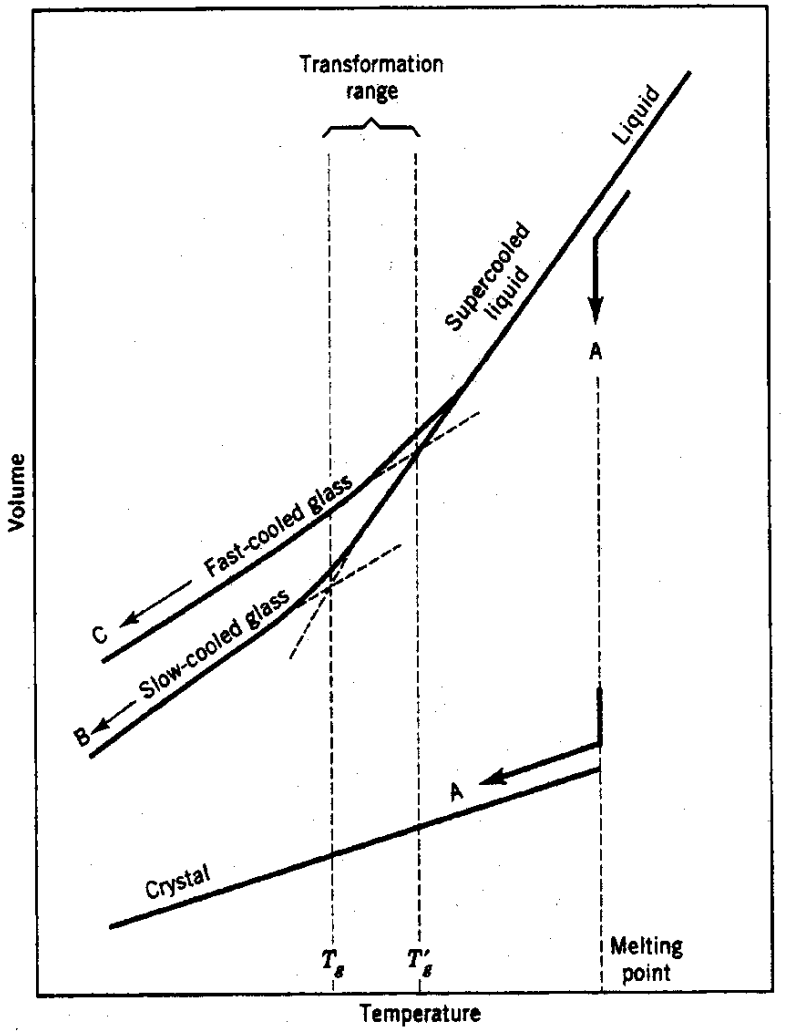


¿Qué es el vidrio?

- En los vidrios basados en sílice, los tetraedros de SiO_4 están conectados en los vértices en varias orientaciones para formar una red continua en 3D. Cada átomo de oxígeno puede actuar como un puente entre tetraedros vecinos. La configuración local alrededor de cada átomo de silicio está expresada con la notación Q_n, donde n es el número de puentes de oxígeno (BO) que va desde 0 to 4. El rol de los óxidos alcalinos y alcalinotérreos es modificar la estructura de la red, es decir estos óxidos reducen el grado de conectividad en la red reemplazando BO por oxígenos no puente (NBO), abriendo, por tanto, la estructura del vidrio. La fortaleza de los enlaces individuales oxígeno-ión modificador junto con el número de NBOs determina varias propiedades del vidrio, tales como viscosidad y durabilidad química.



Qué es el vidrio?



Definición operacional (ASTM)

- Un vidrio es un producto inorgánico de fusión el cual ha sido enfriado y convertido en un sólido rígido sin cristalizar

Definición estructural

- Un vidrio es un sólido no-cristalino

Definición estructural + estabilidad interna

Un vidrio es un sólido no cristalino que presenta el fenómeno de transición vítrea. El estado físico se denomina **estado vítreo**.

T_g **: temperatura de transición vítrea,** $\eta(T_g) \sim 10^{13}$ dPa.s

Clasificación de los vidrios

Vidrios naturales

- ✓Rocas eruptivas: obsidianas
- ✓Fusión por ondas de choque (meteoritos): tectitas

Vidrios artificiales

- ✓ Vidrios de óxido
- ✓ Vidrios de halogenuros
- ✓ Vidrios de calcogenuros
- ✓ Vidrios metálicos

Clasificación de los vidrios

- ✓ Vidrios de óxido
  - vidrios de un formador
  - vidrios de varios formadores
  - vidrios formador-modificador

- ✓ Vidrios de halogenuros
  - vidrios de BeF_2
  - vidrios de fluoruros pesados (ZrF_4, BaF_2-RFn)

- ✓ Vidrios de calcogenuros
  - vidrios de elementos del grupo VI + V y IV
    (S, Se, Te) + (P, As), (Si, Ge)

- ✓ Vidrios metálicos
  - aleaciones metal-metaloide
    $(Au, Pd, Pt, Fe, Ni)_{80}$ + $(Si, Ge, P, C, B)_{20}$
  - aleaciones metal-metal
    ($Mg_{65}Cu_{35}$, $Ni_{60}Nb_{40}$, $Zr_{72}Co_{28}$)

Vidrios de óxido

- Vidrios de un formador

SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, GeO_2

- Vidrios de varios formadores

SiO_2 - B_2O_3, SiO_2 - GeO_2

- Vidrios formador-modificador

Silicatos (SiO_2-CaO-Na_2O)

Boratos (B_2O_3-R_2O, B_2O_3-RO)

Borosilicatos (B_2O_3-SiO_2-Na_2O)

Boroaluminatos (B_2O_3-CaO-Al_2O_3)

Fosfatos (P_2O_5-RO-R_2O)

Germanatos

Vanadatos

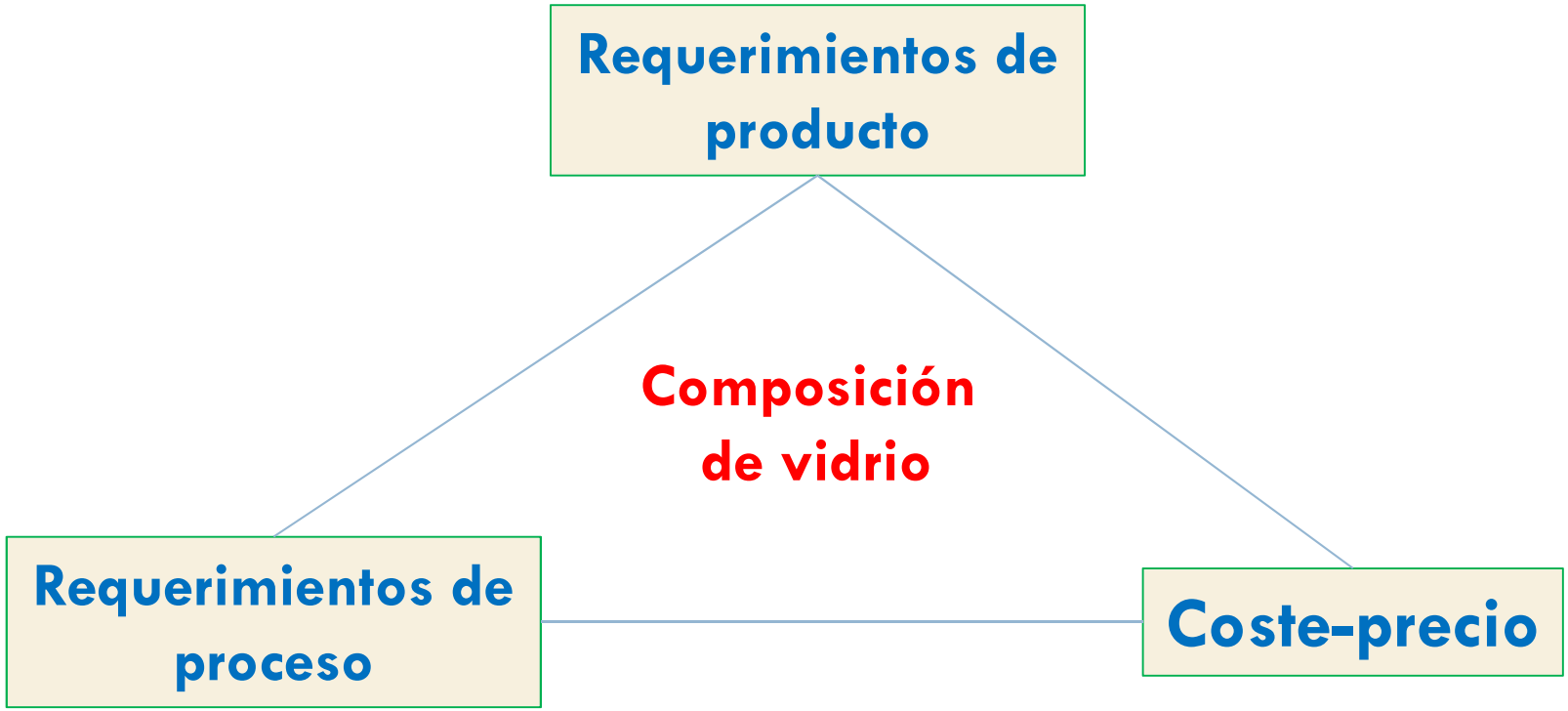
Teluritos, aluminatos

Las propiedades de los vidrios inorgánicos

- Isotropía
- Transparente, opaco, incoloro, coloreado. Propiedades ópticas
- Índice de refracción: 1.2-2.2
- Homogeneo
- Propiedades de solvente
- Continuo ajuste de las propiedades
- T_g: 150 - 1200ºC
- Trabajabilidad. Versatilidad
- Durabilidad. Resistencia química (puede variar desde resistencia a los ácidos hasta soluble en H_2O)
- Estanqueidad
- Comportamiento eléctrico desde aislante a semiconductor, σ (T_{amb}: 10^{-6}-10^{-18} $(ohm.cm)^{-1}$)
- Frágil (K_{IC}<1 $MPa.m^{1/2}$) fractura concoidal, pero duro (3-15 GPa) y resistente
- Resistente al calor
- Baja conductividad térmica k≤ 1W/m.K
- Reciclable

Metaestable! Tiende a desvitrificar cuando se le enfría lentamente o se calienta
El vidrio se puede diseñar microestructuralmente a partir de
Separación de fases líquido-líquido, desvitrificación, cristalización

¿Cómo elijo mi composición de vidrio?



Principales tipos de vidrios comerciales (1/2)

Grupo principal	Aplicación	Características
Vidrio sodocálcico ($Na_2O{\cdot}CaO{\cdot}SiO_2$)	-Vidrio plano -Vidrio para envases -Vidrio de mesa -Vidrio para iluminación (lámparas) -Lentes	- Producción masiva - Bajo coste
Borosilicato sódico ($Na_2O{\cdot}B_2O_3{\cdot}SiO_2$)	-Vidrio de laboratorio (ej: Pyrex® o Duran®) - Utensilios para cocinar - Faros	- Resistencia al choque térmico
Vidrio E ($CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}B_2O_3{\cdot}SiO_2$) *Algunas veces sin B_2O_3 Otros componentes: MgO, TiO_2	- Fibra textil de vidrio - Fibras de refuerzo para plásticos - Fibras para placas de circuitos impresos	-Resistencia mecánica - Baja conductividad eléctrica - Fibrabilidad
Vidrio A ($Na_2O{\cdot}CaO{\cdot}B_2O_3{\cdot}SiO_2$)	- Lana de vidrio (aislamiento) - Fibra de vidrio (refuerzo)	-Fibrabilidad -Bajo coste

Principales tipos de vidrios comerciales (2/2)

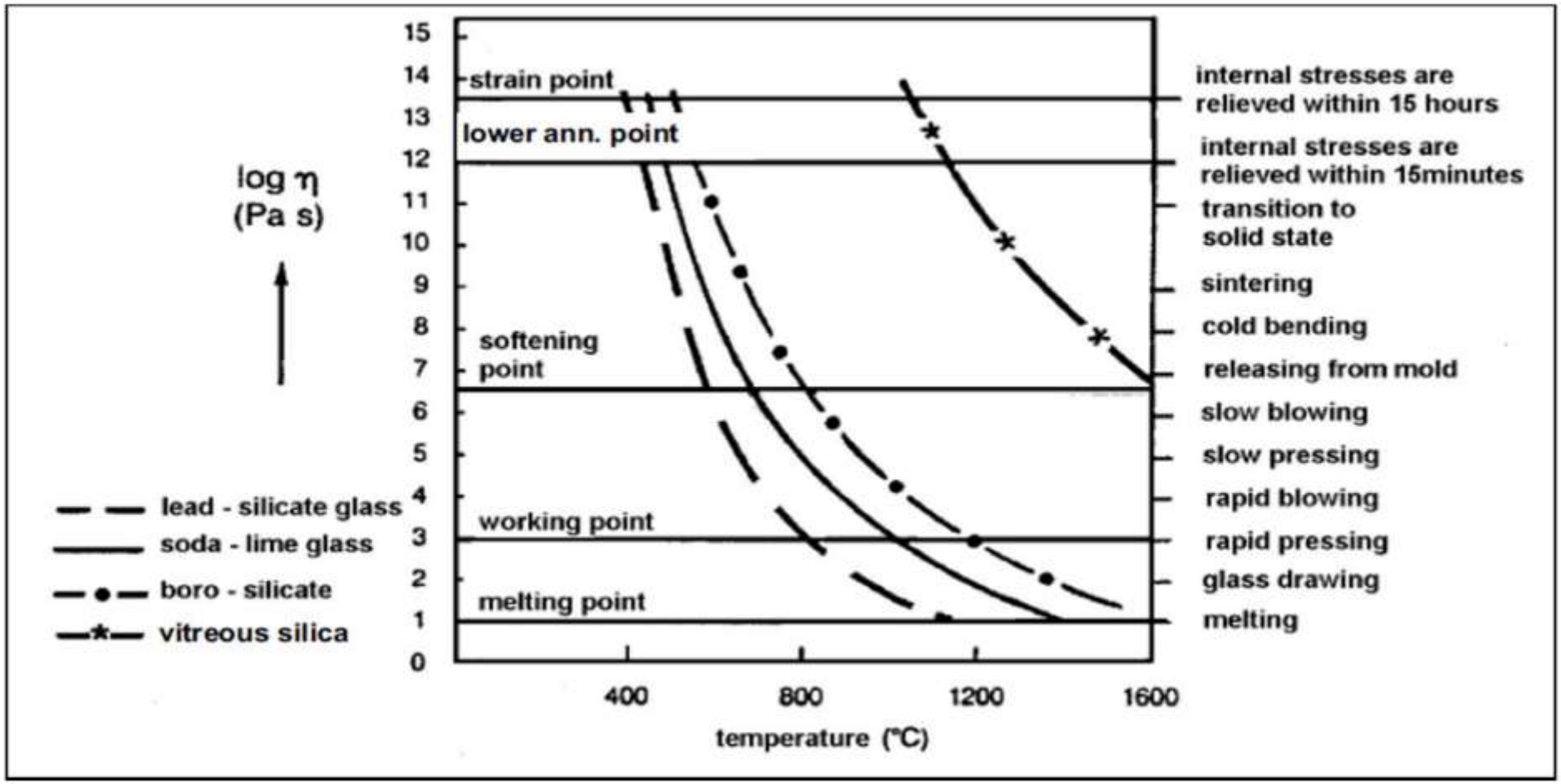
Grupo principal	Aplicación	Características
Vidrio para monitor* ($Al_2O_3 \cdot CaO \cdot B_2O_3 \cdot BaO \cdot SiO_2$)	Sustratos de vidrio para pantallas (TFT-LCD)	-Baja conductividad eléctrica - Ultra delgado (por debajo de los 50 µm) - Altas temperaturas de fusión
Cristal de plomo ($PbO \cdot K_2O \cdot SiO_2$)	- Vidrio artístico - Vidrio de mesa - Esmaltes decorativos	- Alta pureza - Elevado índice de refracción
Sílice Vítrea (SiO_2)	- Fibra óptica de vidrio (telecomunicaciones) - Iluminación halógena - Equipamiento químico y de laboratorio	-Pureza - Resistencia a alta temperatura - Elevada resistencia al choque térmico

* Existen varios tipos de pantallas de vidrio, dependiendo de su uso (por ej. en contacto con electrónica o vidrio de protección (cubierta)). Los vidrios de protección también contienen álcalis (principalmente sodio) para permitir el reforzamiento por tratamiento de intercambio iónico.

Ejemplo de algunas de las propiedades del vidrio

	Unit	Soda-lime-silica	Boro-silicate	E-glass	A-glass	Quartz glass	LCD glass
ρ density	kg/m^3	2500	2230	2530	2460	2200	2500
α: thermal expansion coefficient	K^{-1}	92×10^{-7}	33×10^{-7}	50×10^{-7}	90×10^{-7}	5×10^{-7}	35×10^{-7}
λ: heat conductivity at 100 °C	W/(m·K)	1,1	1,3			1,48	1
C_p : specific heat at 100 °C	kJ/(kg·K)	0,87	0,85			0,84	0.7
E: Young's modulus	Pa	72×10^9	64×10^9	77×10^9	74×10^9	74×10^9	70×10^9
Glass process temperatures	°C						
- working point :	$\log \eta = 3$	990	1250	1070		2400	
- softening point:	$\log\eta = 6,6$	700	820	840		1670	
- annealing point:	$\log \eta = 12,4$ η in Pas	520-540	565	670		1190	710
*n_d : refractive index		1,52	1,47	1,55	1,54	1,46	1.51

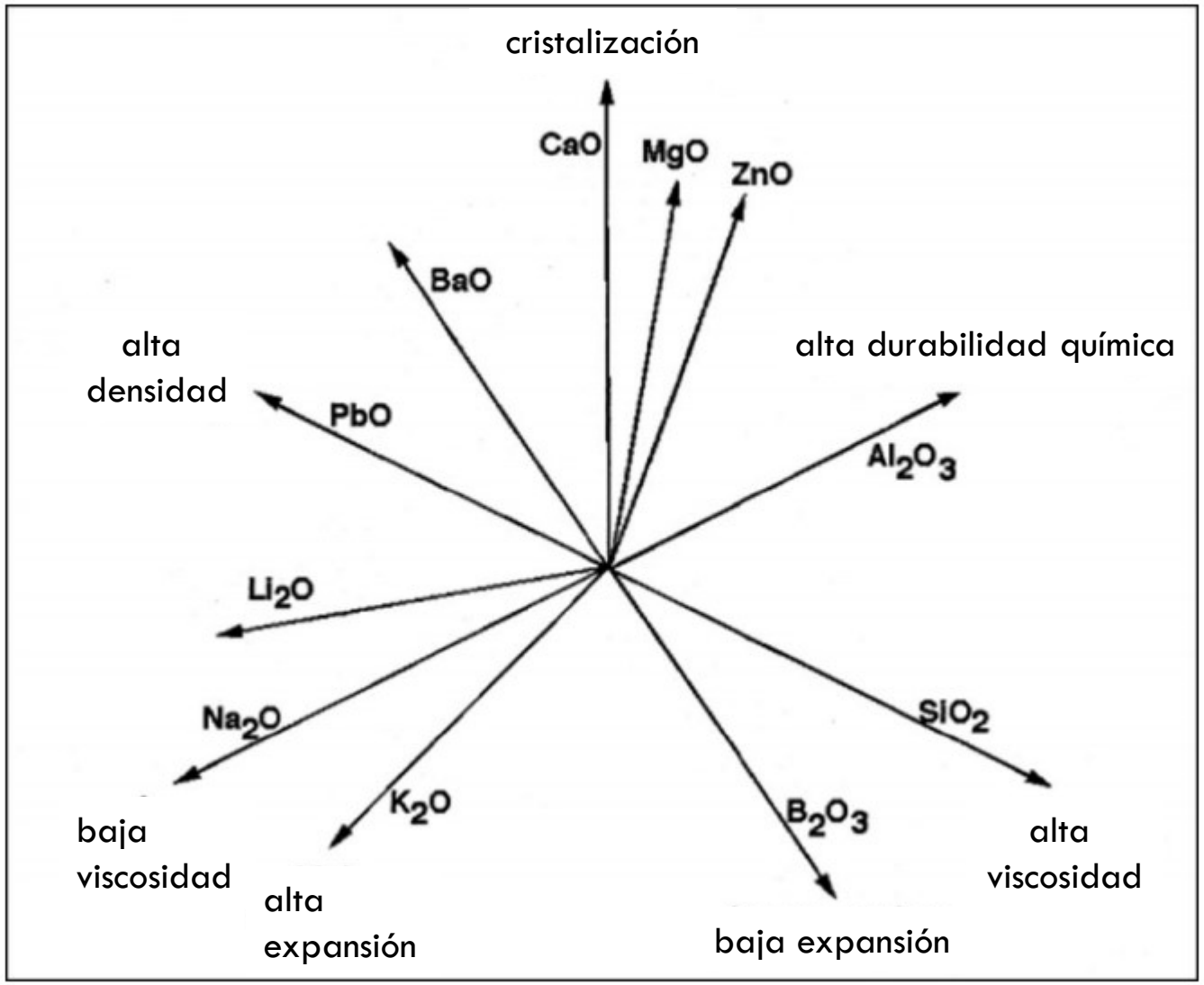
Ejemplo: viscosidad de los vidrios comerciales



Nota importante: la fusión a las temperaturas más altas lleva a costes más elevados (energía requerida) y también puede requerir el uso de materiales con más alta resistencia térmica para la fusión (por ej. refractarios), es decir más caros

Composition in mass%	SiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Diverse
Container glass								
- Flint	72,6	13,7	0,5	11,0	0,1	1,6	< 0,05	0,2 SO_3; 0,1 TiO_2
- Green	72,0	15,1	--	8,4	2,1	1,1	0,4	0,02-0,06 SO_3 0,25 Cr_2O_3
- Amber	72,7	13,8	1,0	10,0	--	1,9	0,2	0,05-0,08 SO_3
Clear Float glass	71	14	0,8	9	5	1-1,5	0.080	0,2-0,3 SO_3
Tinted Float glass	70	14	0.8	9	5	1-1,5	0.3-1.5	0,2-0, 3 SO_3
Display - LCD- glass	58- 60	<0.1	<0.1	5 - 7	0 - 1	15		±10 B_2O_3 ± 10% BaO+SrO
Lighting glass	72,4	17,4	--	5,3	3,7	0,8	--	
Tableware	75,6	13,5	4,1	3,7	2,6	0,4	0,02	
E-Glass*	55,2	0,5	0,5	17,7	4,3	14,8	0,3	0-10 B_2O_3
Insulation wool	64	15.5	1,2	7	3	3.5	0.25	4,5 B_2O_3 ; 0,15 SO_3
Borosilicate (Pyrex)	80,2	4,5	0,3	0,1	--	2,6	0,07	12,3 B_2O_3
Opal glass	66,9	13,3	2,2	4,8	0,4	6,9	0,08	Up to 6 Fluoride 1,6 BaO
Crystal glass	58,5	1,3	13,1	--	--	--	0,02	25,2 PbO
Lead crystal	54,9	0,2	12,3	--	--	--	0,02	32,0 PbO
Roman glass (first century AD)	70,0	16,5	1,0	7,0	0,6	5,0	--	--

Esquema- Componentes frente efecto en las propiedades



Principales elementos y materias primas empleados

- Óxidos formadores de red
  - -SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, GeO_2
  - -Componentes no- oxídicos: fluoruros, haluros, calcogenuros (As_2S_3, GeS_2)

- Óxidos modificadores de red
  - -Na_2O, K_2O, Li_2O
  - -CaO, BaO, MgO, SrO

- Óxidos intermedios
  - -Al_2O_3, PbO, ZnO, ZrO_2

- Agentes afinantes/componentes redox activos
  - -Sulfatos: Na_2SO_4, $CaSO_4$
  - -Óxidos: As_2O_3, Sb_2O_3, CeO_2
  - -Cloruros: NaCl -Nitratos: KNO_3, $NaNO_3$ -Carbono

- Agentes fundentes/fluidificantes
  - – CaF_2, espodumeno (materia prima de litio), escorias de altos hornos/calumita (residuo de silicoaluminato cálcico vítreo)

- Agentes colorantes
  - Fe_2O_3, Cr_2O_3, CoO, Mn_2O_3, Se, Fe^{3+}/S^{2-}, óxidos de tierras raras, sulfuros, seleniuros

- **Casco (vidrio reciclado, propio o externo)**

Fabricación del vidrio

Ejemplo – Contenido en óxidos de las materias primas

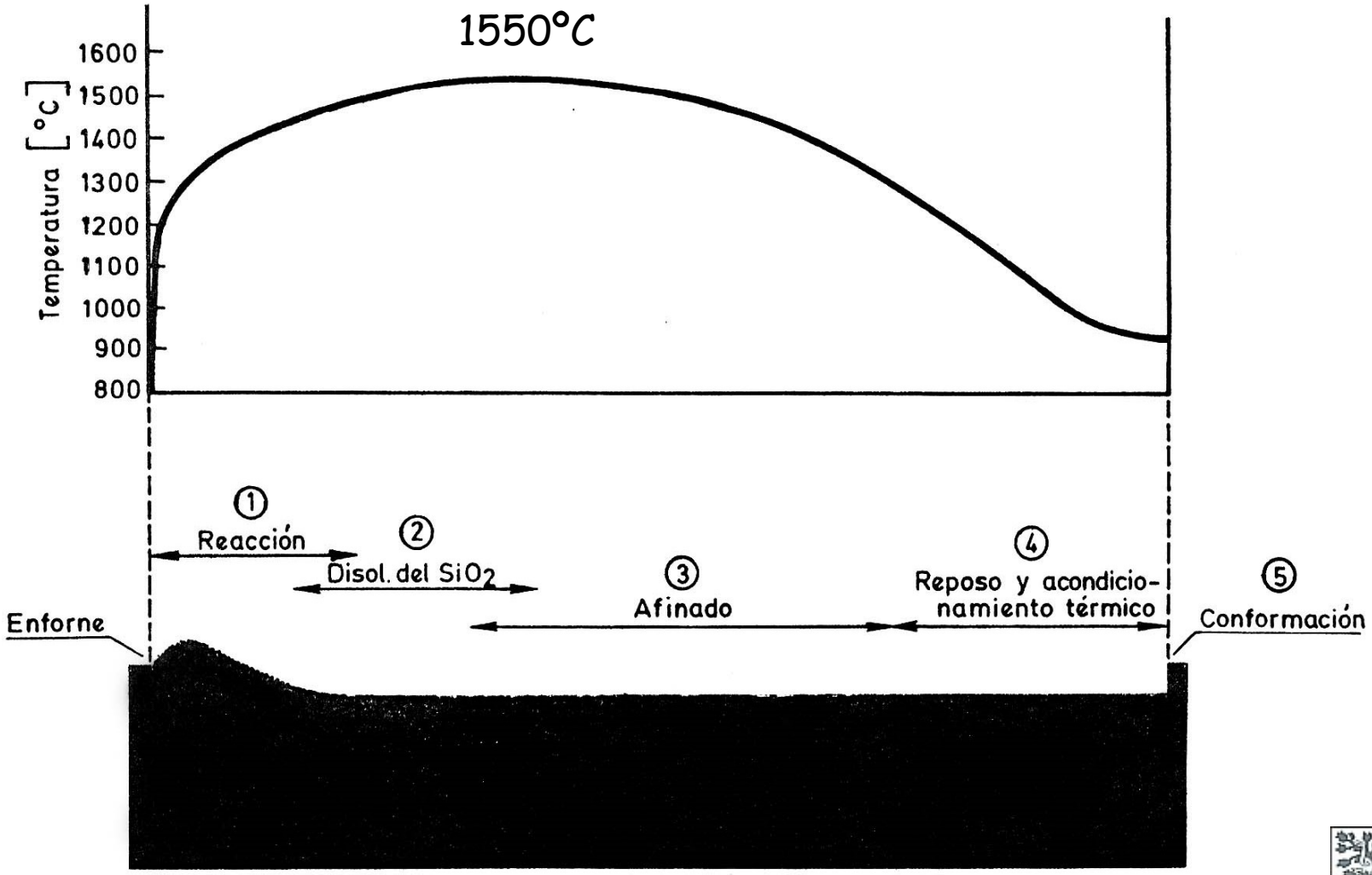
TABLE 7-1 Glassmaking Materials

Raw material	Chemical composition	Glassmaking oxide	Percent of oxide
Sand	SiO	SiO_2	99.8
Soda ash	Na_2CO_3	Na_2O	58.5
Limestone	$CaCO_3$	CaO	56.0
Dolomite	$CaCO_3$–$MgCO_3$	CaO	30.5
		MgO	21.5
Feldspar	$K_2(Na_2)O$–Al_2O_3–$6SiO_2$	SiO_2	68.0
		Al_2O_3	18.5
		$K_2(Na_2)O$	12.8
		SiO_2	68.0
Nepheline	$NaAlSiO_4$	SiO_2	60.6
Syenite		Al_2O_3	23.3
		$Na_2(K_2)O$	14.8
Borax, 5-Mol	$Na_2B_4O_7$–$5H_2O$	Na_2O	21.8
		B_2O_3	48.8
Boric acid	H_3BO_3	B_2O_3	56.3
Litharge	PbO	PbO	99.9
Potash, anhydrous	K_2CO_3	K_2O	68.0
Fluorspar	CaF_2	CaO	69.9
		F^-	47.1
Zinc oxide	ZnO	ZnO	100.0
Barium carbonate	$BaCO_3$	BaO	76.9

G. McLellan and E. Shand, Glass Engineering Handbook, 3rd edition, 1984, Ed: McGraw-Hill Book Company

Fabricación del vidrio

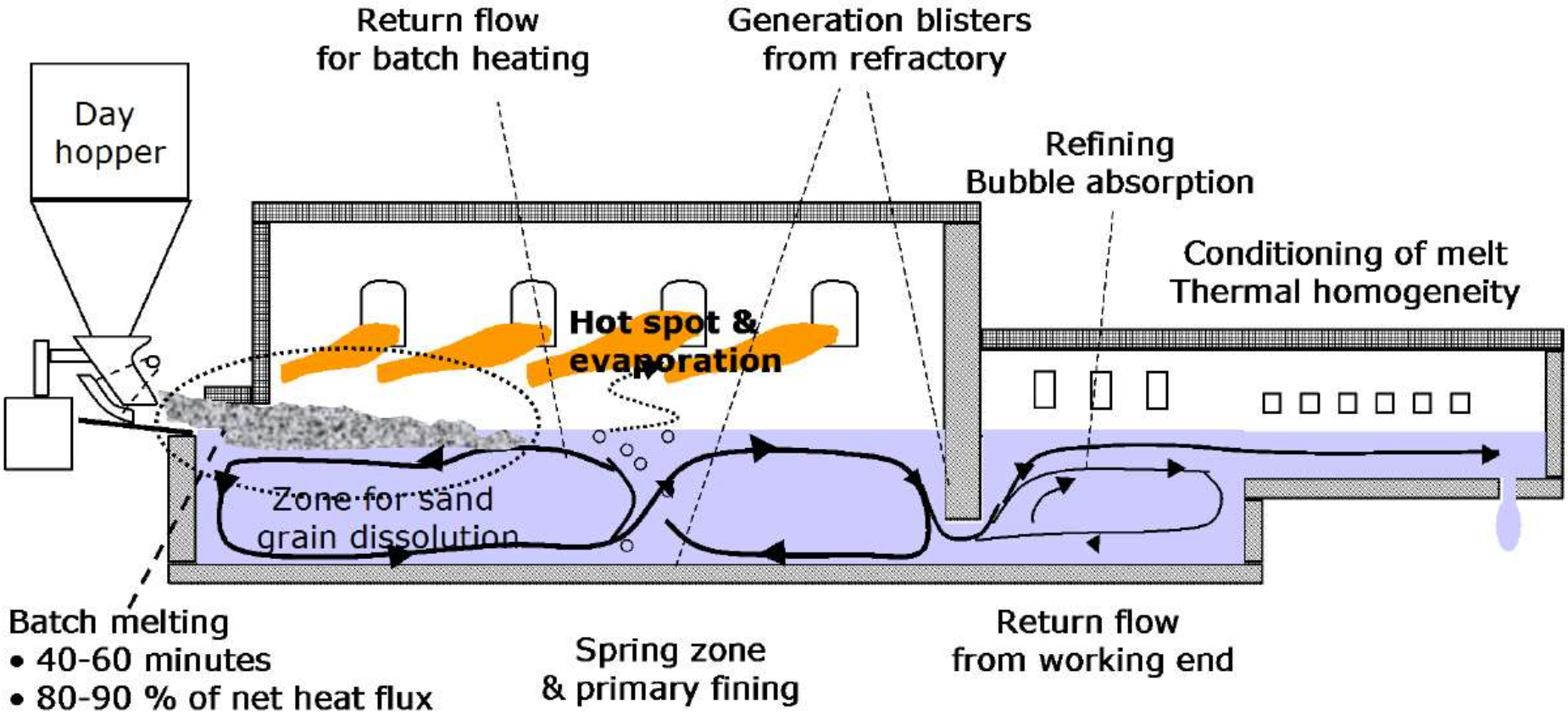
El proceso de fusión



Fabricación del vidrio

Esquema de un tanque de fusión de vidrio industrial

T= 1450ºC-1550ºC

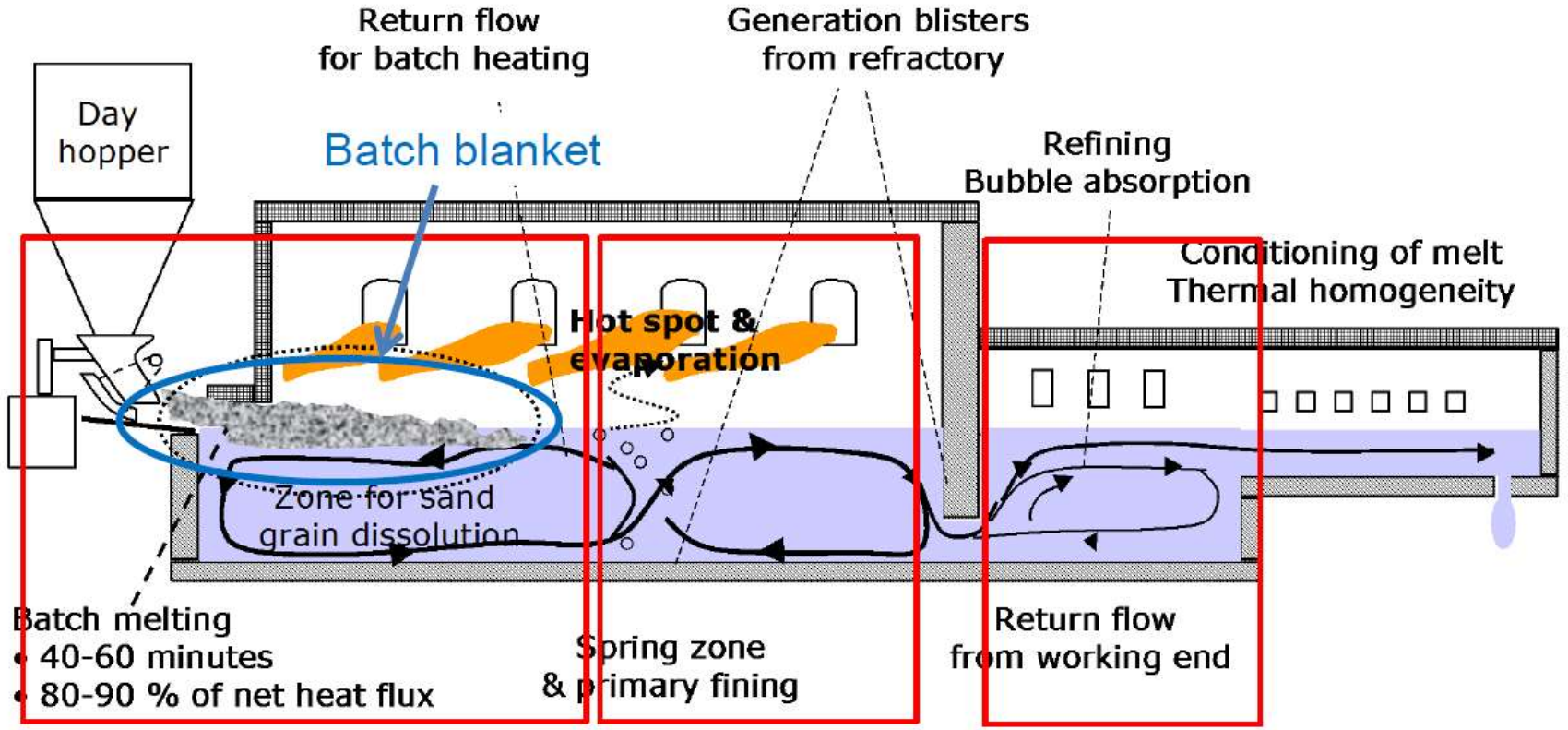


** This is a schematic representation, but many different furnace designs exist*

Fabricación del vidrio

Fusión y afinado en el horno

T= 1450ºC-1550ºC



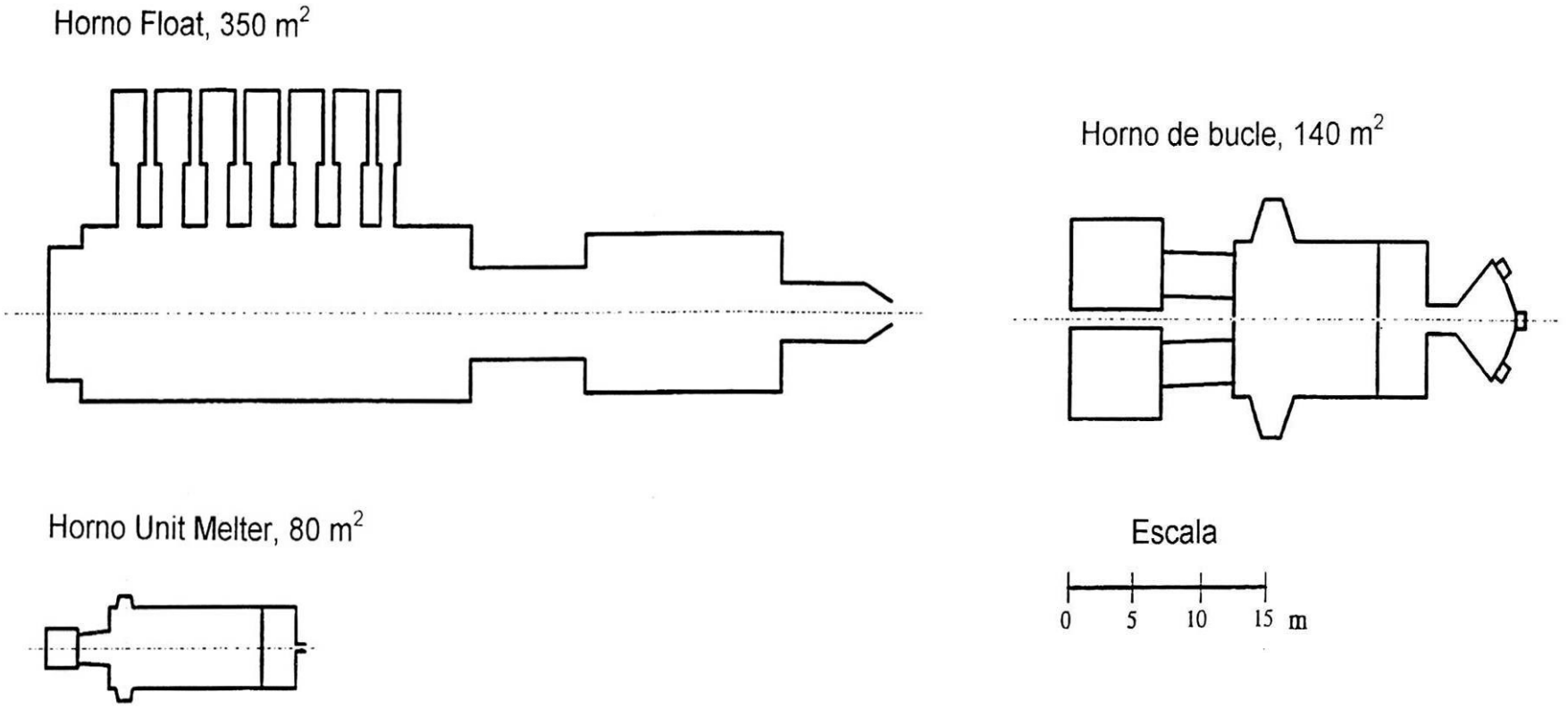
Aire-gas

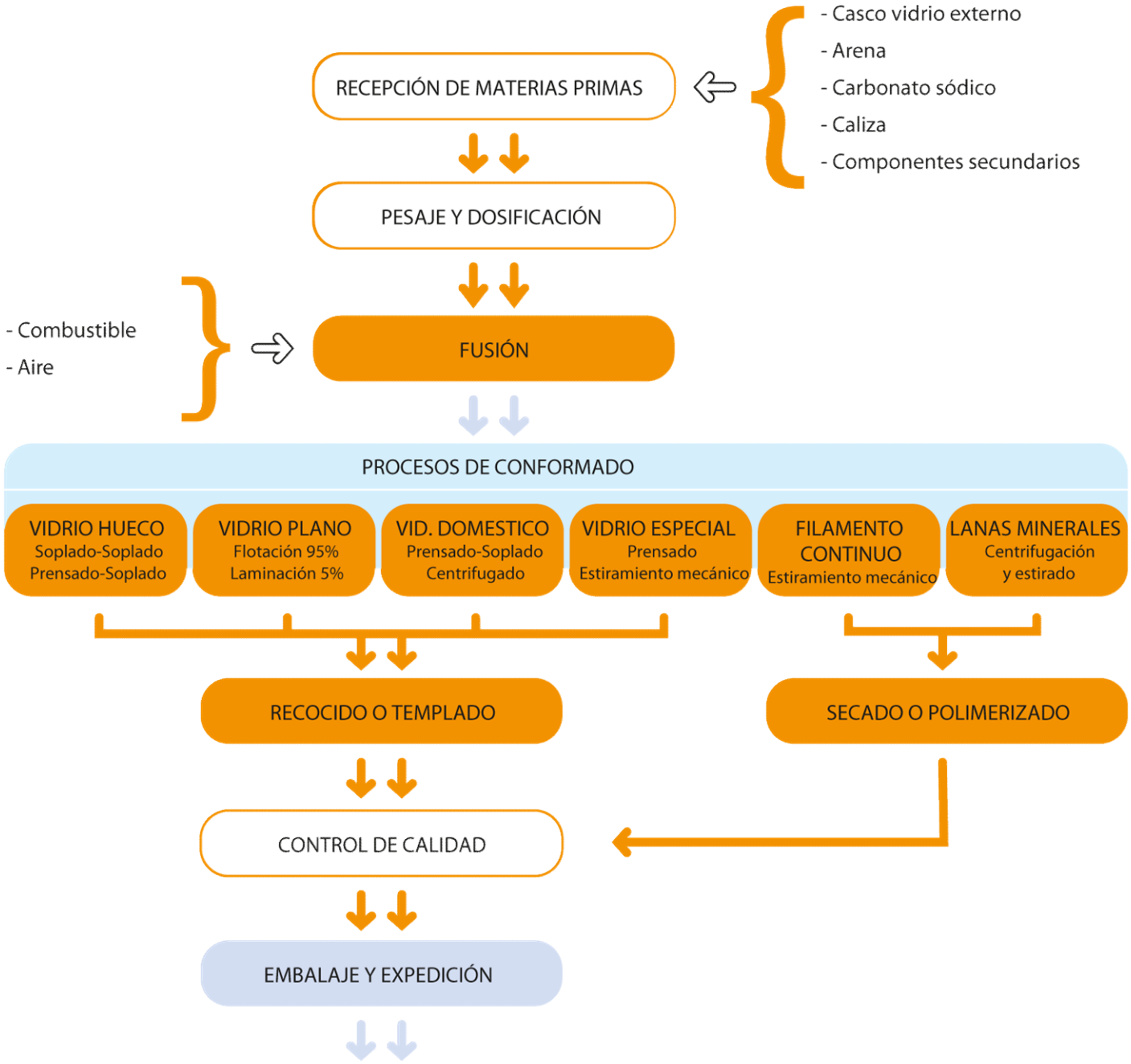
Oxy-gas

Fabricación del vidrio

Hornos de fusión de vidrio

Vista en planta de diferentes hornos de vidrio





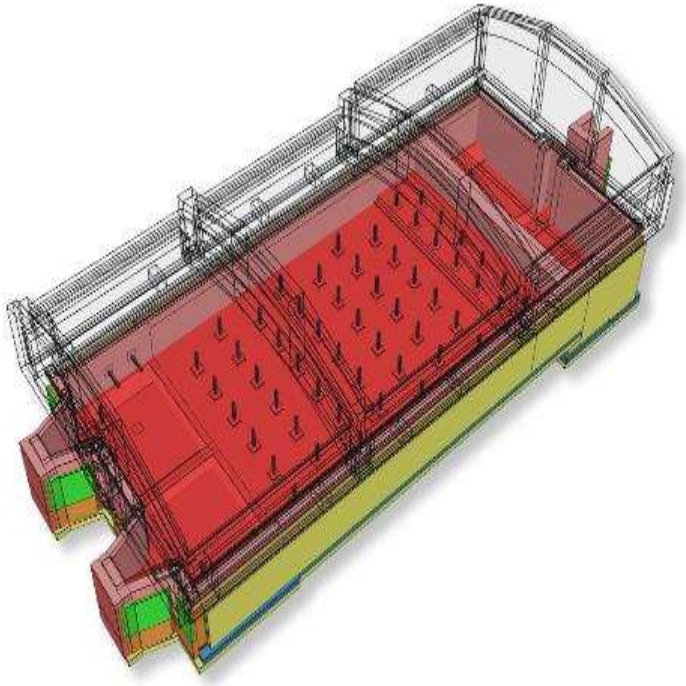
Proceso de fabricación del vidrio. Fuente: VIDRIO ESPAÑA

Horno del futuro. Evolución o revolución

Cambio del vector energítico. Energías renovables. H_2

Electrificación: enorme reto tecnológico

Cold Top All Electric Melter (AEM) ***80 TPD*** *at* **2.4 MJ/kg**



Hybrid oxy-hydrogen fired hot top horizontal electric melter (H^3EM) ***350 TPD*** *at* **2.5 MJ/kg** *with 80% renewable electric or* **0.0 kg CO_2 / kg glass emissions from heating**

Aumento del casco (Vidrio reciclado): 3% ahorro de energía/10% de mezcla sustituida

Ciertas propiedades del vidrio (mecánicas, químicas, térmicas, ópticas…) pueden ser mejoradas a partir de la transformación del vidrio en vitrocerámico

S. D. Stookey
Corning Glass Works

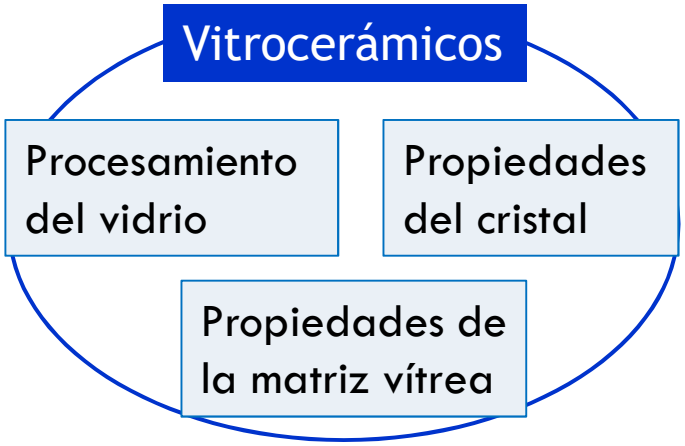
1953 Primer vitrocerámico

ICG International Commission on Glass
TC07
Crystallisation & GCs

Definición relacionada con el procesamiento

Los vitrocerámicos son materiales inorgánicos, no metálicos preparados a partir de la cristalización controlada de vidrios a través de diferentes métodos de procesamiento. Contienen al menos un tipo de fase cristalina funcional y un vidrio residual. La fracción en volumen cristalizada puede variar desde ***ppm hasta casi el 100%" ****

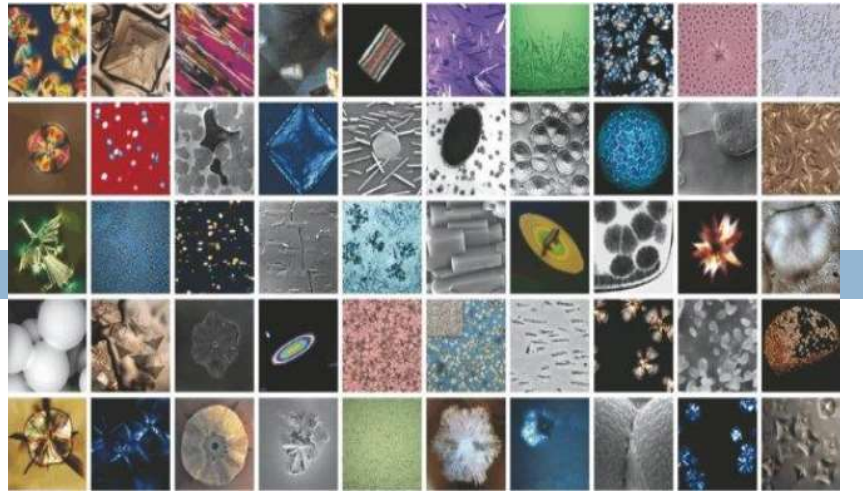
** J. Deubener et al., Updated definition of glass-ceramics. JNCS 501 (2018) 3-10*



Vitrocerámicos

Diseño microestructural

Distribución de tamaño de grano y forma, textura, porosidad, %cristalinidad, tipo y composición de las fases cristalinas



El diseño de micro y nanoestructuras conduce al desarrollo de diferentes productos vitrocerámicos

- Elevada estabilidad térmica y química
- Más duros y tenaces que los vidrios
- Propiedades eléctricas controlables

Combinación de propiedades

- Transparencia óptica
- Bioactividad
- CET controlable

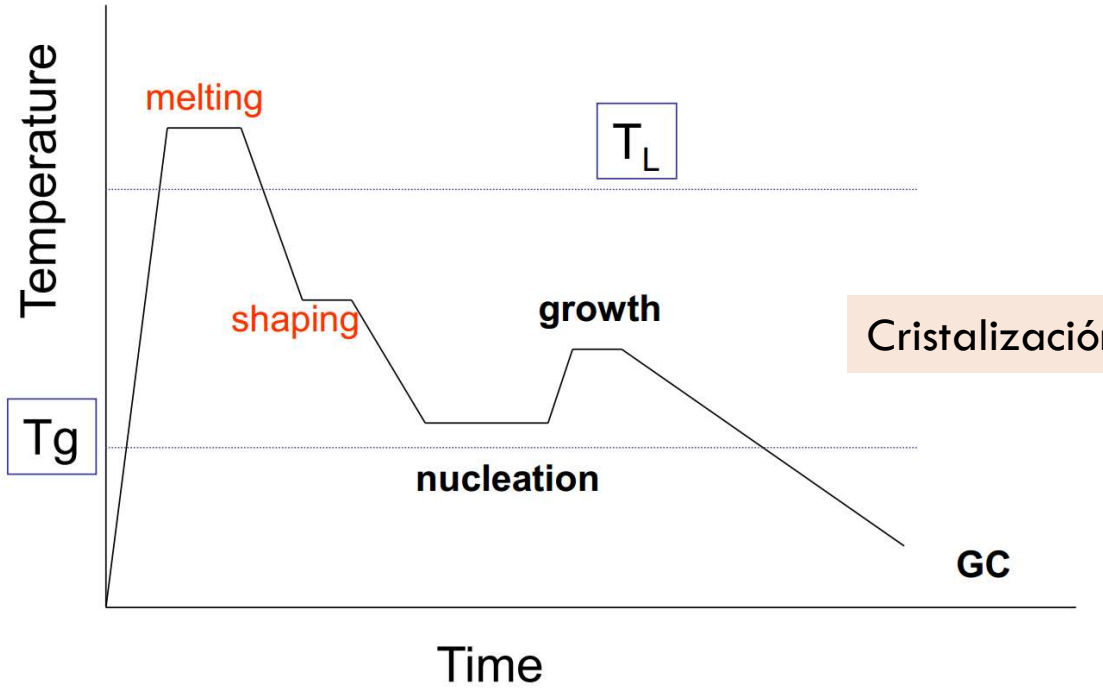
Ningún vidrio, metal o monocristal puede reunir simultáneamente estas especificaciones

E.D.Zanotto. Glass-ceramics. Lectures available at: **www.lehigh.edu/imi**

Vitrocerámicos-Proceso de fabricación

- Fusión y conformado utilizando procedimientos convencionales en la industria del vidrio.
- Conformado de piezas: colado, prensado, soplado, rodillos, fibrado…
- Tratamiento térmico adecuado

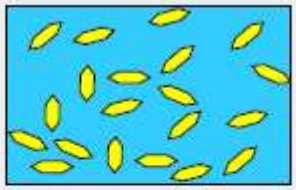
  Formación de núcleos y crecimiento de microcristales



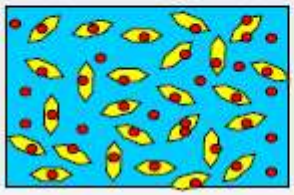
Cristalización controlada

- Agentes nucleantes: TiO_2, ZrO_2, P_2O_5, V_2O_5, Cr_2O_3, fosfatos, fluoruros… sulfuros, metales Cu, Ag, Au, Pt, otros metales nobles. Foto-nucleación

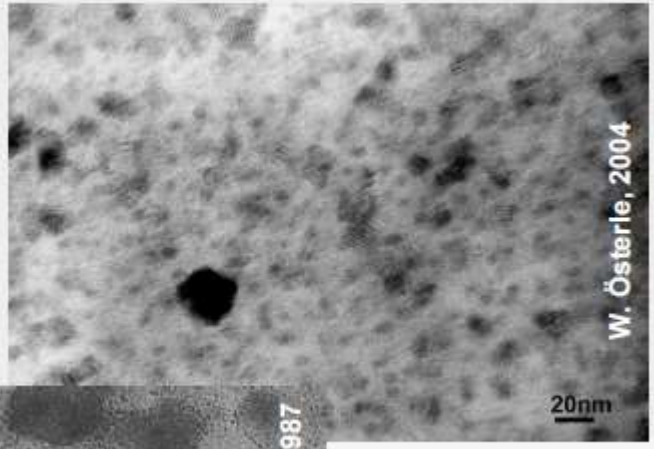
Nucleación

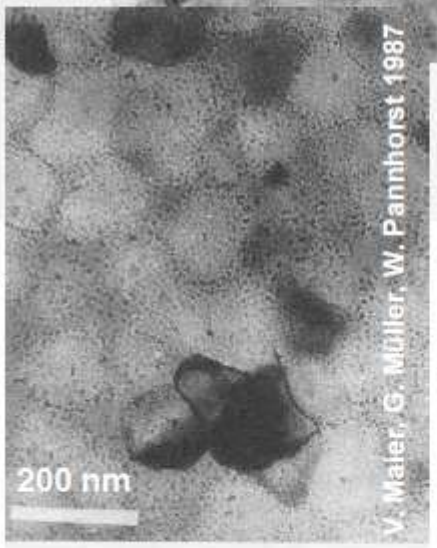


„homogeneous“
volume nucleation
quasi *iso-chemical*
quasi *polymorphic*
transformation

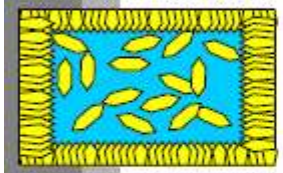


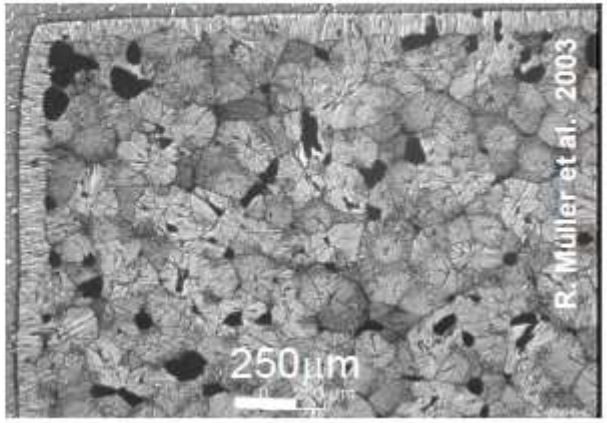
catalyzed hetrogeneous
volume nucleation
liquid-liquid phase separation
redox-change, photo induced,
change of coordination,





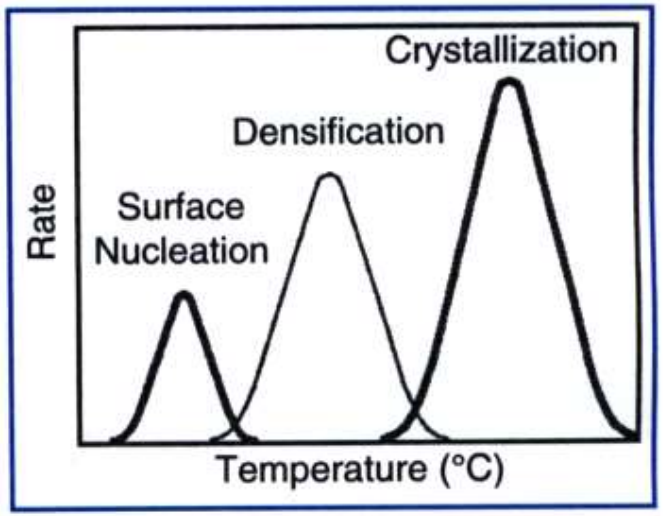
surface vs. volume nucleation
coast –island structures

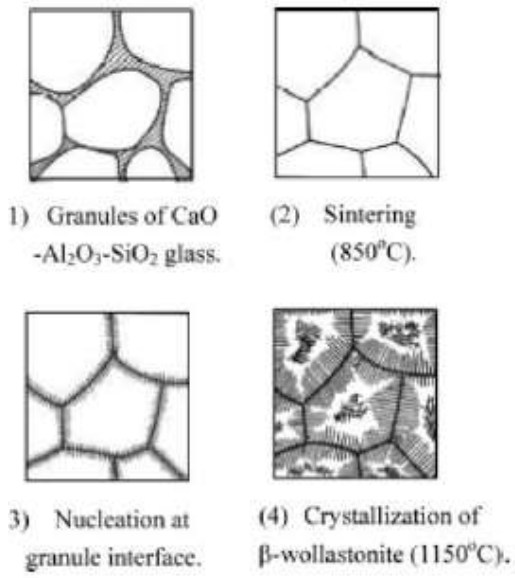




Sinterización de vidrios y vitrocerámicos

- Sinterización con cristalización concurrente
- Mecanismo de flujo viscoso
- No necesita adición de nucleantes





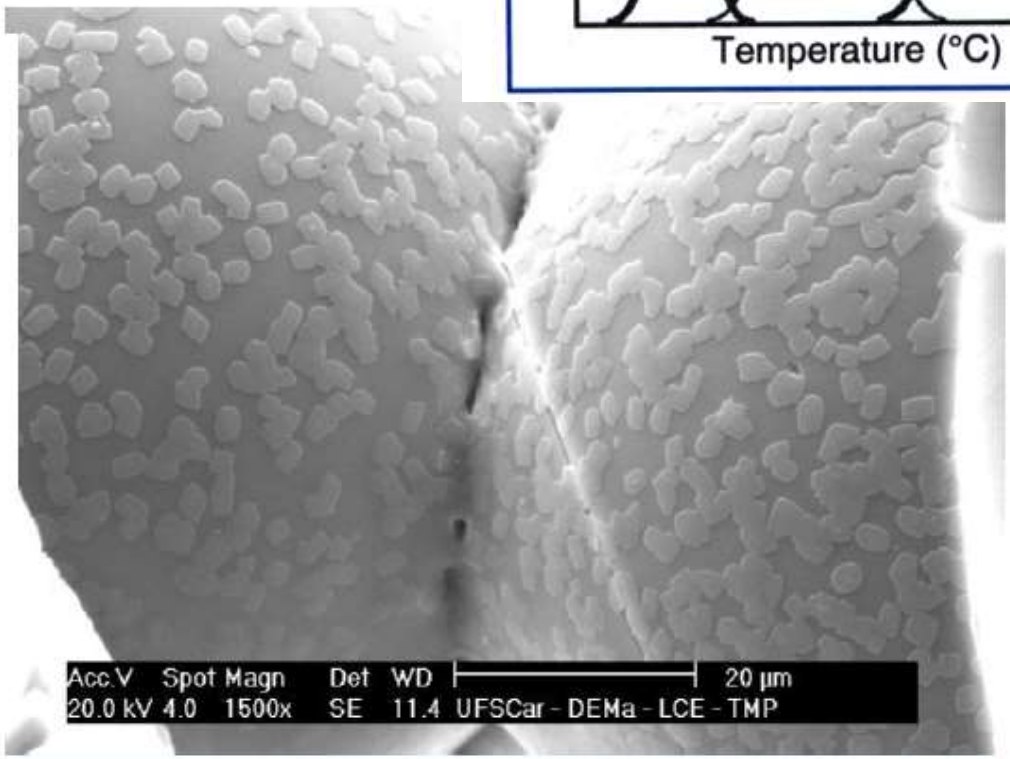


Photo by Vivi Oliveira and Rapha Reis (2009) LaMaV

Aplicaciones comerciales: pavimentos y revestimientos tipo mármol (Neoparies y similar), fritas de vidrios para soldadura desvitrificables (por ej. para tubos TV), sustratos multicapa co-sinterizados para circuitos electrónicos, scaffolds vitrocerámicos bioactivos…

Tipos y usos de materiales vitrocerámicos

- Usos térmicos
- Mecanizables
- Construcción
- Alta resistencia mecánica
- Uso dental
- Bioactivos
- Conductores o aislantes eléctricos
- Transparentes
- Defensa/blindaje
- Inmovilización de residuos radioactivos y no-radioactivos
- Vitrocerámicos obtenidos a partir de residuos

Ejemplos de compañías y productos vitrocerámicos:
Schott, Corning, Nippon, Saint Gobain, Ohara, Ivoclar…

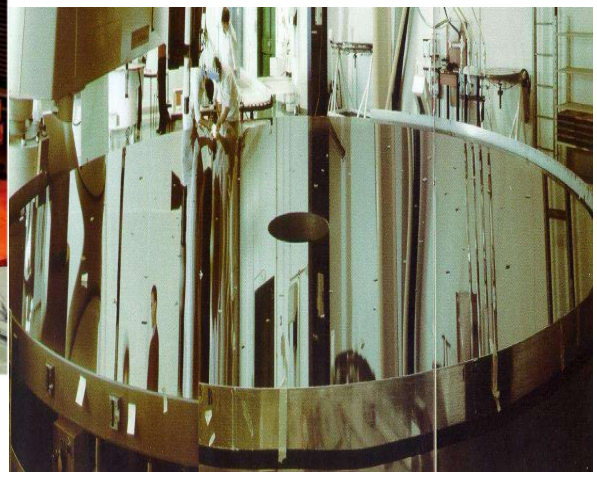
Company	Products	Crystal type	Applications
SCHOTT, Germany	Foturan®	Lithium-silicate	Photosensitive and etched patterned materials
	Zerodur®	β-quartz ss	Telescope mirrors
	Ceran® / Robax®	β-quartz ss	Cookware, stovetops, cooktop and oven doors
	Nextrema®	Lithium Aluminosilicate	Fireproof windows and doors
Corning, USA	Pyroceram®	β-Spodumene ss	Cookware
	Fotoform® / Fotoceram®	Lithium silicate	Photosensitive and etched patterned materials
	Cercor®	β-Spodumene ss	Gas turbines and heat exchanger
	Centura®	Barium silicate	Microwave tableware
	Vision®	β-quartz ss	Cookware and cooktop
	9606®	Cordierite	Radomes
	MACOR®	Mica	Machinable glass-ceramic
	9664®	Spinel-enstatite	Magnetic memory disk substrate
	DICOR®	Mica	Dental restoration
Nippon Electric Glass, Japan	ML-05™	Lithium disilicate	Magnetic memory disk substrate
	Neoparies®	β-wollastonite	Architectural glass-ceramic
	Firelite™	β-quartz ss	Architectural fire-resistant windows
	Neoceram™ N-11	β-Spodumene ss	Cooktop and kitchenware
	Narumi®	β-quartz ss	Low thermal expansion GC
	Neoceram™ N-0	β-quartz ss	Color filter substrates for LCD panels

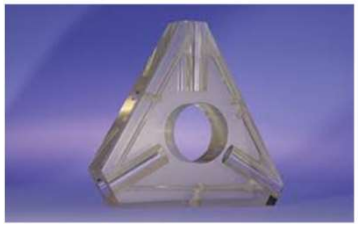
Materiales vitrocerámicos transparentes con bajo coeficiente de expansión térmica

ZERODUR® (SCHOTT 1968), vitrocerámico transparente con propiedades especiales
CLEARCERAM ®-Z producido por Ohara, material similar

Sustratos para espejos telescópicos para astronomía
Telescopios espaciales Hubble

Material ópticamente pasivo





Ring laser gyroscope

CET extremadamente bajo
CET< 0.01-0.03 $\times$ 10^{-6} K^{-1}

Li_2O-Al_2O_3-SiO_2 sistema LAS con 70 a 78% de cristales de β-cuarzo con tamaño entre 50-80 nm ***Nanocristales***

Áreas de investigación

- Vidrios en el ámbito de la salud
- El vidrio en tecnologías de la información, comunicación y fotónica
- Energía y medioambiente

Vidrios en el ámbito de la salud

Vidrios Inertes

Ejemplos de vidrio inerte , jeringuilla EPIPEn

Vidrio de borosilicato químicamente endurecido,

Vacunas (Covid 19)

Vidrios bioactivos

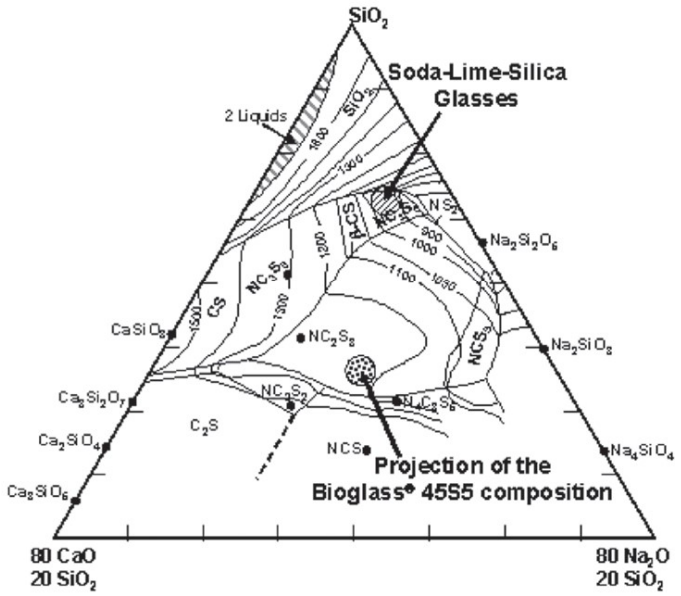
Bioglass® (45S5 vidrio bioactivo), primer material que formó enlace con hueso
A finales de los 1960s -Larry Hench

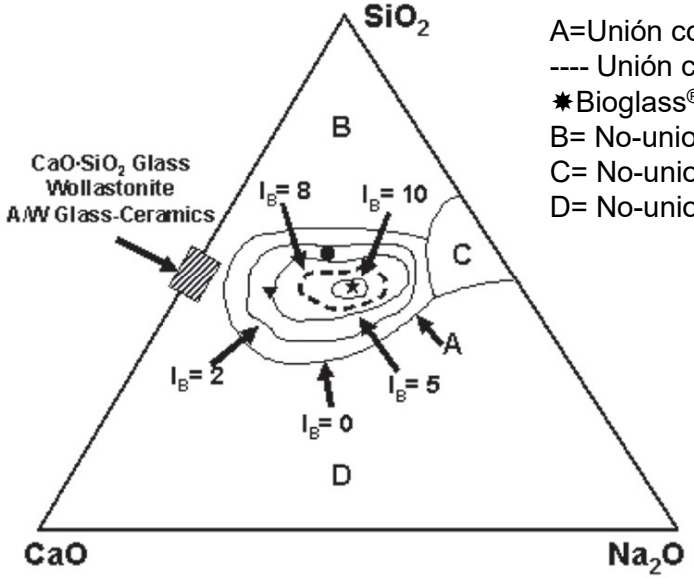
Composición	SiO_2	Na_2O	CaO	P_2O_5
Mol%	46.13	24.35	26.91	2.60
Wt%	45.00	24.50	24.50	6.00

Indice de bioactividad

$$I_B = [100/t_{0.5}](days^{-1})$$

Tiempo necesario para el 50% de la superficie de un implante unirse al hueso, $t_{0.5}$



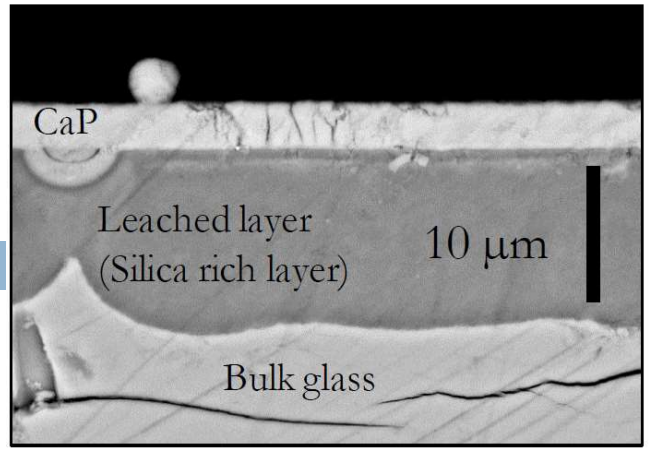


A=Unión con el hueso
---- Unión con tejido blando
✸Bioglass®
B= No-union (reactividad demasiado baja)
C= No-union (reactividad demasiado alta)
D= No-union (no formación de vidrio)

Todos 6 wt% P_2O_5

Vidrios bioactivos

Mecanismo de disolución y unión con el hueso de un vidrio bioactivo



1. Rapid cation exchange of Na^+ and/or Ca^{2+} with H^+ from solution, creating silanol bonds (Si–OH) on the glass surface:

$$Si - O^-Na^+ + H^+ + OH^- \rightarrow Si - OH^+ + Na^+(aq) + OH^-$$

The pH of the solution increases and a silica-rich (cation-depleted) region forms near the glass surface. Phosphate is also lost from the glass if present in the composition.

2. High local pH leads to attack of the silica glass network by OH^-, breaking Si–O–Si bonds. Soluble silica is lost in the form of $Si(OH)_4$ to the solution, leaving more Si–OH (silanols) at the glass–solution interface:

$$Si - O - Si + H_2O \rightarrow Si - OH + OH - Si$$

3. Condensation of Si–OH groups near the glass surface: repolymerization of the silica-rich layer.
4. Migration of Ca^{2+} and PO_4^{3-} groups to the surface through the silica-rich layer and from the solution, forming a film rich in amorphous $CaO–P_2O_5$ on the silica-rich layer.
5. Incorporation of hydroxyls and carbonate from solution and crystallization of the $CaO–P_2O_5$ film to HCA.

Conectividad de la red (NC) y Bioactividad

-Número de enlaces de oxígeno puente por átomo de silicio
-Los vidrios con un 60% mol. de sílice no son bioactivos
45S5 Bioglass NC= 2
Por encima de NC=2, la velocidad de deposición de la capa de HCA disminuye rápidamente

$$NC = 2 + \frac{BO - NBO}{G}$$

BO: Número total de oxígenos puente por ion formador de red
NBO: Número total de oxígenos no puente por ion modificador de red
G: número total de unidades formadoras de vidrio

Vidrios bioactivos

Bioglass® (45S5 Vidrio bioactivo)

Properties	Value
Density	2.7g/cm3
Glass transition temperature	538ºC
Crystallisation onset temperature	677ºC
Melting temperature	1224 and 1264ºC
Thermal expansion coefficient	$15.1 \times 10^{-6} ºC^{-1}$
Refractive index	1.59
Tensile strength	42 MPa
Young´s modulus (stiffness)	35 MPa
Shear modulus	30.7 GPa
Fracture toughness	0.6 $MPam^{1/2}$
Vickers hardness	5.75 GPa

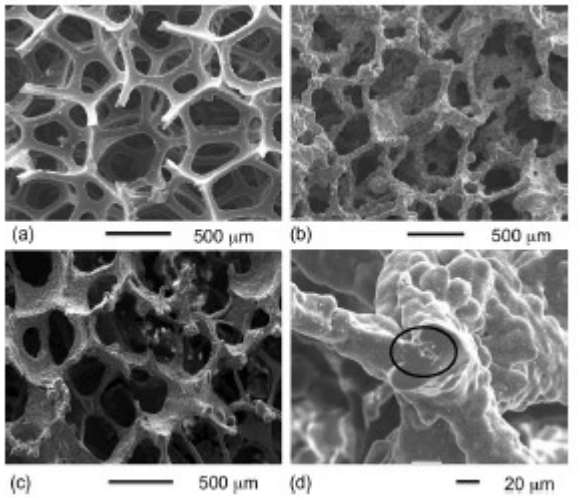
Propiedades mecánicas pobres
Cristaliza rápidamente cuando se calienta por encima de Tg
Propiedades pobres de sinterabilidad (piezas grandes de vidrio, estructuras porosas o scaffolds o recubrimientos)

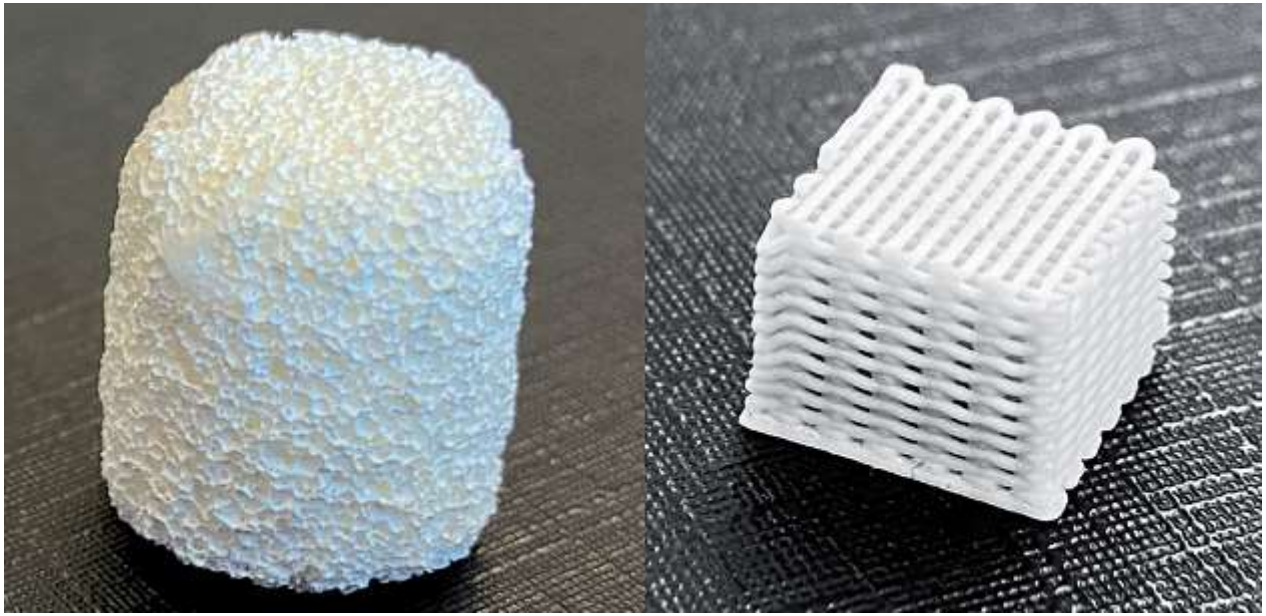
Composiciones alternativas de vidrios bioactivos:

-Zn, Mg, B: estabilizan el intervalo de trabajo para favorecer la sinterización por flujo viscoso y alterar el TEC para ajustarlo con el de las aleaciones metálicas
-K, F para liberación lenta de flúor
-Ag acción bacterizida
-Sr (StronBone™). Crecimiento de hueso.
La liberación de estos iones puede ser controlada alterando la NC y el tamaño de partícula de los vidrios.
-Mg caso particular
-Composiciones vitrocerámicas

Aplicación: Injerto óseo sintético para uso ortopédico y periodontal

Scaffolds de vidrio bioactivo

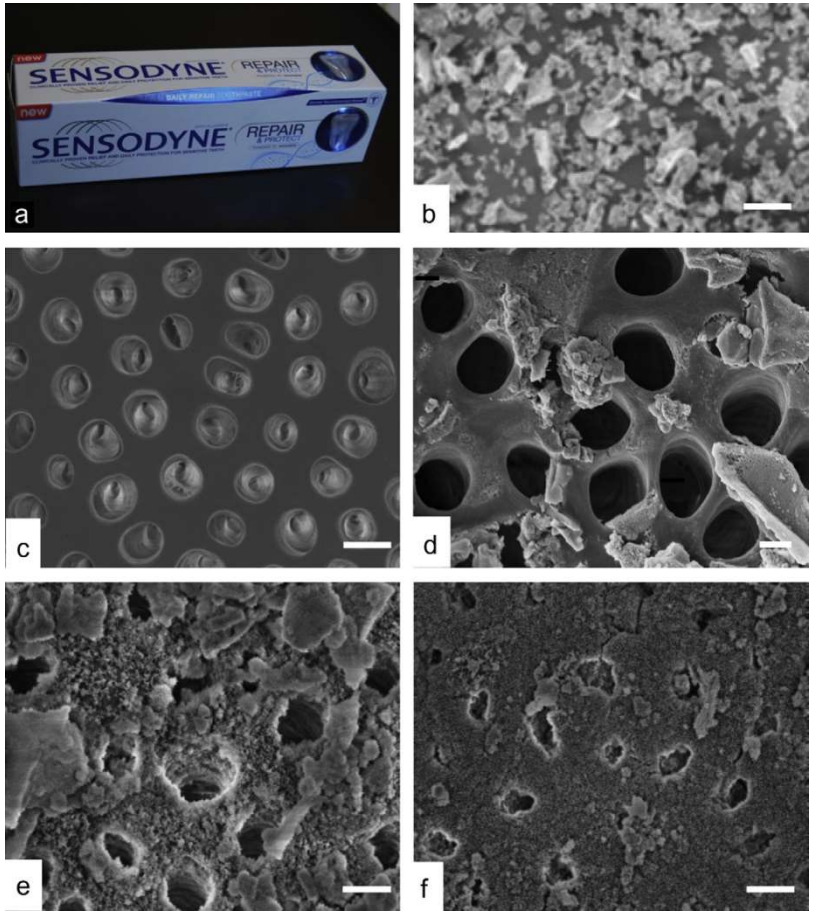




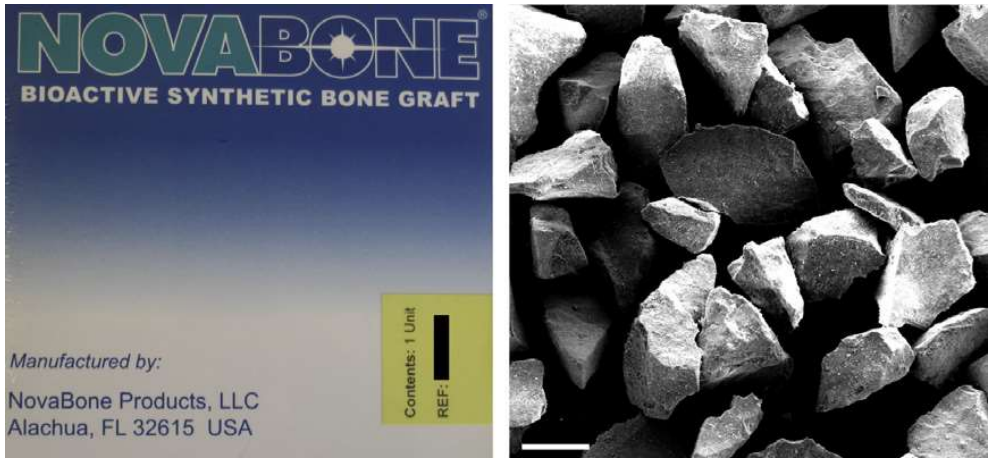
Andamiajes vítreos bioactivos que sirven de marco para el crecimiento óseo o regeneración de tejido:

Izquierda- andamiaje de espuma sol-gel que imita la arquitectura de hueso poroso
Derecha- Andamiaje impreso en 3D
Prometedores pero no se han validado para uso clínico

Vidrios bioactivos



Sensodyne Repair and Protect tooth paste, which contains Novamin, a fine particulate of Bioglass 45S5. Scale Bar 1 μm



NovaBone packaging, with an SEM image of the particles. Scale bar is 200 μm.

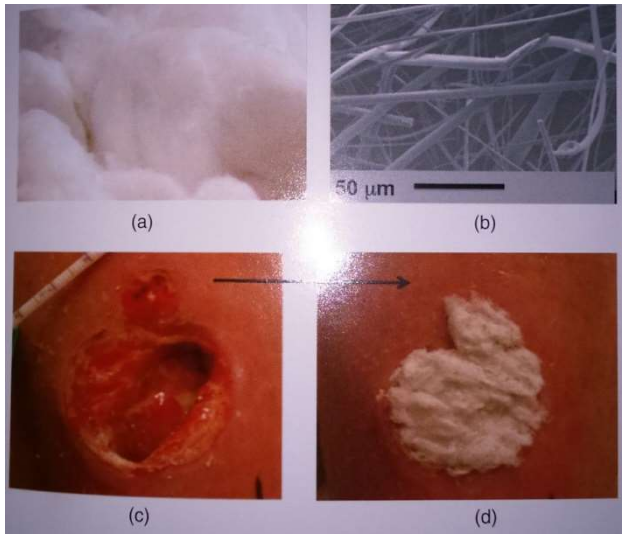
En pasta de dientes para tratar la sensibilidad dental (polvo). Se liberan iones y aumenta el pH, causando la precipitación de mineral de fosfato de calcio bloqueando los extremos del túbulo de la dentina

Vidrios bioactivos de borato

El formador principal de vidrio es B_2O_3, y las composiciones pueden contener algún metal alcalino (Li, Na, K, etc.), alcalino-térreo (Mg, Ca, Sr, Ba, etc.) y metal de transición (Fe, Cu, Zn, Ag, Au).

Composiciones de vidrios bioactivos comunes(wt%)

Glass	B_2O_3	Na_2O	CaO	K_2O	MgO	SiO_2	P_2O_5	CuO	SrO	ZnO	Fe_2O_3
45S5	0	24.50	24.50	0	0	45.00	6.00	0	0	0	0
13-93	0	6.00	20.00	12.00	5.00	53.00	4.00	0	0	0	0
13-93B3	53.00	6.00	20.00	12.00	5.00	0	4.00	0	0	0	0
1B	17.00	24.00	23.90	0	0	29.30	0	0	0	0	0
2B	33.10	23.40	23.40	0	0	14.40	0	0	0	0	0
3B	48.60	22.90	22.90	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu-3	52.79	5.98	19.92	11.95	4.98	0	3.98	0.40	0	0	0
CS	51.73	5.86	19.52	11.71	4.88	0	3.90	0.40	2.00	0	0
CSZ	51.20	5.80	19.32	11.59	4.83	0	3.86	0.40	2.00	1.00	0
CSZF	50.88	5.76	19.20	11.52	4.80	0	3.84	0.40	2.00	1.00	0.40



Nanofibras de vidrio de borato

- Los vidrios bioactivos de borato, al contrario de los de silicato, forma HCA directamente en la superficie del vidrio, sin formar una capa intermedia rica en borato. Esto se debe a que el borato es altamente soluble en fluidos corporales, similar a los vidrios de fosfato. Los productos de degradación pueden ser eliminados naturalmente por el cuerpo a través de la orina. Reaccionan completamente sin una reducción significativa en la cinética de disolución.
- Dan lugar a crecimiento de hueso y también a la cura exitosa de heridas en diabéticos.

Vitroceramicos bioactivos

A pesar de sus excelentes propiedades bioactivas, la mayor desventaja de los vidrios bioactivos son su baja resistencia mecánica y baja tenacidad a la fractura. Para mejorar el desempeño mecánico, se han desarrollado vitrocerámicos bioactivos.

Bioactivity index and mechanical properties of bioactive materials used in clinical procedures

Bioceramics	Bioglass® 45S5	Bioglass® 52S4.6	Cerabone® A/W	Ceravital®	Bioverit® I	HAs	Biolox® Forte	Biosilicate® (monolithic)	Cortical bone (longitudinal)	Cancellous bone
Bioactivity index (BI)	12.5	10.5	6	5,6	IB<8	3,1	0	IB>8	-	-
Flexural strength (MPa)	40	40	215	100-150	140-180	50-200	466	120-210	-	-
Compressive Strength (MPa)	?	?	1080	500	500	500-100	4400	?	100-133	1.5-7.5
Young´s modulus (GPA)	60	60	120	100-160	70-90	80-110	380	70-80	12-17.7	0.2-0.6
Structure	Glass	Glass	(1) β-CaSiO3+ apatite+ glass	(1) devitrite+ apatite+ glass	(1) mica+ apatite+ glass	(2) apatite	α-Al2O3	1N2C3S	Apatite+ organic material	Apatite+ organic material
Machinability	Poor	Poor	Poor	Poor	Good	Poor	Poor	Moderate	-	-

?: not found data. Cerabone® A/W: glass-ceramic/β-$CaSiO_3$: beta-wollastonite/(1): undefined composition. Ceravital®:glass-ceramic/(1): undefined composition. Bioverit® I:glass-ceramic/(1):undefined composition. HAs: synthetic hydroxyapatite/(2): $(Ca)_{10}(PO_4)_6(OH)_2$. Biosilicate®: glass-ceramic 100% crystallized. 1N2C3S: Sodium Calcium Silicate (1N=sodium; 2C= calcium; 3S = silicon).

M.C. Crovace, et al., Biosilicate®-A multipurpose, highly bioactive glass-ceramic. In vitro, in vivo and clinical trials, J. Non-Cryst. Solids (2015),http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.03.022

Vitroceramicos bioactivos

Compound (wt%)	Bioglass® 45S5	Ceravital®	Cerabone® A/W	Ilmaplant®	Bioverit®	Biosilicate®
Na_2O	24.5	5-10	0	4.6	3-8	23.75
K_2O	0	0.5-3.0	0	0.2	0	-
MgO	0	2.5-5	4.6	2.8	2-21	-
CaO	24.5	30-35	44.7	31.9	10-34	23.75
Al_2O_3	0	0	0	0	8-15	-
SiO_2	45.0	40-50	34.0	44.3	19-54	48.5
P_2O_5	6.0	10-50	6.2	11.2	2-10	4
CaF_2	0	0	0.5	5.0	3-23	-
Phases	Glass	Devitrite+ Apatite+ Glass	Apatite+ β-$CaSiO_3$+ Glass	Apatite+ β-$CaSiO_3$+ Glass	Flogopite+ Apatite+ Glass	$Na_2CaSi_2O_6$ or $Na_2CaSi_2O_6$ + $NaCaPO_4$

Vitroceramicos bioactivos

Biosilicate®

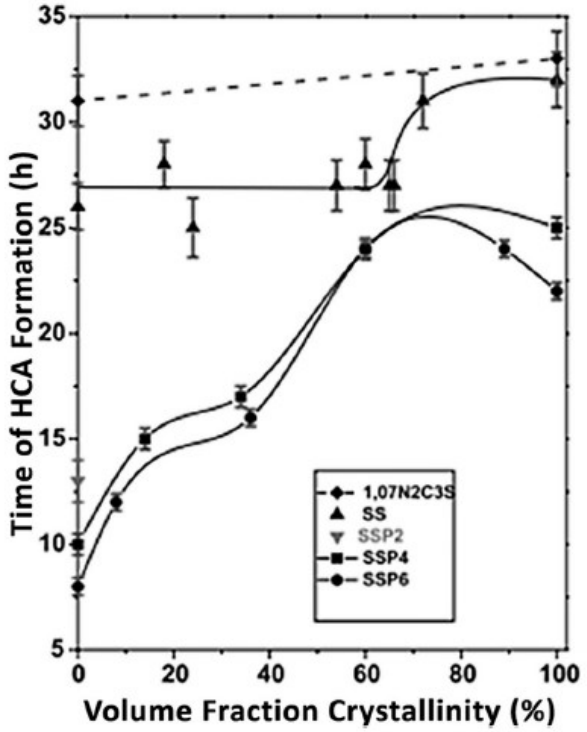


Fig. 1. Onset time for HCA formation as a function of the crystallized volume fraction ($1.07N2C3S = 18.5Na_2O–31.3CaO–50.3SiO_2$; $SS = 24.8Na_2O–24.8CaO–50.5SiO_2$; SSP2 = $24.2Na_2O–24.2CaO–49.5SiO_2–2P_2O_5$; SSP4 = $23.8Na_2O–23.8CaO–48.5SiO_2–4P_2O_5$; SSP6 = $23.2Na_2O–23.2CaO–47.5SiO_2–6P_2O_5$ – wt.%) [28].

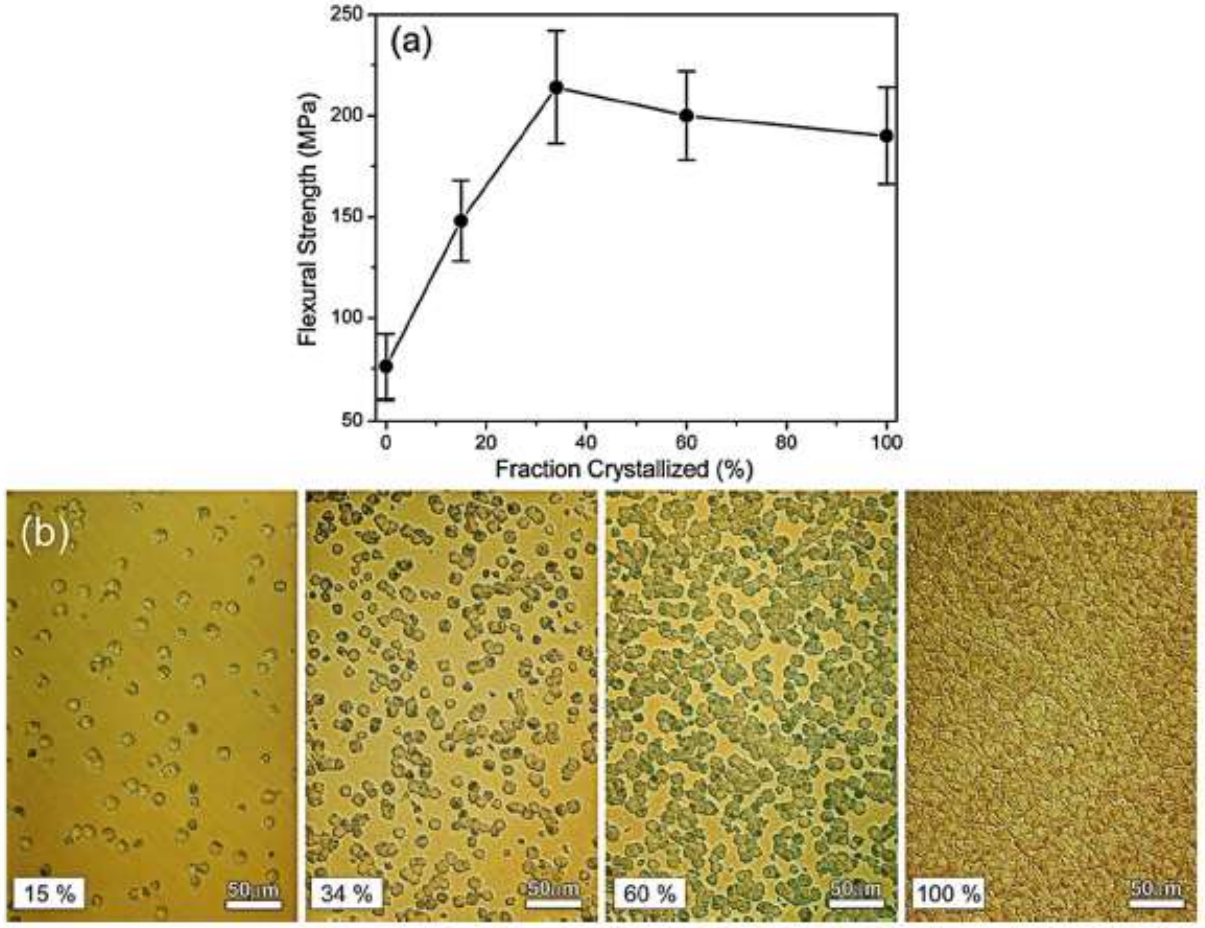
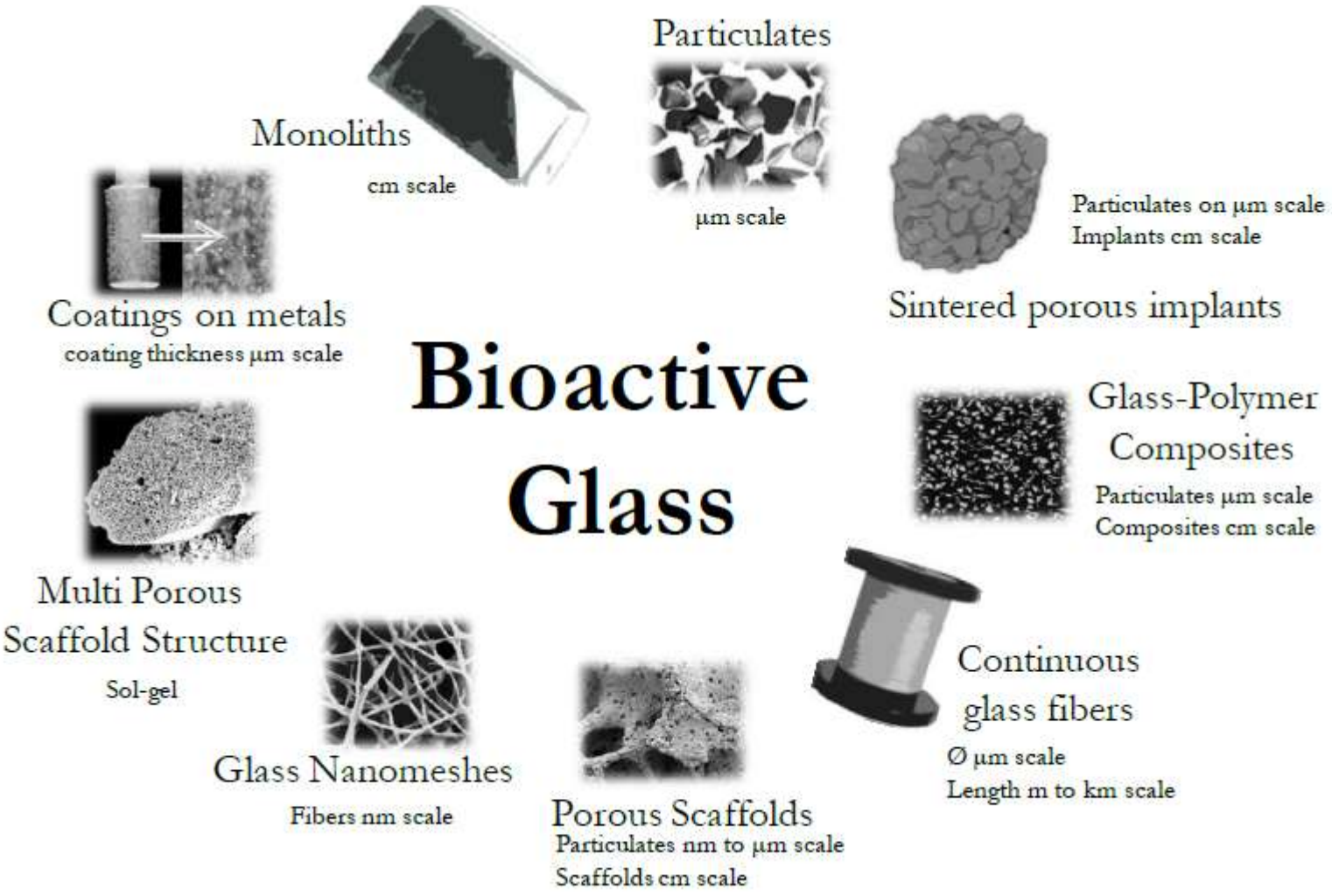


Fig. 2. (a) 3-point or 4-point bending strength versus crystalline volume fraction for a $23.8Na_2O–23.8CaO–48.5SiO_2–4P_2O_5$ (wt.%) glass-ceramic with a constant crystal size of 13 μm; (b) optical micrographs of the corresponding microstructures for 15%, 34%, 60% and fully crystallized samples (b) [29].

Versatilidad de formas de productos fabricados a partir de vidrios bioactivos con varios métodos



Los vidrios y vitrocerámicos bioactivos se pueden unir efectivamente al hueso y tambien estimular diferenciación osteoblástica y proliferación (material osteoconductivo)

Vitroceramicos de alta resistencia, moldeables y biocompatibles para restauracion dental

Vitrocerámicos de disilicato de litio ($Li_2Si_2O_5$)
Vitrocerámicos de leucita ($KAlSi_2O_6$)

- **Una elevada resistencia y moldeabilidad son características importantes de materiales biocompatibles utilizados para restauración dental.** Los vitrocerámicos de disilicato de litio, son populares para fabricar coronas y puentes dentales que no necesitan ser reforzados con metal. Un vitrocerámico muy resistente se utiliza para hacer una base y otro vitrocerámico conteniendo cristales de apatita se aplica encima y se da forma para parecerse al diente original.

Puente para reemplazar un diente perdido. Lo sorprendente de estos materials además de su resistencia son sus propiedades ópticas que hacen que se parezcan tanto al diente natural, incluyo mismo color.

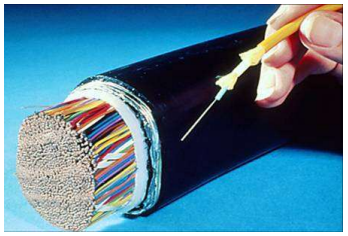
Productos IPS e.max® Press, IPS e.max® Ceram, IPS e.max® CAD

W. Hölland, Ivoclar

Áreas de investigación

- Vidrios en el ámbito de la salud
- **El vidrio en tecnologías de la información, comunicación y fotónica**
- Energía y medioambiente

El vidrio en tecnologías de la información, comunicación y fotónica



Auge de las TIC:

-Semiconductores (para diodos láser y, sobre todo, el silicio para ordenadores y dispositivos de procesamiento de datos)

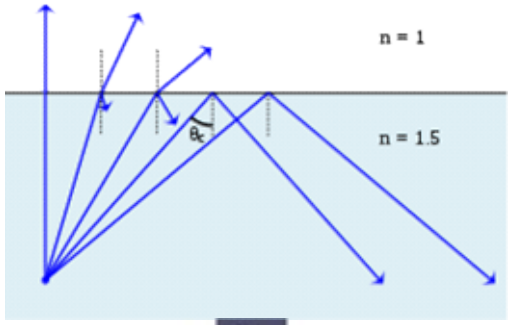
-**Vidrios (para fibras ópticas y componentes fotónicos).**

Actualmente se fabrican 500.000.000 de km de fibra óptica vítrea para telecomunicaciones.

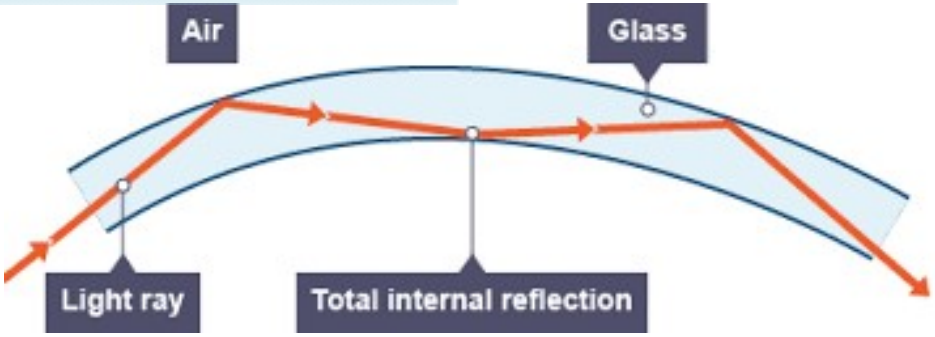
[1] Ballato, J. y Dragic, P. D. (2016): "Glass: the Carrier of Light. A Brief History of Optical Fiber", International Journal of Applied Glass Science, 7: 413-422.

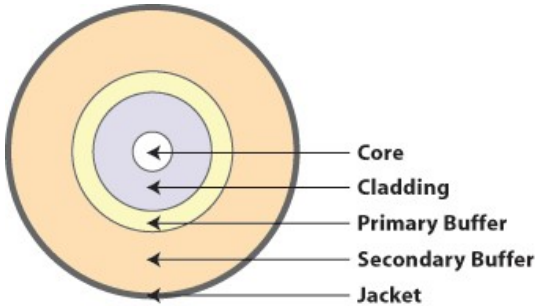
[2] Ballato, J. y Dragic, P. D. (2021): "Glass: The Carrier of Light (Part II). A Brief Look into the Future of Optical Fiber", International Journal of Applied Glass Science, 12: 3-24.

Fibra óptica



$$n = \frac{c}{v} \propto \frac{1}{\lambda}$$





- Las fibras ópticas operan utilizando el principio de reflexión total.
- Una "violación" de la ley de Snell's cuando la luz incidente excede un cierto ángulo crítico en la interfase entre un material de mayor índice de refracción y uno de menor índice.
- En teoría, el confinamiento continua indefinidamente pero **la atenuación y la dispersión** controlan las longitudes prácticas de uso.
- En la práctica, pueden ser estructuras bastante sofisticadas.

Fibra óptica

Nobel Prize in Physics 2009

"for groundbreaking achievements concerning the **transmission of light** in fibers for optical communication"

Charles K. Kao

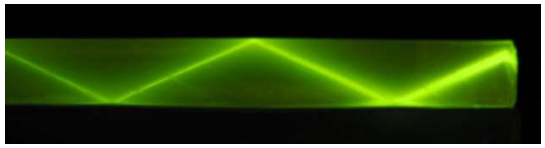
En 1966, Charles Kao fue pionero en observar que del vidrio podían obtenerse fibras de elevada transparencia (con bajas pérdidas)

1970's: First low-loss silica glass fiber
1990's: US information superhighway project
2000's: Global fiber-optic network

The internet has changed our way of life. It has

- created new industries
- given rise to new cultures
- influenced politics

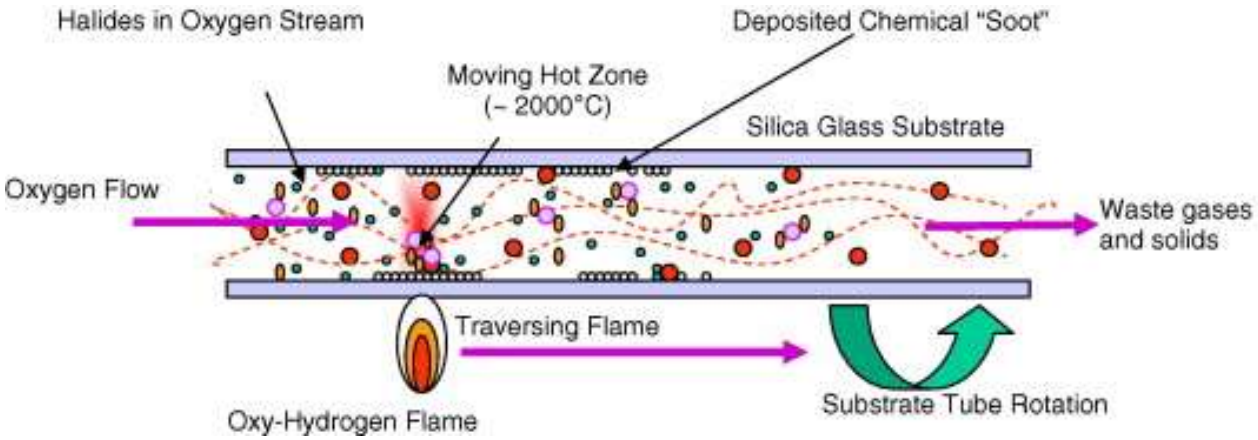
Fibra óptica

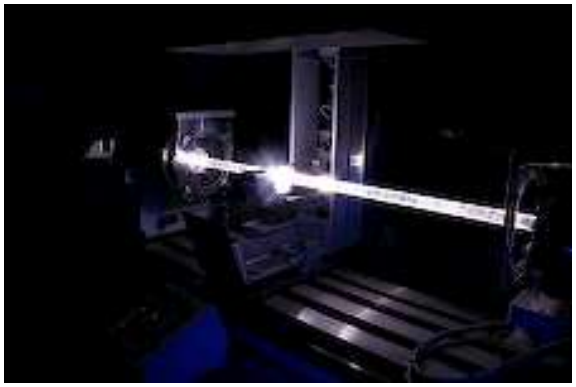


- Estructura Core/clad; "variaciones sobre un tema"

- Preformas de todo vidrio fabricadas utilizando CVD principalmente empleando la reacción:

$$SiCl_4 (+ GeCl_4 \ldots) + O_2 \rightarrow SiO_2 (+ GeO_2 \ldots) + 2Cl_2$$



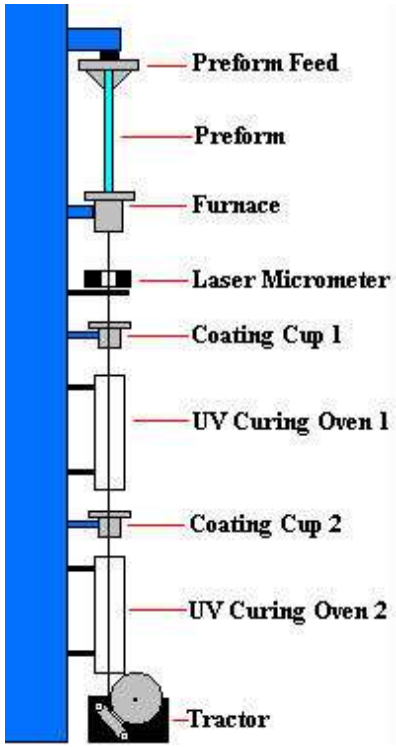


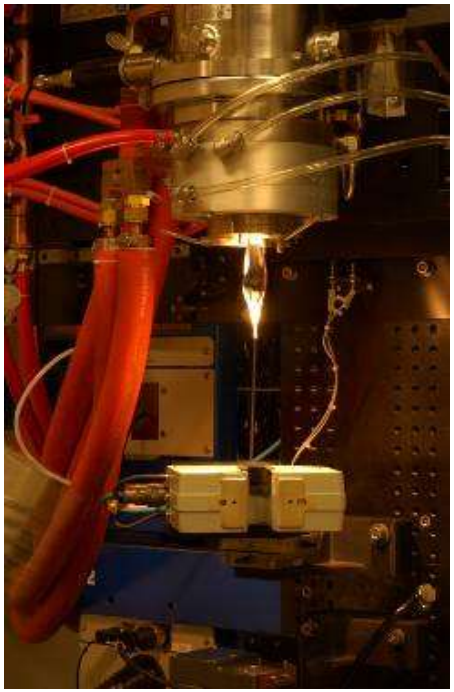
- A partir de la preforma se lleva a cabo el fibrado por encima del T_g del vidrio donde $\log_{10}(\eta) \sim 6$ poises.

Casi dos metros de fibra diarios por persona en el mundo

Fabricación de fibra óptica - Proceso de fibrado

- La preforma de vidrio se introduce en el horno
- El horno a temperatura suficientemente por encima de la temperatura de transición de modo que el vidrio reblandece y tira hacia abajo bajo su propio peso.
- Medida del diámetro de la fibra desnuda
- Aplicación de recubrimientos y curado
- Medida del diámetro de fibra recubierta
- Bobinado de la fibra





T= 2000ºC

30-45 metros de alto, preforma 20 cm de ancho x 2 m de alto

Fibras ópticas de próxima generación

- Las demandas sobre las fibras están creciendo rápidamente:

  - Potencias más altas para aplicaciones en telecomunicaciones/ láser de alta energia (HEL).
  - Temperaturas más altas requeridas para HELs y down-hole.
  - Mayor funcionalidad y rangos espectrales extendidos.
  - Necesidad de disminuir nolinearidades; e.g., SBS y SRS.

HEL: High Energy Lasers

SBS (stimulated Brillouin scattering) & *SRS* (stimulated Raman scattering)

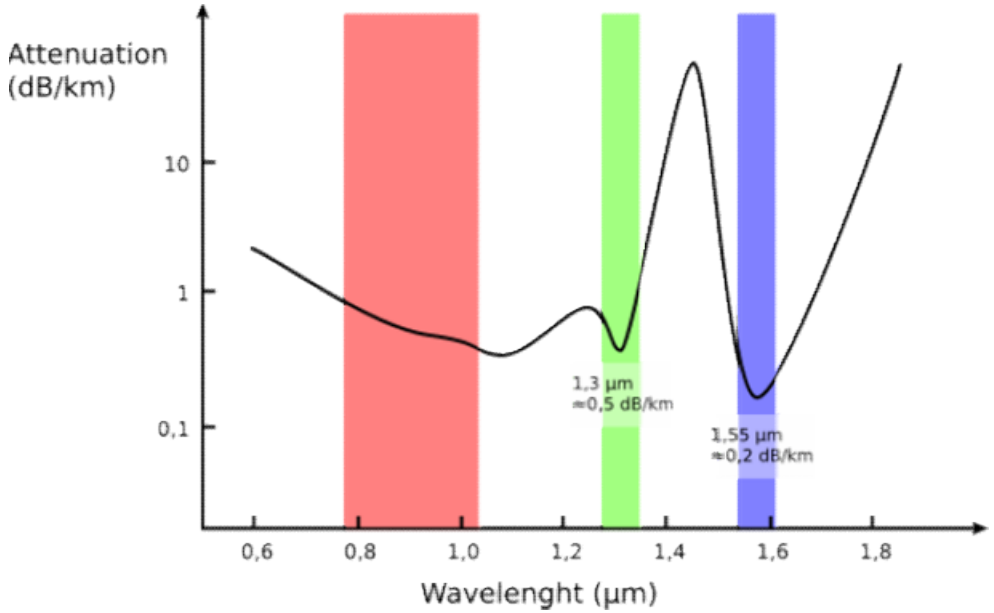
Down-hole: pruebas sismicas de fondo de pozo

Fibras ópticas de próxima generación

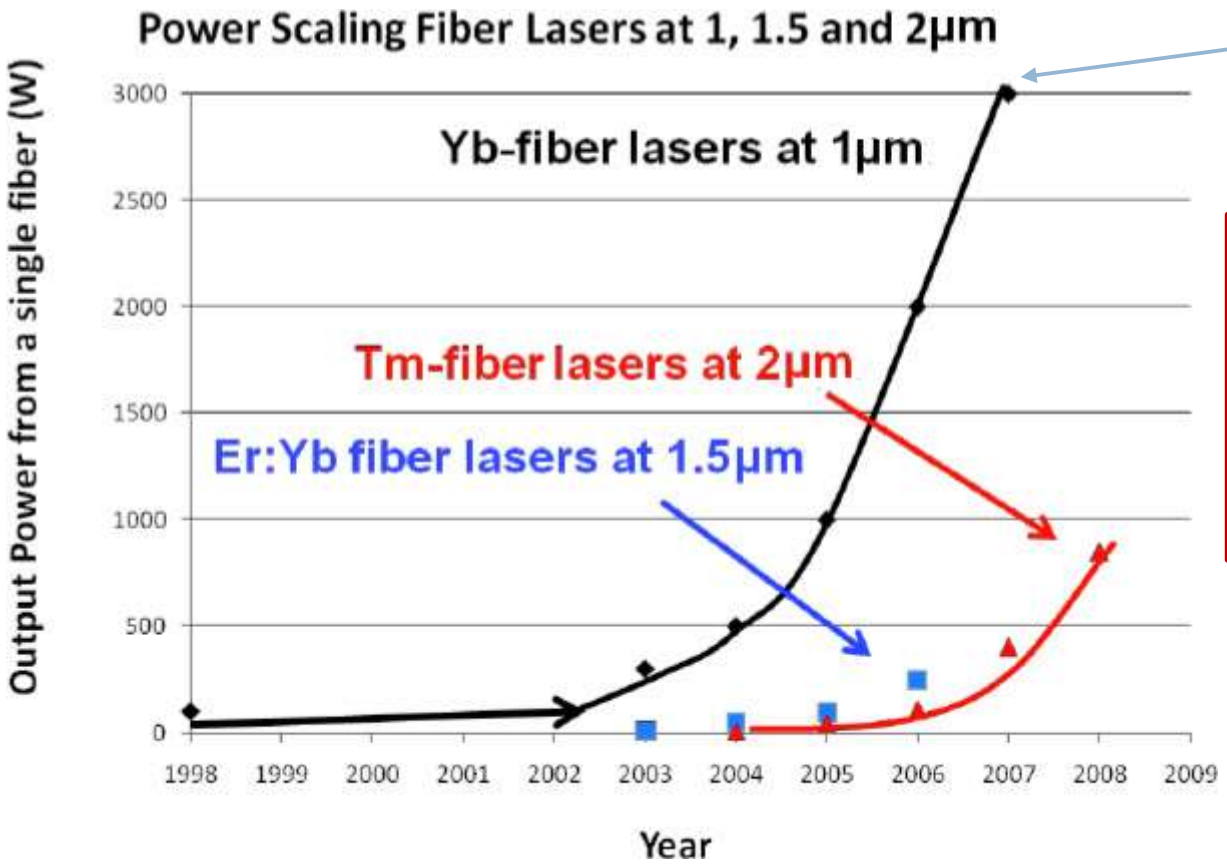
Ya a principios de los noventa, se comenzaban a instalar sistemas de comunicación de fibra óptica a nivel mundial, y el estudio de materiales comenzó a centrarse en vidrios, cuyo rendimiento podía superar, al menos en teoría, el de la sílice.

Los esfuerzos más notables se centraron en tres áreas temáticas, impulsadas principalmente por las crecientes necesidades de conexiones de larga distancia y mayor capacidad:

(i) vidrios de pérdidas ultrabajas (<100 dB/km)
(i) amplificadores ópticos de banda ancha, y
(i) vidrios no-lineales para conmutación a baja potencia y conversión de longitudes de onda



Fibras ópticas de próxima generación



~ 10^{13} W/m^2

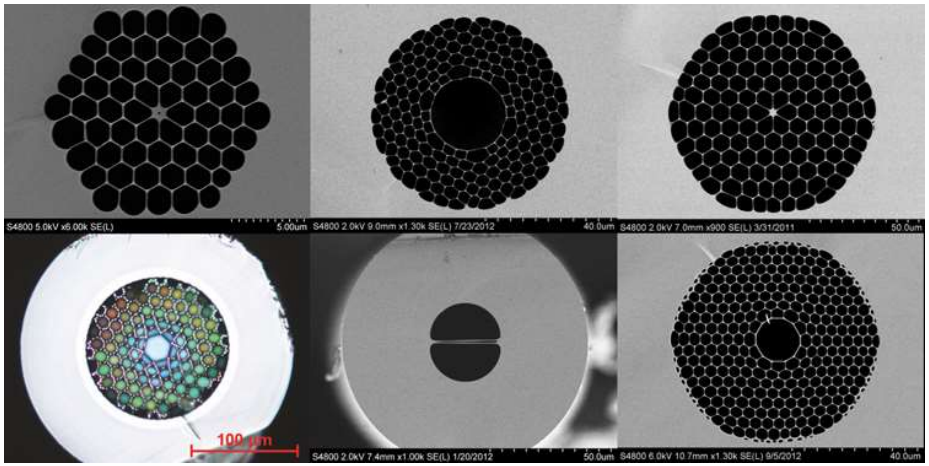
For comparison:

- At surface of earth ~ 10^3 W/m^2
- At surface of sun ~ 10^8 W/m^2

Investigación en amplificadores (láser) de fibra óptica. Inicialmente fibra óptica dopada con Er (EDFA). Los EDFA permiten las comunicaciones a larga distancia, dado que señales atenuadas podrían amplificarse sin conversión electróptica ni regeneración. Operan a 1,55 micrómetros, la longitud de onda de mínimas pérdidas para la sílice con gran eficacia.

Fibras ópticas de próxima generación - Opciones

- **Nuevos Materiales**
  - Otros sistemas vítreos: por ej., calcogenuros (As_2S_3, As_2Se_3 y Ga-La-S, fluoruros InF_3, ZrF_4, etc., vitrocerámicos
    - Baja estabilidad térmica y longitudes relativamente cortas.
  - Fibras cristalinas
    - Presentan propiedades mejoradas pero son difíciles de fabricar y el desempeño es solo OK.
- **Nuevos diseños**
  - PCFs, MOFs, LMAs, … Fibras microestructuradas, se basan en vidrios convencionales y su rendimiento depende de las estructuras periódicas de los vidrios o de los canales de aire que se crean apilando barillas y tubos
    - Mejor desempeño a través de la complejidad.



PCF: Photonic crystal fibre
MOF: microstructured optical fibre
LMA: large mode area fiber

http://www.mpl.mpg.de/en/imprs/welcome.html

Áreas de investigación

- Vidrios en el ámbito de la salud
- El vidrio en tecnologías de la información, comunicación y fotónica
- **Energías limpias y medioambiente**

Vidrio para tecnología fotovoltaica

Los materiales son clave para impulsar el desarrollo de la energía fotovoltaica

Celda de silicio: cubierta de vidrio, una película, algunos materiales de células solares, cables metálicos específicos y un vidrio en la parte posterior. El cuerpo principal de la celda solar está sellado en la película entre las dos capas de vidrio

93% del mercado mundial en 2020, y eficiencia conversión 25%

Células solares fotovoltaicas de película delgada de segunda generación (Teluro de Cadmio CdTe y seleniuro de cobre, indio y galio GIGS). El vidrio es el sustrato fundamental para los recubrimientos requeridos

El vidrio en la tecnología termosolar

T efectiva de cuerpo negro 5762K,
1,8x1014 KW de la energía radiante
son interceptados por la tierra.
Captura, transmisión
y almacenamiento de calor.

Planta de producción solar térmica de 50 MW
En Qinghai, China

En la captura de calor, el componente central es el reflector de concentración, compuesto principalmente de vidrio ultraclaro (vidrio con muy bajo contenido en hierro).
El reflector concentrador está compuesto por un sustrato de vidrio ultraclaro de 1-4 mm recubierto con una capa de plata reflectante, protegida con una capa de cobre y varias pinturas protectoras. La reflectancia puede aumentar en un 1,5% por cada 1% de aumento en la transmitancia del vidrio -Vidrio ultrafino y ultralimpio con alta transmitancia y alta resistencia a la intemperie.

En **la transmisión de calor**, el tubo de metal interno revestido con un recubrimiento de absorción selectiva de temperatura media-alta está sellado dentro de un tubo de vidrio de borosilicato con buena resistencia al ácido y al agua y un coeficiente de expansión lineal perfectamente adaptado al metal. Colector de tubo de vacío solar de temperatura media alta con T de hasta 400°C.

El vidrio en la energía eólica

Los compuestos de polímero reforzado con fibra de vidrio de alto rendimiento tienen excelentes propiedades mecánicas, son fácilmente procesables y tienen alta resistencia a la corrosión.

Pueden satisfacer las necesidades de aplicaciones a gran escala de energía eólica marina y se han convertido en el material preferido para palas de turbinas eólicas de gran tamaño.

La capacidad total instalada de energía eólica es de 743 GW, 6% de la generación de energía mundial.
Se quiere llegar al 30% (2050)

La demanda de 10000 a 15000 toneladas de fibra de vidrio por cada 1 GW de capacidad instalada impulsará la innovación en la industria de la fibra de vidrio.

Granja eólica. Fuente Pixabay

Vidrio para la eliminación de residuos nucleares

Más de 250000 toneladas métricas en forma de **residuos radioactivos de alta actividad (HLW)** de centrales nucleares e instalaciones de fabricación de armas en todo el mundo, se almacenan en tanques.

Esta forma de residuo primero se convierte en **sólido** para su eliminación permanente en depósitos geológicos. La matriz debe permanecer estable frente a la corrosión de las aguas subterráneas durante mil años.
Inmovilización: cementación, bitumización y **vitrificación.** (Bélgica, Francia, Alemania, India, Japón, Rusia, Reino Unido y EEUU).

Borosilicato y aluminofosfato de sodio. **Durabilidad**

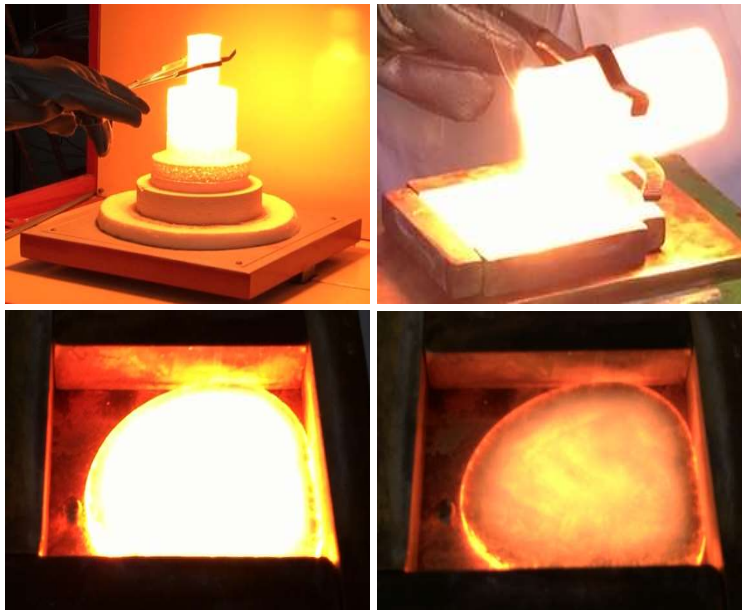
Se ha establecido un vidrio de borosilicato de seis componentes conocido como **International Simple Glass (ISG)** frente a la similitud con los vidrios de residuos:
60.2SiO_2-16.0B_2O_3-12.6NaO-3.8Al_2O_3-5,7CaO-1.7ZrO_2 (mol%.)

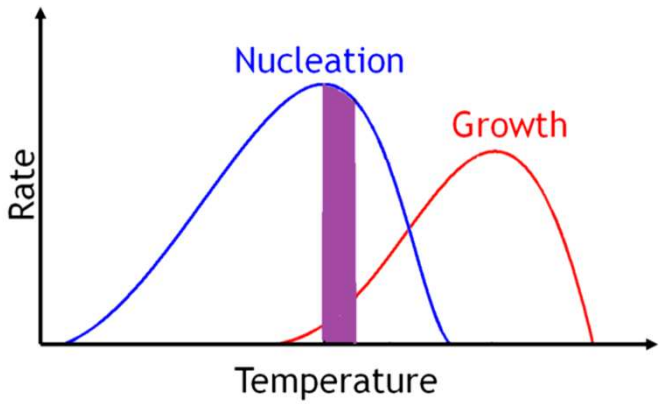
Vidrio para fotobiorreactores

La fotosíntesis en las microalgas ofrece: un enfoque atractivo para la producción de biomasa rica en lípidos y carbohidratos que puede utilizarse como biocombustible; biofijación de CO_2 para reducir los gases de efecto invernadero; y tratamiento de aguas residuales para reducir la concentración excesiva de nitrógeno y fósforo que causan la eutrofización. Determinadas microalgas también puede producir bioelectricidad en celdas de combustible microbianas e hidrógeno para su uso como combustible limpio.

Para una producción eficiente de microalgas orientada a cualquiera de estas aplicaciones de bajo impacto ambiental, se requieren fotobiorreactores como el de la figura de tubos de **vidrio de borosilicato.**

Grupo GlaSS- Diseño, preparación y caracterización de materiales vítreos y vitrocerámicos obtenidos por fusión para distintas aplicaciones tecnológicas





- Diseño de las composiciones
- Estudio de separación de fases en vidrios
- Procesos de nucleación y cristalización
- Mecanismos de cristalización
- Procesamiento de materiales masivos
- Sinterización y cristalización a partir de polvo de vidrio
- Caracterización térmica, estructural, química, óptica…

Vitrocerámicos transparentes para su aplicación en óptica

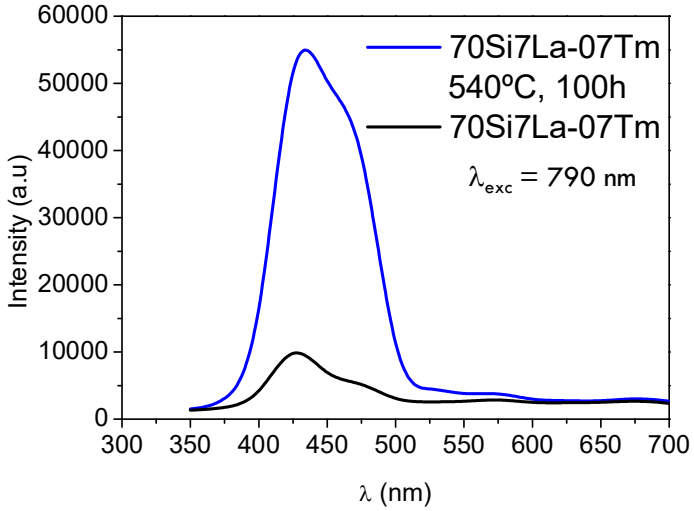
Vitrocerámicos de oxifluoruro

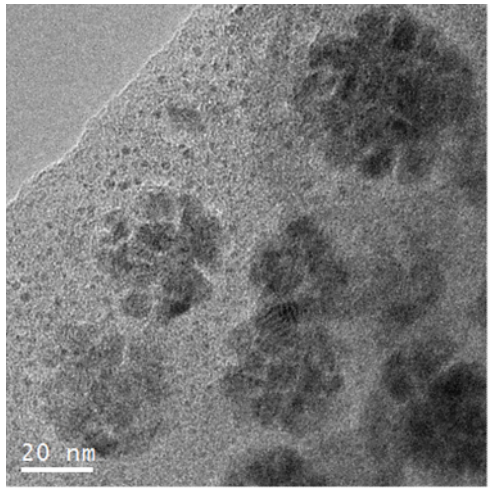
- Baja energía fonónica, transparencia óptica y solubilidad de las TR de los cristales de fluoruro
- Buenas propiedades mecánicas, térmicas y químicas de los vidrios de óxidos

Condición de transparencia: tamaño nanométrico de los cristales de fluoruro

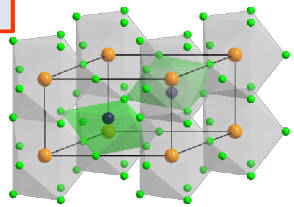
Incorporación de los iones de TR en la fase de fluoruro: mayor eficiencia óptica en el vitrocerámico

Material	Energía fonónica (cm^{-1})
Fosfatos	1200
Silicatos	1100
Fluoruros	550
$NaYF_4$	360
$NaLaF_4$	360
GdF_3	300-350
$NaLuF_4$	350
LaF_3	300
β-$KLaF_4$	260





$NaLaF_4$
La/Tm in **C_{3h}** sites



Aplicaciones:

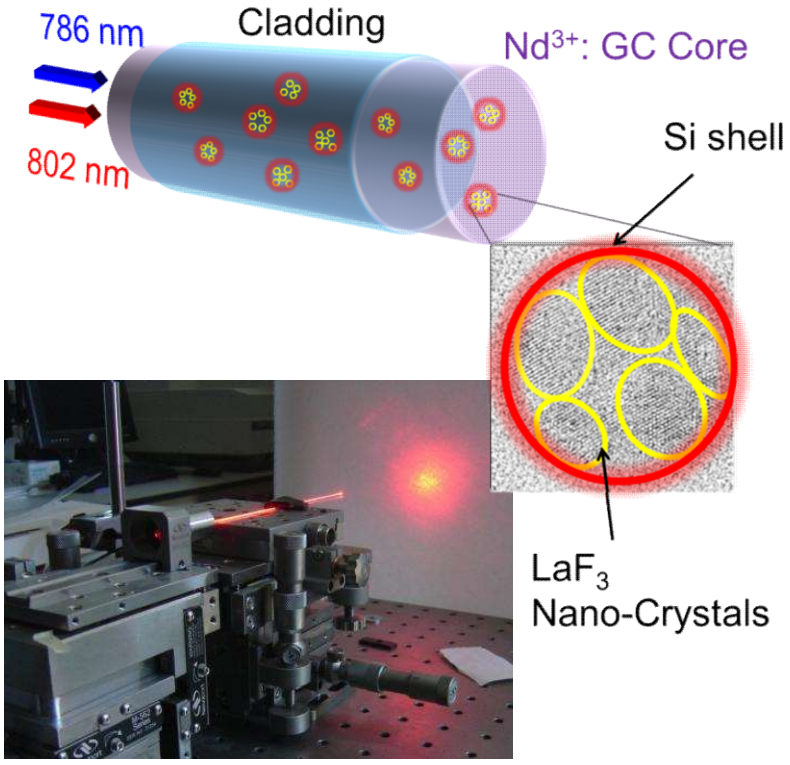
Materiales para up- y down- conversion

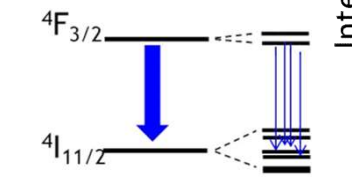
Láseres de estado sólido, fibras ópticas, guías de onda

Telecomunicaciones, fotovoltaica, medicina…

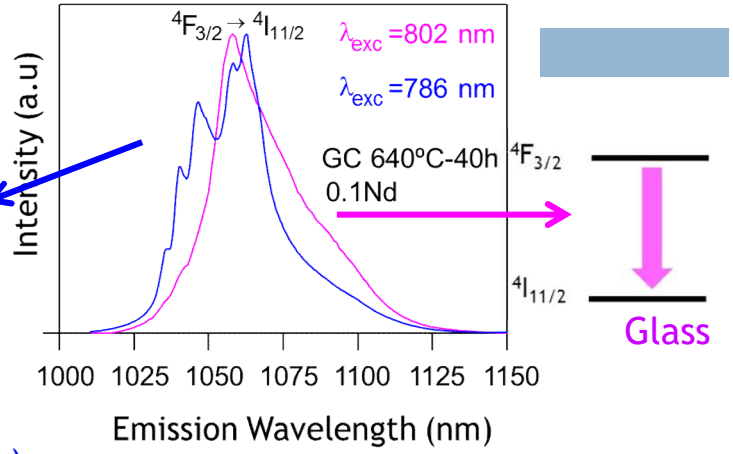
Vitrocerámicos transparentes para su aplicación en óptica

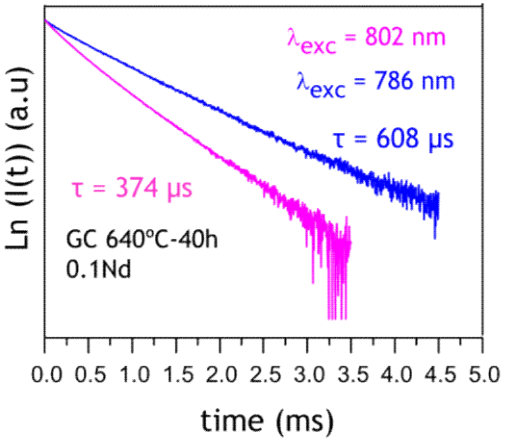
Fibra óptica vitrocerámica





GC
LaF_3 (Stark splitting)





Pérdidas: 16 dB/m a 633 nm

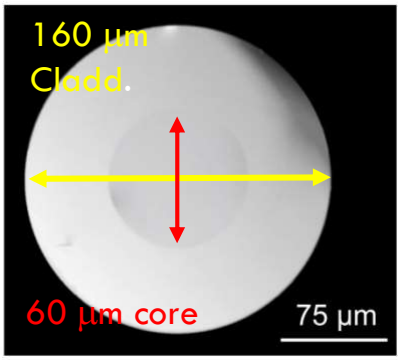
Primera vez que se obtiene espectro del $LaF_3:Nd^{3+}$ en fibra óptica vitrocerámica

Vitrocerámicos transparentes para su aplicación en óptica

$70SiO_2$-$5Al_2O_3$-$2AlF_3$-$2Na_2O$-$18NaF$-$3Lu_2O_3$-$0.5ErF_3$-$2YbF_3$ (%mol.) ($NaLuF_4$)

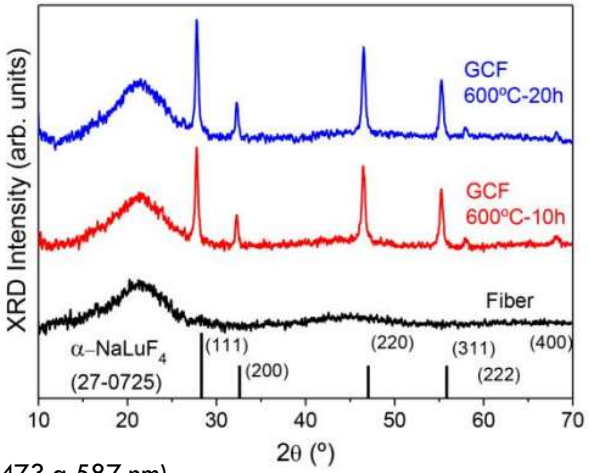
Método rod in tube

Sección de la fibra

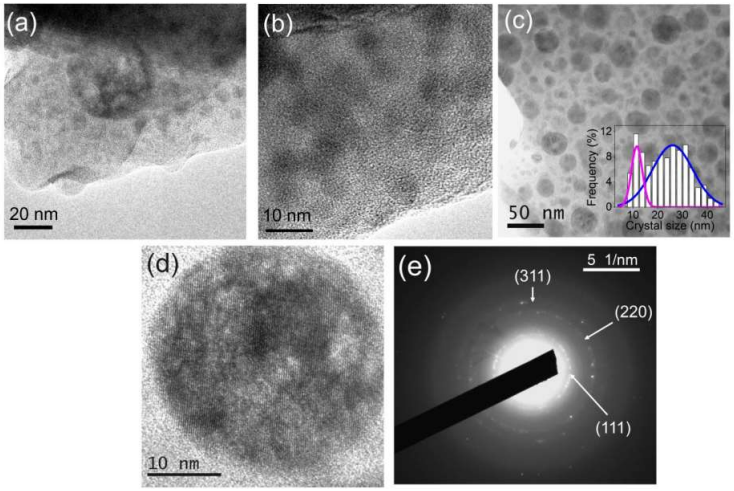


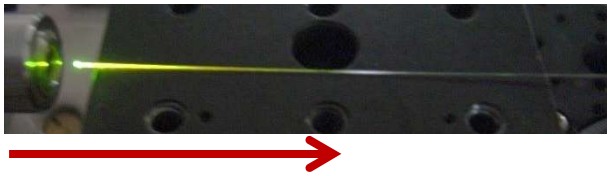
Vidrio core (n=1.49 a 587 nm)

Vidrio cladding: DURAN® GLASS (n=1.473 a 587 nm)



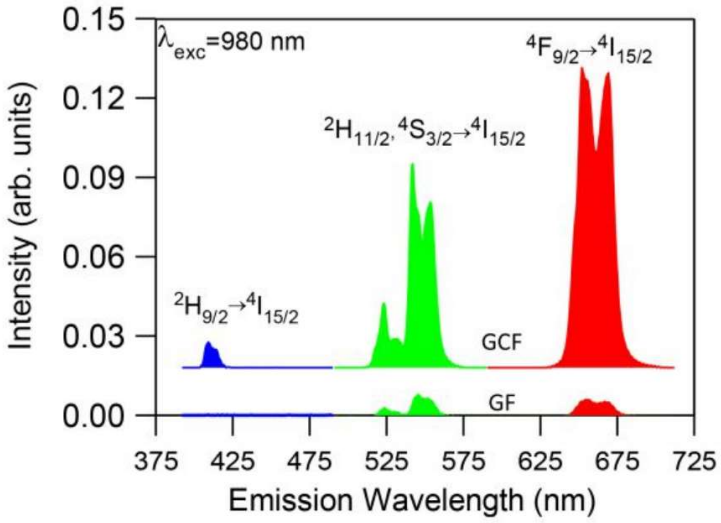
$NaLuF_4$ es un huésped eficiente para UC

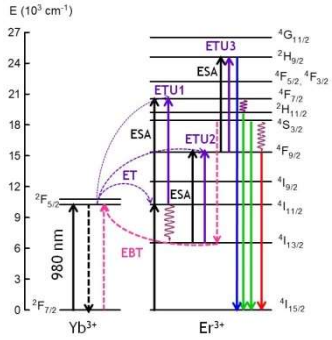




980 nm excitation

Pérdidas 10 dB/m a 633 nm





Emisión UC azul, verde y roja en las fibras ópticas vitrocerámicas GCF. Proceso de transferencia de energía ET eficiente desde los iones Yb^{3+} al Er^{3+}: RE^{3+} en los nanocristales de baja energía fonónica

Materiales fosforescentes

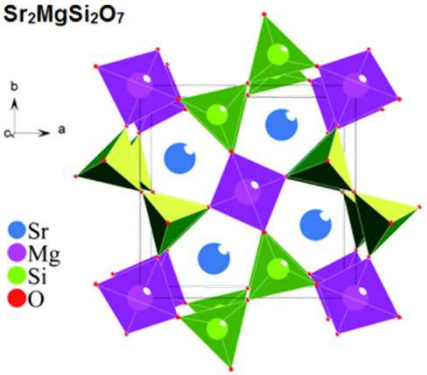
Reacción en estado sólido
Síntesis hidrotermal
Sol-gel
Combustión
Co-precipitacion
Método de "Molten Salt"

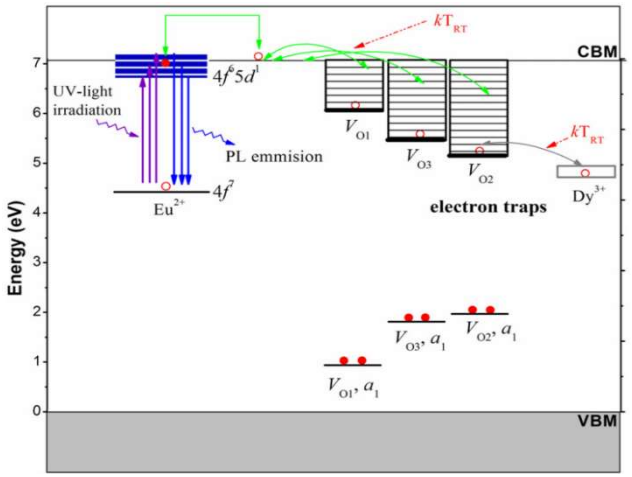
Ruta vitrocerámica
Materiales masivos y en polvo

Material cristalino
- Pigmento cerámicos

Material vitrocerámico
- Material en masa o esmalte

Control de la fracción cristalina y del tamaño del cristal





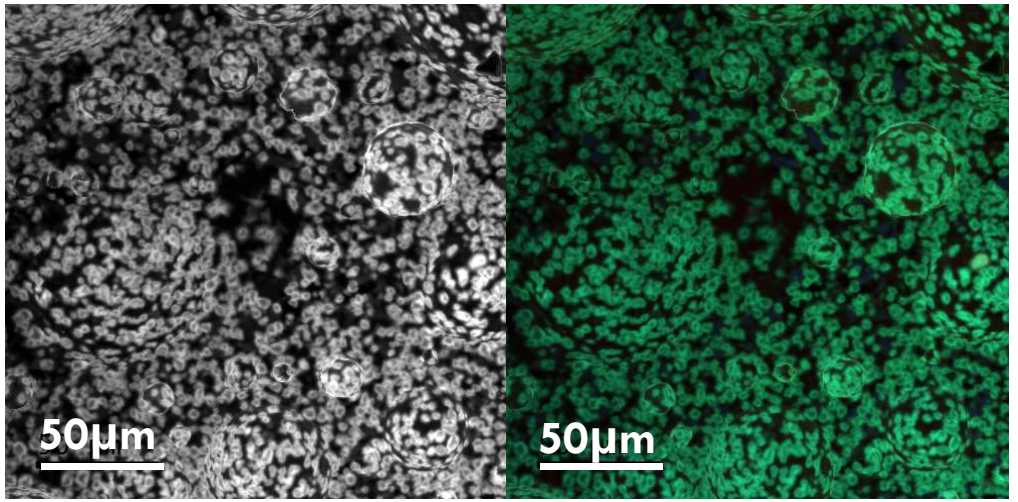
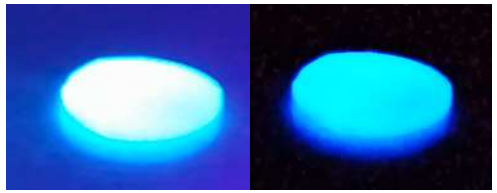


Imagen de catodolominiscencia
Vitrocerámicos de **$Sr_2MgSi_2O_7$**:Eu/Dy



Referencia: L. Wondraczek, S. Krolikowskib, P. Nass. J. Mater. Chem. C, 1 (2013) 4078-4086.

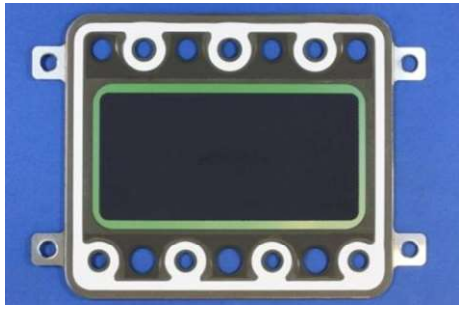
Vitrocerámicos para el sellado de pilas de combustible SOFC

Vitrocerámicos del sistema $SrO/BaO\text{-}MgO\text{-}B_2O_3\text{-}SiO_2$

Stack de bajo peso para aplicaciones APU en transporte (aprox. 5 KW), 10000 h, Reformado diesel

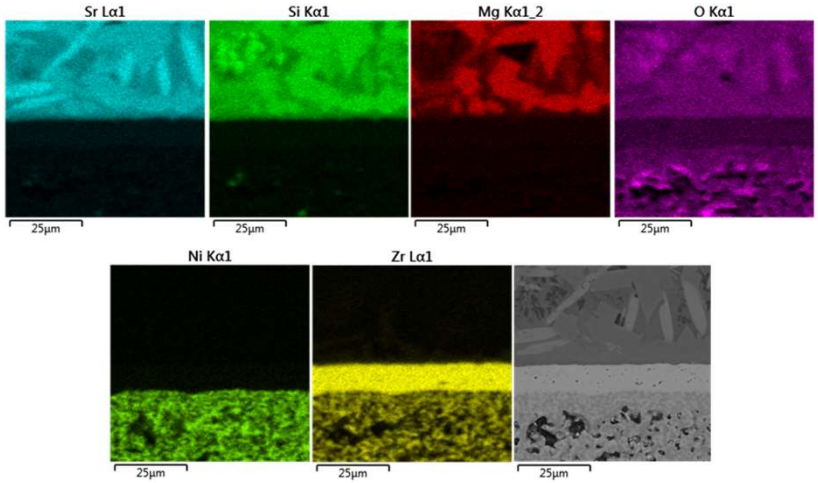
Resistencia termo-mecánica a largo plazo y resistencia frente al ciclado térmico

2 Rutas de procesamiento: Tecnología de pasta (Sinterización-cristalización) y soldadura asistida por láser



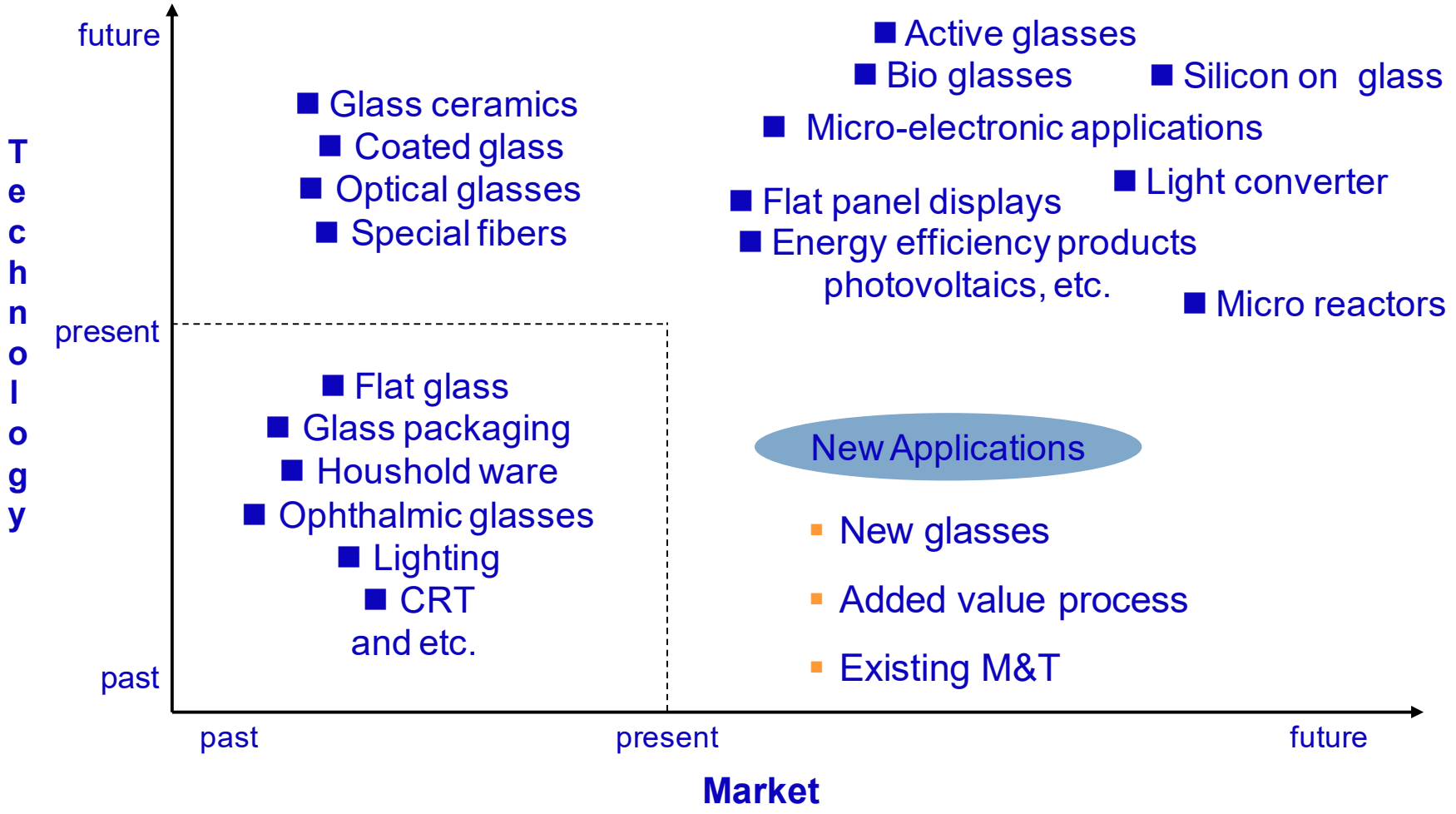
Diseño "Cassette" Jülich

Stack
T= 700°C, 1500 h + 10 ciclos
Estanqueidad total



Otros desarrollos: Vidrios y vitrocerámicos de soldadura para el sellado de componentes cerámicos y metálicos de muy diferente naturaleza y en aplicaciones que van desde temperatura ambiente hasta altas temperaturas y atmósferas extremas.

Muchas aplicaciones innovadoras en el horizonte- Futuro brillante del vidrio



GRACIAS POR SU ATENCIÓN